

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

FACULTAD DE CIENCIAS

Departamento de Física

MODELOS EMPÍRICOS PARA LA
ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA
SOLAR ULTRAVIOLETA

Memoria presentada por Manuel
Antón Martínez para optar al
grado de Doctor por la Univer-
sidad de Extremadura.

Badajoz, abril de 2007

***Edita: Universidad de Extremadura
Servicio de Publicaciones***

Caldereros 2. Planta 3ª
Cáceres 10071

Correo e.: publicac@unex.es

<http://www.unex.es/publicaciones>

Dña. MARÍA LUÍSA CANCELLO FERNÁNDEZ, Profesora Titular de Universidad y D. ANTONIO SERRANO PÉREZ, Profesor Contratado Doctor, ambos del Departamento de Física de la Universidad de Extremadura,

INFORMAN:

que la presente tesis doctoral, titulada “MODELOS EMPÍRICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR ULTRAVIOLETA”, ha sido realizada bajo nuestra dirección en el Departamento de Física de la Universidad de Extremadura.

Y para que conste, y en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos el presente en Badajoz, a 24 de marzo de 2007.

Agradecimientos

Estimado lector:

La memoria de tesis doctoral que tienes entre tus manos es el resultado de cinco años de intenso trabajo. Durante ese tiempo la ayuda de mis directores Dña. María Luísa Cancillo y D. Antonio Serrano ha sido esencial. Ellos han dirigido con sabiduría esta tesis, logrado obtener lo mejor de mí mediante su cercanía y capacidad de trabajo. A D. Agustín García, *el maestro*, le tengo que agradecer su atención en todo lo que he necesitado, sus sabios consejos y esas horas de viaje por carretera en las cuales, amigo lector, aprendí más que en muchos libros. Al resto de compañeros del grupo de investigación AIRE, dar las gracias por el interés mostrado en esta tesis y por crear ese clima de trabajo tan humano que permite trabajar diariamente con ilusión y cordialidad. Si tuviera que destacar algo en la realización de mi tesis, sería, sin duda, las personas que he conocido en el camino. No puedo dejar de nombrar a: los compañeros del INM de Madrid, los amigos *grenobloises* y los colegas de la Universidad de Valladolid y del INTA en El Arenosillo.

Mis Amigos, con mayúsculas, quizás no valoren suficientemente su aportación a esta tesis, pero me han dado esos momentos de complicidad y esparcimiento tan necesarios para poder afrontar el trabajo con mucho más ánimo. Imprescindible fue la ayuda técnica de Filomeno Zahínos, Juan Antonio Barragán y Conrado Ferrera. Uno, amable lector, tiene sus limitaciones, pero eso sí, amigos que las suplen. Guadalupe ha sido mi descanso, mi apoyo más importante, y ella, más que nadie, sabe lo duro del camino y la alegría de ir superando obstáculos. No existen palabras para agradecerle las horas robadas y los meses de ausencia. Mis hermanas, Rocío y Lucía, no han dejado nunca de intere-

sarse por mi trabajo, animándome en todo momento. Y mis padres, que puedo decir, si soy algo es por ellos, con su ejemplo, determinación y esfuerzo han logrado que llegue hasta aquí, respetando cada una de las decisiones que he ido tomando en mi vida.

Además, estimado lector, la realización de esta tesis doctoral ha sido posible gracias a la ayuda de distintas instituciones. Mi más sincero agradecimiento:

- A la Estación de Sondeos Atmosféricos El Arenosillo, perteneciente al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), y en particular a D. Benito de la Morena y D. José Manuel Vilaplana, por permitir la realización de tres campañas de intercomparación y proporcionar los datos del espectroradiómetro Brewer utilizados en este trabajo.
- Al centro de investigación IRSA perteneciente a la Universidad Joseph Fourier de Grenoble (Francia), y en especial a su director D. Alain C. de La Casinière, por acceder a que realizara tres estancias de investigación en dicho centro.
- A la Confederación Hidrográfica del Tajo y en particular al personal responsable de la Presa del Jerte en Plasencia, por permitir albergar la estación de medida de radiación solar en sus instalaciones.
- A la Escuela Politécnica de la UEx por aceptar la instalación en unos de sus edificios de la estación de medida de radiación solar de Cáceres.
- Al Departamento de Física de la UEx por permitir el montaje en el edificio de este departamento de la estación de medida de radiación solar de Badajoz.
- Al Ministerio de Educación y Ciencia (MEC), por la concesión de una beca predoctoral de Formación del Profesorado Universitario (FPU-AP2001-0845) y los proyectos de investigación REN2002-04558-C04-03/CLI y CGL2005-05693-C03-03/CLI.

- Al Instituto Nacional de Meteorología (INM), por la concesión de una beca de postgrado (proyecto #16-2005/2006).
- A la Junta de Extremadura por la concesión del proyecto de investigación IPR00C015 y el convenio de colaboración con la Consejería de Sanidad y Consumo para la creación y mantenimiento de una red de medida de radiación solar UV en Extremadura durante el año 2006.

El hombre es lo que le ha pasado, lo que ha hecho. Pudieron pasarle, pudo hacer otras cosas, pero he aquí que lo que efectivamente le ha pasado y ha hecho constituye una inexorable trayectoria de experiencias que lleva a su espalda, como el vagabundo el hatillo de su haber. Ese peregrino del ser, ese sustancial emigrante, es el hombre. Por eso carece de sentido poner límites a lo que el hombre es capaz de ser.

Historia como sistema. José Ortega y Gasset.

A mis padres

Índice general

Índice general	13
Índice de figuras	17
Índice de tablas	23
Abreviaturas y siglas	25
Variables y parámetros estadísticos	27
1. Introducción	29
1.1. Marco de trabajo y antecedentes bibliográficos	29
1.2. Objetivos	33
1.3. Estructura de la memoria	33
2. La radiación ultravioleta	37
2.1. Introducción	37
2.2. Características	38
2.3. Procesos de atenuación	40
2.4. Factores moduladores	43
2.5. Medida y estimación de la radiación UV	47
3. Instrumentación	51
3.1. Introducción	51
3.2. Piranómetro de radiación solar UV	52
3.3. Piranómetro de radiación solar global	54
3.4. Sistema de adquisición de datos	56
3.5. Espectrorradiómetro Brewer	57
3.6. Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)	59
4. Red de medida	61
4.1. Introducción	61

4.2.	Emplazamientos de medida	62
4.3.	Características de la red	65
4.4.	Proceso de medida	67
4.5.	Acciones actuales y futuras	68
5.	Calibración	71
5.1.	Introducción	71
5.2.	Emplazamiento	72
5.3.	Campañas de calibración	74
5.4.	Procesado previo de las medidas	74
5.4.1.	Análisis del error de cero de los radiómetros de banda ancha	74
5.4.2.	Corrección del error coseno del instrumento Brewer	79
5.4.3.	Diferencias en la resolución temporal y espectral entre el espectrorradiómetro Brewer y los radiómetros	90
5.5.	Calibrado del fabricante	93
5.6.	Métodos de calibración de un paso	94
5.6.1.	Metodología	94
5.6.2.	Resultados	97
5.6.3.	Selección del modelo	101
5.6.4.	Validación del modelo seleccionado	103
5.7.	Método de calibración de dos pasos	105
5.7.1.	Metodología	106
5.7.2.	Resultados	109
5.7.3.	Validación del método de dos pasos	110
5.8.	Comparación entre el método de un paso seleccionado y el método de dos pasos	112
5.9.	Estabilidad en la medida de los radiómetros	114
5.10.	Dependencia temporal de los factores de calibración	117
6.	Variables de los modelos	121
6.1.	Introducción	121
6.2.	Transmisividad ultravioleta eritemática	122
6.3.	Índice de claridad	127
6.4.	Cantidad total de ozono	132
6.5.	Altura solar	137
7.	Modelos empíricos	139
7.1.	Introducción	139
7.2.	Planteamiento físico del problema	139
7.3.	Aproximación con modelos de una variable	141
7.3.1.	Dependencia con el ozono	143
7.3.2.	Dependencia con la nubosidad	153

7.3.3.	Dependencia con la altura solar	159
7.4.	Modelo completo	166
7.4.1.	Formulación del modelo completo	166
7.4.2.	Selección de datos	166
7.4.3.	Ajuste del modelo completo	167
7.4.4.	Análisis de los residuos del modelo	168
7.4.5.	Análisis de colinealidad entre las variables independientes	174
7.4.6.	Contraste de hipótesis de significación	175
7.4.7.	Validación del modelo	176
8.	Aplicaciones del modelo	181
8.1.	Introducción	181
8.2.	Índice Ultravioleta	182
8.2.1.	Estimación del UVI	182
8.2.2.	Predicción del UVI	186
8.3.	Reconstrucción de datos	191
8.3.1.	Lagunas de datos	191
8.3.2.	Máximos históricos	193
9.	Conclusiones	195
	Anexo 1: Estadísticos bondad modelos	197
	Anexo 2: Estadísticos validación modelos	199
	Anexo 3: Contraste de hipótesis	201
	Bibliografía	203

Índice de figuras

2.1. Espectro electromagnético	38
2.2. Irradiancia espectral solar extraterrestre. Se muestra en gris la parte correspondiente a la radiación solar UV.	39
2.3. Transmisividad espectral de la atmósfera a la radiación solar. Transmisividad atmosférica total y las parciales debidas al ozono, oxígeno y aerosoles.	41
2.4. Perfil promedio de ozono para Madrid correspondiente al periodo 1995-2004 para los meses de abril y noviembre.	44
3.1. Piranómetro ultravioleta tipo UV-S-E-T de la firma Scintec-Kipp & Zonen.	52
3.2. Respuesta espectral normalizada correspondiente a la función respuesta CIE y a las funciones espectrales propias de cada radiómetro (escala semilogarítmica).	54
3.3. Piranómetro CM6B de Kipp & Zonen para la medida de la radiación solar global.	55
3.4. Sistema de adquisición de datos CR10X de la firma Campbell Scientific.	56
3.5. Espectrofotómetro Brewer (MK-III).	58
4.1. Izquierda: Evolución de la media mensual de horas de sol para Badajoz (●) y Cáceres (○) para el periodo 1971-2000. Derecha: Evolución de la media mensual de días despejados para Badajoz (●) y Cáceres (○) para el periodo 1971-2000.(INM, 2001)	62
4.2. Localización geográfica de las estaciones (●) de la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura.	63
4.3. Estación de medida de radiación solar en Badajoz y su localización exacta (fuente: Google Earth).	64
4.4. Estación de medida de radiación solar en Cáceres y su localización exacta (fuente: Google Earth).	65
4.5. Estación de medida de radiación solar en Plasencia y su localización exacta (fuente: Google Earth).	66
4.6. Radiómetro NILU-UV.	67

4.7. Fotómetro solar CIMEL en la estación de medida de Cáceres.	68
5.1. Estación de Sondeos Atmosféricos (ESAt) ubicada en El Arenosillo (Huelva).	72
5.2. Los tres radiómetros UV-S-E-T situados sobre una plataforma horizontal en la terraza del observatorio de la ESAt.	73
5.3. Error de cero correspondiente a cada radiómetro para el periodo completo de estudio.	76
5.4. Error de cero de cada radiómetro medido en las tres campañas de calibración.	78
5.5. Izquierda: Representación de la función respuesta coseno del espectrorradiómetro Brewer (f_a) y de la función respuesta ideal respecto al ángulo cenital (θ). Derecha: Ln f_a frente a Ln $\cos \theta$ junto con la recta de regresión.	82
5.6. Factor de corrección de irradiancia directa en función del ángulo de incidencia θ	83
5.7. Izquierda: Evolución de la función r respecto a θ para cielo despejado ($\tau = 0$) y tres λ diferentes. Derecha: Evolución de la función r respecto a θ para un valor de λ constante (324 nm) y valores de τ entre 0 y 3.	85
5.8. Izquierda: Dependencia de la función de corrección f_g respecto a θ para tres valores de λ diferentes para el caso despejado ($\tau = 0$). Derecha: Dependencia de la función f_g respecto a θ para un valor de λ constante (324 nm) y valores de τ entre 0 y 3.	86
5.9. Dependencia de la irradiancia UV ($\lambda = 324$ nm), medida por el espectrorradiómetro Brewer para casos despejados en función del coseno del ángulo cenital solar.	89
5.10. Cociente entre la irradiancia UV medida por el instrumento QASUME y los datos del espectrorradiómetro Brewer #150 sin corregir (\bullet), corregidos para la longitud de onda representada (\times) y corregidos considerando $\lambda = 324$ nm (\circ).	90
5.11. Dependencia con el ángulo cenital solar de la razón entre la irradiancia UV eritemática estimada en el intervalo espectral 363-400 nm (modelo UVSpec) y la medida en el intervalo 350-363 nm (Brewer). Campaña 2003.	92
5.12. Evolución de la irradiancia UV eritemática obtenida mediante el espectrorradiómetro Brewer y la medida por los tres radiómetros utilizando el factor de calibración dado por el fabricante. Día 27 de septiembre de 2003.	93

5.13. Izquierda: Representación de los cocientes obtenidos al dividir $E^{CIE-Bre}$ entre V^{Rad} medidos por el radiómetro #1 frente a la hora. Campaña 2003. Derecha: Representación de dichos cocientes frente al coseno del ángulo cenital solar.	100
5.14. Irradiancia UV eritemática obtenida mediante el espectrorradiómetro Brewer frente a la señal de salida del radiómetro #1. Campaña 2003 .	102
5.15. Diferencias relativas entre la irradiancia UV medida por el espectrorradiómetro Brewer y la registrada por el radiómetro #1 empleando los factores de calibración obtenidos mediante los cuatro modelos de un paso. Campaña 2003.	105
5.16. Valores de irradiancia UV medidos por el instrumento Brewer frente a los medidos por el radiómetro #1 utilizando los factores de calibración generados mediante el modelo del coseno (campaña 2003).	106
5.17. Evolución de la irradiancia UV eritemática obtenida mediante el espectrorradiómetro Brewer y la medida por cada uno de los tres radiómetros, utilizando los factores de calibración obtenidos mediante el modelo del coseno (de un paso) para el día 27 de septiembre de 2003.	108
5.18. Factor de calibración absoluto K del radiómetro #1. Campaña 2003.	109
5.19. Factor de conversión adimensional C como función del ángulo cenital para distintos valores de cantidad total de ozono.	111
5.20. Factor de calibración del radiómetro #1 obtenido mediante el método de dos pasos en función del ángulo cenital solar para distintos valores de cantidad total de ozono. Campaña 2003.	112
5.21. Irradiancia UV eritmática medida por el espectrorradiómetro Brewer frente a la medida por el radiómetro #1 utilizando los factores de calibración obtenidos por el método de dos pasos (campaña 2003). . .	113
5.22. Valores de irradiancia UV eritemática obtenidos por el radiómetro #1 empleando el método de un paso (modelo del coseno) frente a los valores radiativos obtenidos utilizando el método dos pasos. Campaña 2003.	115
5.23. Izquierda: Variación temporal del factor de calibración FC_{c1} correspondiente a cada uno de los tres radiómetros durante el periodo 2001-2005. Derecha: Idem para el factor de calibración FC_{c2}	116
6.1. Evolución de los valores medios diarios de la transmisividad UV en Badajoz, Cáceres y Plasencia.	125
6.2. Histograma de frecuencias absolutas de los valores medios diarios de la transmisividad UV en Badajoz, Cáceres y Plasencia.	126
6.3. Índice de claridad frente al espesor óptico de aerosoles medido en 380 nm.	128

6.4.	Evolución de los valores medios diarios del índice de claridad en Badajoz, Cáceres y Plasencia.	130
6.5.	Histograma de frecuencias absolutas de los valores medios diarios del índice de claridad en Badajoz, Cáceres y Plasencia.	131
6.6.	Histograma de frecuencias de la dispersión relativa diaria de la cantidad total de ozono medida en la estación ESAt de El Arenosillo durante el periodo 1998-2003.	133
6.7.	Evolución de la cantidad total de ozono estimada en Badajoz, Cáceres y Plasencia por el instrumento TOMS.	135
6.8.	Histograma de frecuencias absolutas de la cantidad total de ozono estimada en Badajoz, Cáceres y Plasencia por el instrumento TOMS.	136
7.1.	Transmisividad UV eritemática frente a la cantidad de ozono estimada por el TOMS en cada una de las tres estaciones.	151
7.2.	Comparación entre los valores de T_{UV} medidos y los calculados mediante el modelo potencial cuando la variable independiente es el ozono. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.	152
7.3.	Transmisividad UV frente al índice de claridad en cada una de las tres estaciones.	157
7.4.	Valores de la variable T_{UV} medidos frente a los calculados mediante el modelo potencial cuando la variable independiente es el índice de claridad. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.	158
7.5.	Transmisividad UV frente a la masa óptica relativa en cada una de las tres estaciones.	164
7.6.	Comparación entre los valores de T_{UV} medidos y los calculados mediante el modelo potencial cuando la variable independiente es la masa óptica relativa. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.	165
7.7.	Residuos del modelo empírico completo frente a los valores estimados de la variable dependiente. Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.	170
7.8.	Residuos del modelo 7.37 frente a las tres variables independientes que se incluyen en dicha expresión. Estación de Badajoz	171
7.9.	Histogramas de los residuos estandarizados de los modelos empíricos completos de Badajoz, Cáceres y Plasencia.	172
7.10.	Residuos de los modelos empíricos completos 7.37 (Badajoz), 7.38 (Cáceres) y 7.39 (Plasencia) frente a los valores teóricos procedentes de una distribución normal. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.	173
7.11.	Comparación entre los valores de transmisividad UV eritemática medidos y los calculados mediante el modelo completo. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.	178

7.12. Diferencias relativas entre los valores medidos y estimados mediante el modelo potencial propuesto.	179
7.13. Transmisividad UV eritemática medida (línea negra) y estimada por los modelos (línea gris) 7.37 (Badajoz), 7.38 (Cáceres) y 7.39 (Plasencia). Día 14 de marzo de 2005.	180
8.1. <i>UVI</i> máximo diario medido y estimado por el modelo empírico completo. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad. . .	184
8.2. Diferencias relativas entre el <i>UVI</i> máximo diario medido y estimado por el modelo empírico completo en los tres emplazamientos de estudio. 185	
8.3. <i>UVI</i> medido (línea negra) y predicho por el modelo (línea gris). . . .	188
8.4. Histograma de diferencias absolutas entre el <i>UVI</i> medido y predicho.	189
8.5. Comparación entre los valores del <i>UVI</i> predichos por el modelo y los calculados a partir de las medidas experimentales. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.	190
8.6. Irradiancia UV eritemática medida en superficie (línea negra) y estimada por el modelo (línea gris) correspondiente a varios días del mes de junio de 2005.	192
8.7. Irradiancia UV eritemática a las 12 UTC medida en superficie (línea negra) y estimada por el modelo empírico (línea gris) para cielo despejado correspondiente a los años 1999, 2000, 2001 y 2002.	194

Índice de tablas

3.1. Características del radiómetro modelo UV-S-E-T de Scintec-Kipp & Zonen.	53
3.2. Características del piranómetro de medida de radiación solar global CM-6B.	56
3.3. Características del datalogger CR10X.	57
3.4. Características del espectrorradiómetro Brewer MK-III	59
5.1. Error de cero correspondiente a cada radiómetro de banda ancha. Campañas 2001, 2003 y 2005.	77
5.2. Matriz de datos teórica para la estimación de f_g	87
5.3. Factor de calibrado proporcionado por el fabricante y la raíz del error cuadrático medio correspondiente a cada radiómetro de banda ancha. Campañas 2001, 2003 y 2005.	94
5.4. Factor de calibración, error estándar y raíz del error cuadrático medio obtenidos mediante el modelo del cociente para cada radiómetro de banda ancha. Campañas 2001, 2003 y 2005.	99
5.5. Factor de calibración, error estándar, coeficiente de determinación y raíz del error cuadrático medio obtenidos mediante el modelo de primer orden para cada radiómetro de banda ancha. Campañas 2001, 2003 y 2005.	101
5.6. Factores de calibración, sus errores estándar, coeficiente de determinación y raíz cuadrada del error cuadrático medio obtenidos mediante el modelo de segundo orden para cada radiómetro. Campañas 2001, 2003 y 2005.	103
5.7. Factores de calibración, sus errores estándar, coeficiente de determinación y raíz cuadrada del error cuadrático medio obtenidos mediante el modelo del coseno para cada radiómetro. Campañas 2001, 2003 y 2005.	104
5.8. Resultados de la validación de los factores de calibración obtenidos mediante el modelo coseno. Campañas 2001, 2003 y 2005	107

5.9. Resultados de la regresión entre la irradiancia UV propia obtenida mediante el espectrorradiómetro Brewer y la señal de salida de cada radiómetro. Campaña 2003.	110
5.10. Resultados de la validación de los factores de calibración obtenidos mediante el método de dos pasos. Campaña 2003	114
5.11. Parámetros MABE obtenidos al aplicar los factores de calibración de cada campaña a los casos seleccionados en la validación de la campaña 2005.	117
6.1. Valores de masa óptica relativa y diferencias relativas respecto a la expresión 6.8.	138
7.1. Estadísticos AIC correspondientes a las expresiones polinómicas de grado uno, dos y tres. Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia. . .	148
7.2. Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a la expresiones estudiadas en el análisis de las variables T_{UV} y $[O_3]$. Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.	149
7.3. Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas utilizando las variables T_{UV} y K_t . Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.	155
7.4. Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas en el análisis entre T_{UV} y m_r^S	161
7.5. Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas en el análisis entre T_{UV} y m_r^K	161
7.6. Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas en el análisis entre T_{UV} y m_r^{Rd}	162
7.7. Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas en el análisis entre T_{UV} y m_r^{Rb}	162
7.8. Factor de incremento de varianza correspondiente a las variables independientes utilizadas en el modelo potencial completo. Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.	174
7.9. Parámetro t de Student correspondiente a los coeficientes de regresión de los modelos potenciales completos dados por las expresiones 7.37 (Badajoz), 7.38 (Cáceres) y 7.39 (Plasencia).	175
7.10. Intervalos de Confianza al 5% de significación correspondientes a los coeficientes de regresión de los modelos potenciales completos correspondientes a las estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.	176
8.1. Categorías asignadas al índice UV en función de su grado de peligro (Acción Cost-713)	182

Abreviaturas y siglas

- **AERONET.** AErosol RObot NETwork
- **AIC.** Criterio de información de Akaike
- **AIRE.** Atmosféra, cIIma y Radiación en Extremadura
- **CFCs.** Clorofluorocarbonos
- **CIE.** Comission Intenational de l'Eclairage
- **UD.** Unidad Dobson
- **ESAt.** Estación de Sondeos Atmosféricos
- **GOME.** Global Ozone Monitoring Experiment
- **INM.** Instituto Nacional de Meteorología
- **INTA.** Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
- **IOS.** International Ozone Service
- **NASA.** National Aeronautics and Space Administration
- **NIST.** National Institute of Standards and Technology
- **OMM-WMO.** Organización Meteorológica Mundial-World Meteorological Organization
- **OMS-WHO.** Organización Mundial de la Salud-World Health Organization
- **QASUME.** Quality Assurance of Spectral Ultraviolet Measurements in Europe
- **TOMS.** Total Ozone Mapping Spectrometer
- **UEx.** Universidad de Extremadura
- **UV.** Ultravioleta

- **UVA.** Ultravioleta tipo A
- **UVB.** Ultravioleta tipo B
- **UVC.** Ultravioleta tipo C
- **UTC.** Tiempo universal coordinado
- **WOUDC.** World Ozone Ultraviolet Data Centre

Variables y parámetros estadísticos

- AIC . Estadístico de Akaike
- AOD . Espesor óptico de aerosoles
- d . Estadístico de Durbin-Watson
- E . Irradiancia solar global
- E_{UV} . Irradiancia UV eritemática
- E^{TOA} . Irradiancia solar global extraterrestre
- E_{UV}^{TOA} . Irradiancia UV eritemática extraterrestre
- E_{λ} . Irradiancia solar espectral global
- $E_{B\lambda}$. Irradiancia solar espectral directa
- $E_{D\lambda}$. Irradiancia solar espectral difusa
- F . Estadístico de Snedecor
- K_t . Índice de claridad
- m_r . Masa óptica relativa
- $MABE$. Media de las diferencias relativas en valor absoluto
- MBE . Media de las diferencias relativas
- $[O_3]$. Cantidad total de ozono
- R^2 . Coeficiente de determinación
- $RMSE$. Raíz cuadrada de la media de los residuos al cuadrado
- SE . Error estándar

- *SSE*. Suma de los residuos al cuadrado
- *t*. Estadístico de Student
- *T_{UV}*. Transmisividad ultravioleta eritemática
- *UVI*. Índice ultravioleta
- *VIF*. Factor de incremento de varianza
- θ . Ángulo cenital solar
- τ_λ . Transmisividad espectral

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo se presenta el marco en que se desarrolla este trabajo de investigación, los antecedentes bibliográficos más interesantes y los objetivos planteados. Además, se muestra brevemente la estructura de esta memoria.

1.1. Marco de trabajo y antecedentes bibliográficos

La radiación electromagnética que llega a la Tierra procede principalmente del Sol y abarca un amplio rango de longitudes de onda. El espectro solar se divide en varios intervalos espectrales en los que la radiación tiene similares características: rayos γ , rayos X, radiación ultravioleta (UV), radiación visible y radiación infrarroja. Este trabajo se centra en el estudio de la radiación solar UV, la cual ejerce una notable influencia tanto sobre la atmósfera terrestre como sobre los seres vivos.

La radiación UV que llega a la Tierra interacciona con la atmósfera. Así, una parte es absorbida en las capas altas provocando la disociación del oxígeno molecular y generando temperaturas elevadas. En su recorrido dentro de la atmósfera, la radiación UV interacciona también con los constituyentes atmosféricos que se encuentran en la estratosfera condicionando la formación y variabilidad del ozono, gas necesario para la existencia de vida en nuestro planeta. Finalmente, parte de esta radiación alcanza la superficie terrestre participando de forma importante en el balance energético terrestre, los procesos biológicos (la fotosíntesis), ecológicos (modificación de ecosistemas) y fotoquímicos (formación y descomposición de contaminantes).

En cuanto a los efectos sobre el ser humano, la radiación solar UV tiene efectos tanto positivos como negativos sobre la salud. Así, esta radiación es imprescindible para que nuestro cuerpo realice la síntesis de la vitamina D (Webb and Holick, 1988). Sin embargo, la sobreexposición a la radiación UV tiene efectos muy perjudiciales para la especie humana (Diffey, 1991; Madronich, 1993). En este sentido, la exposi-

ción de la piel a esta radiación durante un corto periodo de tiempo puede provocar desde efectos transitorios, como el característico bronceado, hasta agudos, como la quemadura solar. Además, la acumulación de radiación UV a lo largo del tiempo puede inducir efectos crónicos, como el envejecimiento prematuro y el cáncer de piel. La radiación UV puede afectar también a la vista, produciendo distintas enfermedades como fotoqueratitis, cataratas y degeneración en la mácula. Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS-WHO), el 20 % del total de casos de cataratas que se producen anualmente se podrían atribuir a efectos de la radiación UV (WHO, 1995).

En las últimas décadas la cantidad de radiación solar UV medida en la superficie terrestre está aumentando considerablemente debido, principalmente, al alarmante descenso en la cantidad de ozono (Madronich et al., 1998; WMO, 1999). Este hecho podría suponer una de las principales causas del incremento de los efectos perjudiciales mencionados en el párrafo anterior. Por ejemplo, el número de casos de melanoma (cáncer de piel con la tasa de mortalidad más elevada) ha aumentado un 3 % por año desde 1981 (ACS, 2004). Por todo ello, existe un gran interés en cuantificar de forma precisa la radiación UV que alcanza la superficie terrestre e informar a la población sobre el riesgo que conlleva la exposición a esta radiación. En este sentido, desde distintas organizaciones científicas se promueve la formación de redes de medida de radiación solar UV de ámbito internacional, nacional y regional, para evaluar de forma precisa las fluctuaciones de esta radiación.

En el ámbito nacional, el Instituto Nacional de Meteorología (INM) ha puesto en marcha un proyecto para medir la radiación solar UV. Para ello ha creado la red nacional de medida de radiación UV, formada en la actualidad por 20 observatorios (uno de ellos en Badajoz). Como medida complementaria para dar respuesta a la necesidad de una adecuada caracterización regional de la radiación UV, el grupo de investigación AIRE (**A**tmósfera, **c**lima y **R**adiación en **E**xtremadura) perteneciente a la Universidad de Extremadura (UEX), ha creado la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura. Esta red, formada actualmente por tres estaciones de medida, cuenta con piranómetros para la medida de la radiación solar UV y la radiación solar global.

Los piranómetros UV, también conocidos como radiómetros UV de banda ancha, han sido reconocidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM-WMO) como uno de los instrumentos más apropiados para la medida de la radiación solar UV en superficie (WMO, 1998). El registro preciso de los valores radiativos requiere una adecuada calibración de estos instrumentos de medida. En este sentido, una de las aportaciones realizadas en este trabajo va encaminada a la adecuada calibración de dichos instrumentos.

El proceso de calibración de los piranómetros UV consiste en obtener los factores de conversión, llamados también de calibración, a través de los cuales se transforma el potencial eléctrico de salida de los instrumentos en magnitudes radiométricas (en

1.1. MARCO DE TRABAJO Y ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

nuestro caso, irradiancias). Una calibración imprecisa de los piranómetros UV conlleva un elevado error en las medidas radiativas registradas en superficie. Por ejemplo, se han observado diferencias de hasta un 30 % al comparar medidas de instrumentos procedentes del mismo fabricante (Xu and Huang, 2000). Además, varios estudios (Bodhaine et al., 1998; Leszczynsky et al., 1998; Oppenrieder et al., 2003) han mostrado importantes diferencias entre los factores de calibración de los radiómetros UV de banda ancha proporcionados por los fabricantes y los obtenidos experimentalmente en campañas de calibración. El envejecimiento de los piranómetros UV puede implicar cambios en la respuesta de dichos instrumentos. Por tanto, para intentar corregir estas variaciones, la calibración precisa de los radiómetros UV de banda ancha debe realizarse, al menos, cada dos años según las recomendaciones de la OMM (WMO, 1996).

Una vez que los piranómetros UV se encuentran perfectamente calibrados es posible realizar medidas experimentales precisas, y con ellas estudiar la magnitud de la radiación solar UV y su variabilidad temporal en localizaciones concretas. Además de estas medidas locales, es necesario emplear modelos de estimación para obtener valores radiativos en zonas donde no existe instrumentación alguna ya que, como se ha comentado anteriormente, el número de estaciones dedicadas al registro continuo de la radiación UV en superficie es muy escaso. Por tanto, los métodos de estimación se convierten en herramientas fundamentales para la evaluación de la radiación solar UV que alcanza la superficie terrestre. Entre esos métodos están, por una parte, los *modelos físicos*, basados en leyes físicas las cuales describen los procesos de interacción entre la radiación solar UV y los constituyentes atmosféricos. Por otra parte, los modelos empíricos se construyen mediante ajustes de expresiones matemáticas entre valores de radiación UV y datos de diversas variables meteorológicas. Estos modelos, a diferencia de los físicos, no utilizan ningún tipo de ley física en su formulación.

Los modelos físicos requieren información de la que no se dispone habitualmente en las estaciones de medida debido a la complejidad de los fenómenos que rigen la física atmosférica. En cambio, el uso de modelos empíricos se encuentra más extendido debido a su mayor operatividad. Así, el objetivo específico de este trabajo de investigación es la propuesta de modelos empíricos de estimación de la radiación solar UV. Estos modelos se construyen mediante expresiones matemáticas que relacionan las variaciones de radiación UV (variable dependiente) con los cambios asociados a distintas variables moduladoras (variables independientes). Los coeficientes de estos modelos se obtienen mediante ajustes de regresión utilizando técnicas estadísticas. Las variables independientes empleadas en los modelos empíricos caracterizan los factores que modulan la radiación solar UV que atraviesa la atmósfera. En este sentido, los principales factores que intervienen en la variabilidad de la radiación solar registrada en la superficie terrestre son la altura solar, la nubosidad y el ozono estratosférico. La atenuación por aerosoles, aunque en menor medida, también tiene un efecto notable en la modulación de la radiación UV.

Debido a que los factores moduladores mencionados actúan conjuntamente, los primeros modelos empíricos propuestos se obtuvieron con valores radiativos tomados en condiciones atmosféricas muy concretas, como casos despejados y valores fijos de altura solar (McKenzie et al., 1991; Madronich, 1992; Bais et al., 1993). Estudios más recientes (Diaz et al., 2000; Fioletov et al., 2001; de La Casinière et al., 2002) incluyen casos con distinto grado de cobertura nubosa y diferentes valores de altura solar. Estos trabajos muestran cómo los valores de radiación UV pueden ser estimados a partir de la elevación solar y de medidas directas o estimaciones satelitales de ozono, radiación solar global y otras variables meteorológicas.

Inicialmente, los modelos empíricos se emplearon para la predicción del Índice UV (*UVI*) (Burrows et al., 1994) y la obtención de valores de ozono a partir de medidas de radiación UV (Fioletov et al., 1997). En la actualidad, está muy extendido el empleo de estos modelos para cuantificar la dependencia de la radiación UV respecto a los principales factores que influyen en su atenuación, como son el ozono (Chubarova and Nezval, 2000; Michelletti et al., 2003) y la nubosidad (Cañada et al., 2000; Murillo et al., 2003). Además, uno de los usos más importantes de los modelos estadísticos es la estimación de valores de radiación UV para lugares y periodos de tiempo donde no existen medidas locales. Esto es posible siempre que se disponga de medidas o estimaciones de las principales variables moduladoras. Por ejemplo, Fioletov et al. (2002) y Gantner et al. (2000) han realizado, mediante modelos empíricos, la reconstrucción de series de datos históricos de radiación UV desde la década de los años 60 hasta la actualidad en Toronto (Canadá) y Hohenpeinssenberg (Alemania), respectivamente.

La gran variedad de expresiones empíricas existentes refleja la complejidad de los fenómenos de interacción entre la radiación UV y los principales factores que la modulan. Este hecho provoca que sean muy escasos los estudios que analizan conjuntamente la dependencia debida a varios de dichos factores. Además, en general, las expresiones empíricas tienen validez local. Esto se debe, principalmente, al marcado carácter local que presenta la nubosidad, así como a otros factores secundarios como son el ozono troposférico y la concentración de aerosoles. Por tanto, resulta de gran interés la obtención de modelos empíricos que caractericen distintos entornos de la región extremeña.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es la estimación de la radiación solar UV en Extremadura mediante el empleo de modelos empíricos. Este objetivo general se concreta en los siguientes objetivos específicos:

- Conseguir series de alta frecuencia de irradiancia solar UV de calidad contrastada en las estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.
- Disponer de un eficiente procedimiento de calibración de los radiómetros UV que garantice la bondad de las medidas radiativas.
- Proponer un modelo empírico que integre la influencia de los factores moduladores de la radiación UV a partir de variables que caractericen dichos factores de modulación.

Otros objetivos secundarios planteados en esta investigación son:

- La predicción del índice UV como herramienta eficaz de información a la población sobre los riesgos de la exposición a la radiación solar UV.
- El relleno de lagunas de datos existentes en las series de medida de irradiancia solar UV en Extremadura.
- La estimación de posibles valores máximos de irradiancia solar UV de los últimos 30 años en los tres emplazamientos de estudio.

1.3. Estructura de la memoria

La memoria de esta tesis doctoral consta de nueve capítulos, tres anexos y una sección con la bibliografía utilizada.

Este *primer capítulo* sirve de introducción, definiendo el marco de trabajo, los antecedentes bibliográficos, los objetivos y la estructura de la memoria.

En el *capítulo segundo* se analizan las características de la radiación UV y los procesos de atenuación que experimenta al atravesar la atmósfera terrestre. Además, se estudian los principales factores atmosféricos que modulan los valores de radiación UV registrados en superficie. Finalmente se presentan los principales métodos utilizados para medir y estimar la radiación UV.

En el *capítulo tercero* se especifica la instrumentación utilizada en la obtención de los datos que se han procesado a lo largo de esta tesis doctoral. Así, se describen las características técnicas y de funcionamiento de los equipos de medida de radiación (espectrorradiómetro Brewer, piranómetros de radiación solar global y ultravioleta),

de almacenamiento de datos (sistemas de adquisición), y de estimación de la cantidad de ozono (instrumento satelital TOMS).

El *capítulo cuarto* describe la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura, detallando los emplazamientos donde se ubican las estaciones de medida de Badajoz, Cáceres y Plasencia. Además, se especifica las características principales que presenta el conjunto de estaciones. Finalmente, se explica el proceso de medida mediante el cual se obtienen los valores de radiación solar global y ultravioleta utilizados en este trabajo.

En el *capítulo quinto* se aborda uno de los principales asuntos investigados en esta tesis: la calibración de los radiómetros UV de banda ancha. Para ello, inicialmente, se presenta un método que corrige el error coseno del espectrorradiómetro Brewer. Este error es la principal fuente de incertidumbre asociada a dicho espectrorradiómetro, equipo empleado como instrumento de referencia en la calibración de los instrumentos UV de banda ancha. Posteriormente, se describen los métodos de calibración existentes en bibliografía a partir de los cuales se obtienen los factores de conversión de los radiómetros UV de banda ancha que constituyen la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura. Además, se analiza un nuevo modelo con el objetivo de mejorar la calibración de dichos instrumentos. Finalmente, todos los modelos presentados se comparan con el fin de seleccionar el método de calibración más adecuado.

En el *capítulo sexto* se analizan las cuatro variables utilizadas en los distintos modelos empíricos propuestos en la tesis. Por una parte, la radiación UV vendrá caracterizada por la transmisividad UV calculada mediante las medidas proporcionadas por los radiómetros UV de banda ancha. Por otra parte, los factores moduladores de la radiación UV considerados en este trabajo (nubes, aerosoles, ozono y altura solar) vendrán descritos por tres variables independientes: el índice de claridad, la cantidad total de ozono y por la masa óptica relativa del aire.

El *capítulo séptimo* aborda el principal objetivo de esta tesis: la obtención de una expresión empírica para la estimación de valores de radiación UV. Inicialmente, se muestra la complejidad del problema físico existente. Para ello, se explica detalladamente las expresiones físicas que rigen la cantidad de radiación UV recibida por la superficie terrestre. Posteriormente, se proponen modelos empíricos que relacionen por separado la radiación UV con tres de los principales factores que la modulan. Así, se explica la metodología seguida en la obtención de la forma funcional de cada una de estas tres expresiones por separado. Después, se detallan las etapas desarrolladas para la obtención del modelo completo que englobe las dependencias seleccionadas. Además, se realiza un exhaustivo estudio sobre la bondad del modelo empírico completo planteado, exponiendo los resultados de la validación de dicho modelo.

En el *capítulo octavo* se explican algunas posibles aplicaciones del modelo empírico propuesto en este estudio. Por una parte, se analiza el empleo del modelo empírico seleccionado para la estimación y predicción del *UVI*. Por otra parte, se presenta

la estimación de valores de radiación UV correspondientes a periodos en los que los instrumentos de medida no se encontraban en funcionamiento

Finalmente, en el *capítulo noveno* se resumen los principales resultados y conclusiones obtenidos en esta tesis.

Capítulo 2

La radiación ultravioleta

2.1. Introducción

En general, se define *radiación electromagnética* como un modo de propagación de energía por ondas electromagnéticas, en un amplio intervalo de longitudes de onda. El espectro electromagnético está formado por el conjunto de radiaciones monocromáticas que componen la radiación electromagnética (figura 2.1).

La radiación que llega al tope de la atmósfera procedente del Sol se denomina radiación solar extraterrestre. En ausencia de atmósfera, esta radiación alcanzaría en su totalidad la superficie terrestre. Sin embargo, la presencia de dicha atmósfera atenúa y modifica la radiación que la atraviesa mediante procesos combinados de dispersión y absorción. La dispersión es un proceso no selectivo con la longitud de onda, es decir, que afecta a todas las longitudes de onda del intervalo de interés. Los constituyentes atmosféricos responsables de esta dispersión son los aerosoles, las gotas de agua, los cristales de hielo y las moléculas gaseosas. Por otra parte, la absorción de la radiación sí es selectiva y se debe, principalmente, a los componentes gaseosos atmosféricos, las nubes y los aerosoles. La combinación de estos dos procesos tiene como efecto principal que la radiación solar incidente en la superficie terrestre es, en general, considerablemente inferior a la radiación solar extraterrestre.

En este capítulo, se comienza describiendo las principales características de la radiación UV, las cuales dependen del rango espectral considerado. A continuación, se detalla el modo en que los procesos de dispersión y absorción afectan a este tipo de radiación. Posteriormente, se analizan los principales componentes atmosféricos y los factores geométricos que modulan la radiación UV que alcanza la superficie terrestre. Finalmente, se introducen los distintos métodos de medida y estimación de dicha radiación.

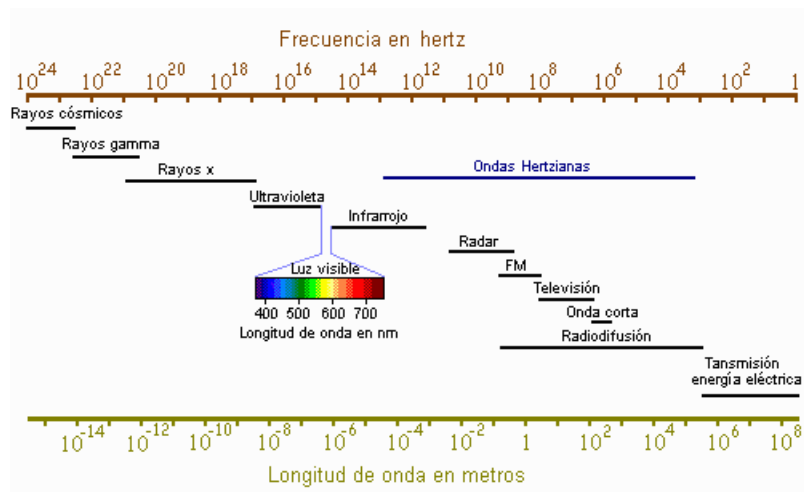


Figura 2.1: Espectro electromagnético

2.2. Características

La radiación solar UV engloba las longitudes de onda comprendidas entre 100 y 400 nm del espectro solar electromagnético. En la figura 2.2 se representa la variable irradiancia espectral solar extraterrestre en función de la longitud de onda. Se observa que la radiación UV (zona sombreada) constituye una pequeña parte (alrededor del 8%) de la radiación solar extraterrestre. Sin embargo, la radiación solar UV es de primordial interés debido a su interacción, en primer lugar, con la atmósfera y, posteriormente, con los seres vivos. En la atmósfera, la radiación UV es un elemento esencial en los procesos de formación/destrucción de ozono y en las variaciones termodinámicas que experimenta la atmósfera en sus distintas capas. Todo ello, provoca que la radiación UV más energética (entre 100 y 290 nm) sea absorbida en su totalidad al atravesar la atmósfera debido, principalmente, a la acción conjunta del oxígeno molecular y del ozono. Por otra parte, la radiación UV que consigue alcanzar la superficie terrestre tiene efectos muy perjudiciales sobre los seres vivos.

En función de los efectos biológicos producidos por la radiación UV se distinguen tres zonas en el espectro ultravioleta:

- **Ultravioleta C (UVC):** comprende las longitudes de onda desde los 100 nm a los 290 nm. Esta radiación, altamente nociva para los seres vivos, no alcanza la superficie terrestre debido a que entre 100 y 250 nm es absorbida principalmente por el oxígeno molecular en la alta atmósfera (termosfera), y entre 250 nm y 290 nm por el ozono en la estratosfera. En la figura 2.3 se muestra la transmisividad de la radiación UV producida por la acción de varios constituyentes atmosféricos. Se comprueba en dicha figura el efecto atenuante del ozono

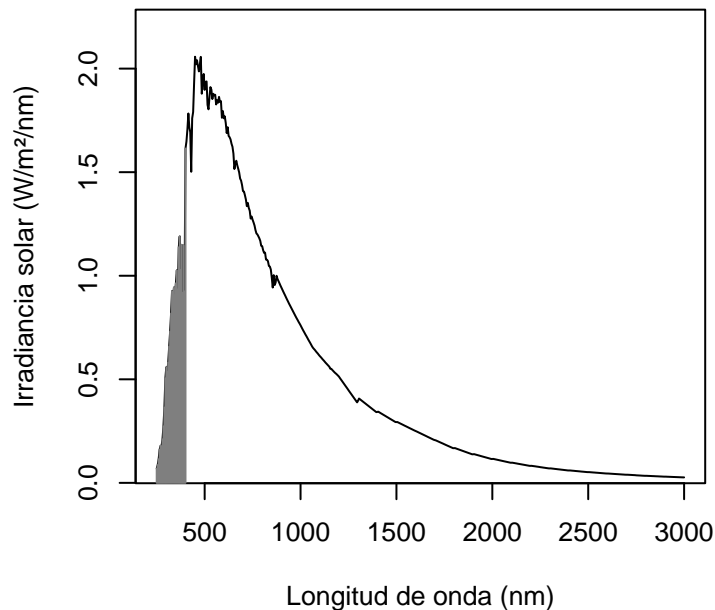


Figura 2.2: Irradiancia espectral solar extraterrestre. Se muestra en gris la parte correspondiente a la radiación solar UV.

en la región UVC.

- **Ultravioleta B (UVB)**: comprende la zona del espectro electromagnético entre 290 y 320 nm. La mayor parte de esta radiación es absorbida por el ozono estratosférico (banda de absorción de Hartley). Sin embargo, un porcentaje no despreciable (10% aproximadamente) alcanza la superficie terrestre (figura 2.3). Esta radiación de baja longitud de onda y, por tanto, muy energética, interaccionará con los organismos vivos pudiendo provocar importantes lesiones.
- **Ultravioleta A (UVA)**: engloba la radiación UV con longitud de onda entre los 320 nm y los 400 nm. En la figura 2.3 se muestra como la absorción de radiación UV debida al ozono decrece rápidamente con la longitud de onda hasta los 350 nm (banda de absorción de Huggings) para mantenerse prácticamente constante hasta los 400 nm. Así, la radiación UVA representa alrededor del 90% de la radiación UV total que recibe la superficie terrestre. Sin embargo, debido a que la intensidad radiativa decrece al aumentar la longitud de onda, los efectos que este tipo de radiación produce sobre los seres vivos son, proporcionalmente,

menos perjudiciales que los generados por la radiación UVB.

2.3. Procesos de atenuación

Como se ha comentado en las secciones anteriores, parte de la radiación solar extraterrestre sufre complejos procesos de atenuación al atravesar la atmósfera, lo que provoca una disminución en la cantidad de radiación solar incidente en la superficie terrestre. La radiación solar que proviene de la dirección en que se encuentra el Sol se denomina *radiación solar directa*. A diferencia de esta, la radiación solar procedente de direcciones distintas a la dirección del Sol se la llama *radiación solar difusa*. La suma de las componentes, difusa y directa, dará lugar a la *radiación solar global*, siendo ésta la registrada por los instrumentos de medida empleados en esta tesis.

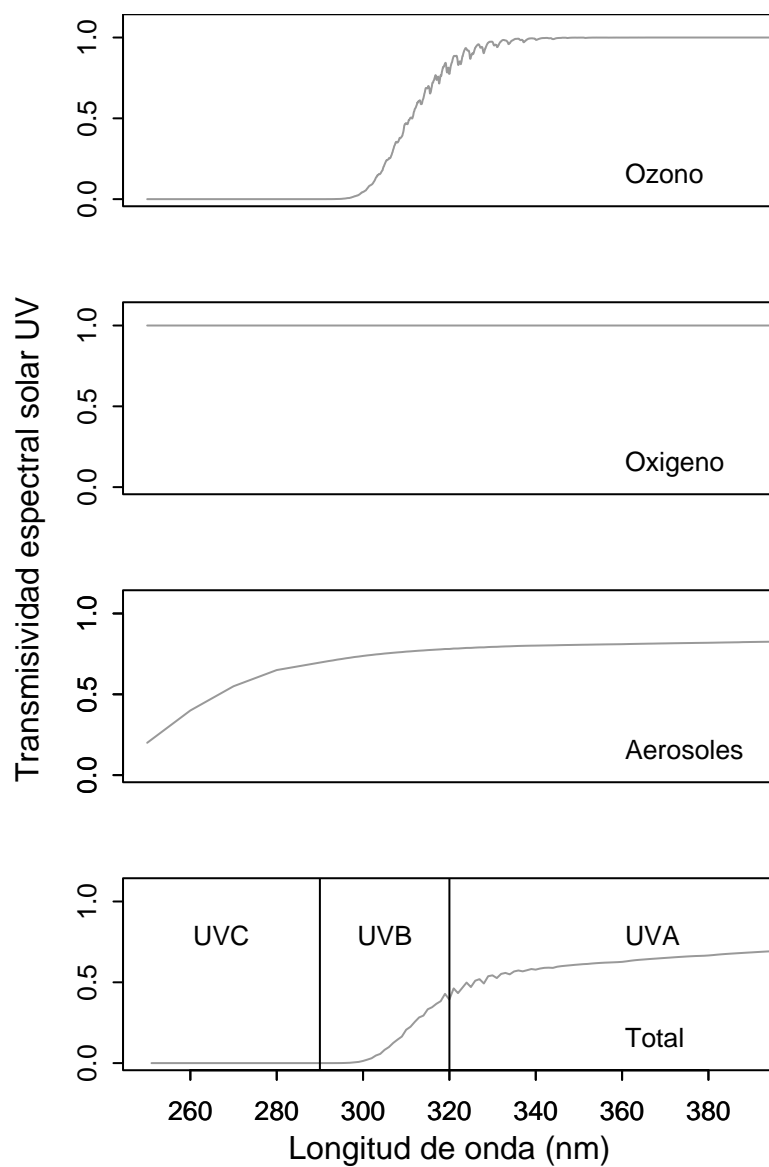


Figura 2.3: Transmisividad espectral de la atmósfera a la radiación solar. Transmisividad atmosférica total y las parciales debidas al ozono, oxígeno y aerosoles.

Los principales procesos que atenúan la radiación solar en la atmósfera son:

■ Absorción

Este proceso ocurre cuando la radiación solar incide sobre los componentes atmosféricos, siendo absorbida lo que produce un incremento en la energía de estos componentes. Los principales absorbentes de la radiación solar UV son ciertas moléculas gaseosas (principalmente oxígeno y ozono), gotas de agua, los cristales de hielo y los aerosoles. La absorción de la radiación UVC por parte del oxígeno molecular representa la principal fuente energética de la termosfera. Además, la mayor parte de la radiación UVB es absorbida en la estratosfera por el ozono, alcanzando solamente un pequeño porcentaje la superficie terrestre. Por tanto, la radiación solar UV que incide en superficie está compuesta principalmente (alrededor del 90 %) por radiación UVA.

La absorción de la radiación solar debida a los gases atmosféricos es un proceso selectivo, es decir, cada compuesto gaseoso varía su comportamiento en función de la longitud de onda de dicha radiación. Así, como se ha comentado anteriormente, la absorción de radiación UV se debe, principalmente, a moléculas de oxígeno y ozono.

■ Scattering

El fenómeno de scattering se define como el proceso de atenuación que tiene lugar cuando los constituyentes que forman la atmósfera dispersan la radiación que la atraviesa variando su dirección de propagación inicial. Según la relación entre el tamaño de la longitud de onda de la radiación incidente y las partículas del medio, es posible dividir el fenómeno de scattering en tres regímenes:

- *Scattering Rayleigh*, tiene lugar cuando la longitud de onda de la radiación incidente es mucho mayor que el tamaño de las partículas difusoras. En este caso, el grado de dispersión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Así, radiaciones de longitudes de onda corta sufrirán mayor dispersión que las radiaciones de onda larga. De este modo, la radiación UV incidente en superficie está compuesta, prácticamente al 50 %, por la suma de radiación UV directa y difusa, dependiendo este porcentaje de las condiciones atmosféricas (Parisi et al., 2000).
- *Scattering Mie*, ocurre cuando las partículas difusoras son del mismo orden de tamaño que la longitud de onda de la radiación incidente. Este régimen de dispersión normalmente se produce en las capas bajas de la atmósfera, debido a la naturaleza de las partículas que lo originan: gotas de agua, partículas de polvo, humo, etc. La dispersión Mie presenta una dependencia compleja con relación al tamaño de la partícula dispersora y a la longitud de onda de la radiación incidente.

- *Óptica geométrica*, sucede cuando la longitud de onda de la radiación solar incidente es mucho menor que el tamaño de los obstáculos que se encuentra en su propagación. Este regimen de dispersión no depende de la longitud de onda de la radiación incidente, estando gobernado por dos leyes generales: las leyes de Reflexión y Refracción de la Luz. La óptica geométrica utiliza la aproximación de rayo luminoso, permitiendo así despreciar los efectos derivados del fenómeno de difracción.

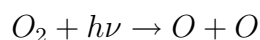
2.4. Factores moduladores

La radiación UV que alcanza la superficie terrestre depende de la composición de la atmósfera en cada instante. Los principales factores que actúan sobre esta radiación son:

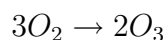
■ Ozono

Este gas se encuentra principalmente entre los 12 y 35 kilómetros de altitud, en la estratosfera terrestre, donde se forma y destruye mediante distintas reacciones fotoquímicas. Estas reacciones vienen descritas por el conocido como ciclo de Chapman (Velazquez, 2001)

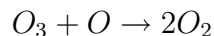
El ozono se produce como consecuencia de la disociación del oxígeno molecular por la acción de la radiación solar UV de longitud inferior a 242 nm. El oxígeno atómico generado en la reacción anterior se recombina con oxígeno molecular en presencia de una molécula de oxígeno o nitrógeno (M). Esta tercera molécula es necesaria para disipar la energía liberada en la reacción.



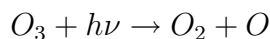
En resumen:



Simultáneamente a la formación, el ozono se destruye por dos mecanismos básicos. Por un lado, reacciona con el propio oxígeno atómico para recuperar la base estable:



Por otra parte, el ozono puede ser fotodisociado por la radiación UV de longitud de onda entre 200 y 340 nm:



La concentración de este gas varía temporal y espacialmente, representando como máximo el 0,0012 % del total de constituyentes que componen la atmósfera (Iqbal, 1983). En la Península Ibérica, la máxima concentración de este gas se encuentra entre los 22 y los 24 km de altura, dependiendo de la época del año (Gomez and Camacho, 2004). Como ejemplo, en la figura 2.4 se presenta, para Madrid, el perfil promedio de ozono en Unidades Dobson (UD) correspondiente al periodo 1995-2004 para los meses donde se alcanzan los valores máximos (abril) y mínimos (noviembre). Cada Unidad Dobson equivale a un espesor de 0,01 milímetros (mm) en condiciones normales de presión y temperatura. Por tanto, el grosor de la capa de ozono sería, en término medio, de 3 mm (300 UD).

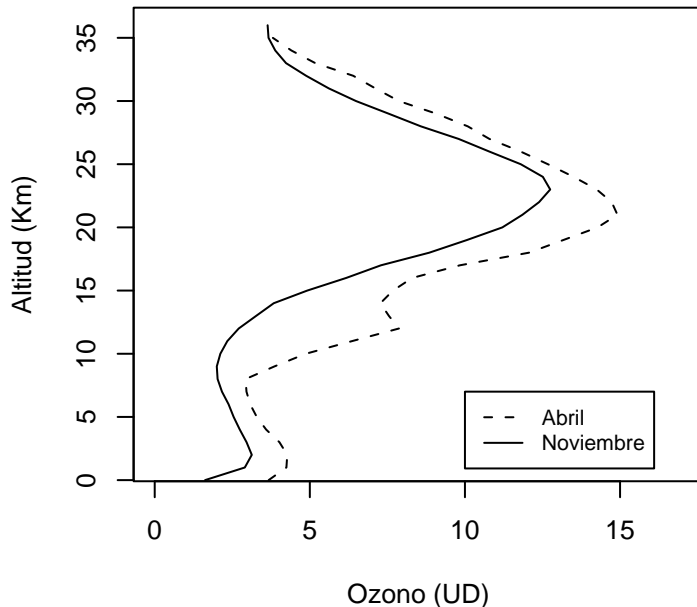


Figura 2.4: Perfil promedio de ozono para Madrid correspondiente al periodo 1995-2004 para los meses de abril y noviembre.

A pesar de la insignificante proporción que representa la cantidad de ozono en la atmósfera, juega un papel vital en la existencia de vida en nuestro planeta. Así, la radiación UV incidente en la superficie terrestre depende, en gran medida, de la cantidad total de ozono que presente la atmósfera. La mayor parte de la radiación UVB es absorbida por este gas, siendo, por tanto, el principal

modulador de la radiación UV en superficie.

Uno de los problemas ambientales más importantes detectados en las últimas décadas ha sido la alarmante disminución de la cantidad total de ozono. Así, durante las últimas dos décadas se ha observado un descenso continuo en la cantidad de este gas de aproximadamente el 3 % cada 10 años (WMO, 2003b). Este hecho es atribuible a la acción de diversos compuestos halogenados procedentes de los clorofluorocarbonos (CFCs), emitidos a la atmósfera por la actividad humana. Una de las principales consecuencias de la disminución del ozono ha sido el notable incremento en la cantidad de radiación UV incidente en la superficie terrestre (Madronich et al., 1998). Por todo ello, existe un gran interés a escala internacional en la vigilancia de los valores de ozono existente en la atmósfera terrestre.

Además, ciertas zonas urbanas e industrializadas experimentan un aumento considerable en la concentración de ozono troposférico (en las capas cercanas al suelo), debido a reacciones fotoquímicas con óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. Estudios realizados en regiones industrializadas del Hemisferio Norte estiman que el descenso en los valores de radiación UV medidos en superficie, debido al incremento de la cantidad de ozono troposférico, se sitúa entre un 3 % y un 15 % (Madronich et al., 1998).

■ Aerosoles

Los aerosoles atmosféricos son partículas y moléculas en estado sólido o líquido, que se encuentran en suspensión en la atmósfera. Estas partículas interactúan con la radiación que atraviesa la atmósfera mediante procesos de dispersión y absorción. Por su localización en la atmósfera, se dividen en aerosoles *troposféricos* y *estratosféricos*. Además, se clasifican por su origen en aerosoles *naturales* (volcánicos, desérticos, marinos, etc) y *antropogénicos* (asociados principalmente a procesos de combustión).

Los aerosoles troposféricos se encuentran principalmente en las zonas más bajas de la atmósfera (capa límite). La atenuación que experimenta la radiación UV debido a este tipo de aerosoles está estrechamente relacionada con su tamaño y composición. Madronich et al. (1998) estiman que los aerosoles troposféricos atenúan la radiación UVB entre un 5 % y un 18 % en varios emplazamientos localizados en regiones industrializadas del Hemisferio Norte.

La densidad de aerosoles en la estratosfera, por término medio, es mil veces inferior a la densidad de aerosoles en la troposfera. Este hecho se debe a que las fuentes de aerosoles se encuentran, en su gran mayoría, cerca de la superficie terrestre. Además, la barrera térmica que forma la tropopausa impide la ascensión de aerosoles más allá de la troposfera. Así, diferentes estudios sugieren que

la incidencia de los aerosoles estratosféricos en la radiación UV es despreciable (Brogniez et al., 1999).

■ **Nubosidad**

Las nubes atenúan la radiación UV mediante procesos combinados de dispersión y de absorción. La nubosidad tiene un efecto uniforme sobre el rango espectral UV, es decir, no ejerce una importante variación en su distribución espectral. En general, cuando existe nubosidad se registran valores de radiación UV inferiores a los medidos cuando el cielo está despejado (Alados-Arboledas et al., 2003). Sin embargo, bajo ciertas condiciones muy concretas y durante cortos períodos de tiempo, una determinada situación nubosa puede provocar fenómenos de multirreflexión, registrándose valores de irradiancia UV superiores a los que se medirían en una situación de cielo completamente despejado (Estupiñan et al., 1996). La atenuación de la radiación UV debida a la nubosidad depende del espesor y del tipo de nubes, del tamaño de las gotas que las forman y de la altura a la que se encuentran.

Las notables variaciones que puede experimentar la cubierta nubosa en distintos períodos (horario, diario, anual, etc.) ejercen una influencia determinante en las fluctuaciones diarias de la radiación UV registrada en la superficie terrestre (Serrano et al., 2006).

Existen otros factores que afectan a la radiación UV que alcanza la superficie. Entre ellos destacamos:

■ **Albedo superficial**

Se define como el cociente entre la radiación solar reflejada por una superficie determinada y la radiación que incide sobre dicha superficie. La influencia de este factor en la radiación UV depende, en gran medida, de las propiedades físicas de la superficie que recibe la radiación solar. Así, la mayor parte de las superficies naturales tales como hierba, tierra y agua, reflejan menos del 10 % de la radiación UV incidente. Sin embargo otras como, por ejemplo, la nieve fresca puede reflejar gran parte de la radiación UV incidente. Así, en situaciones de cielo despejado, la radiación solar UV reflejada por la nieve contribuye de forma importante a la radiación difusa, pudiendo incrementar la radiación UV medida en la superficie hasta en un 25 %, debido a fenómenos de multirreflexión entre la superficie terrestre y la atmósfera. Este porcentaje puede llegar al 80 % en días totalmente cubiertos (Renaud et al., 2000). La arena también puede reflejar hasta un 25 % la radiación UV e incrementar, al igual que hace la nieve, la dosis de radiación UV recibida en superficie.

■ **Altura solar**

La altura solar se define como el ángulo formado por el plano del horizonte y la dirección al Sol. Este factor ejerce un doble efecto modulador sobre la radiación solar que llega a la superficie terrestre:

- Por una parte, el efecto geométrico descrito por la Ley de Lambert, también conocida como Ley del Coseno. Esta ley establece que la irradiancia medida en una superficie horizontal es igual a la irradiancia de incidencia normal multiplicada por el coseno del ángulo que forman la dirección de propagación con la dirección normal a la superficie. Esto es, muestra las variaciones de la radiación solar producidas por la inclinación de los rayos solares.
- Por otra parte, la variación de la altura solar produce cambios sustanciales en el espesor de atmósfera que recorre la radiación solar desde que incide en el tope de dicha atmósfera hasta que alcanza la superficie terrestre. Por tanto, la altura solar es responsable de que la radiación solar atraviese una determinada cantidad de componentes atmosféricos. Por ejemplo, para alturas solares elevadas, la radiación solar UV es más intensa debido a que ésta recorre un camino más corto a través de la atmósfera y, por tanto, atraviesa una cantidad menor de absorbentes.

La cantidad de radiación UV recibida por una superficie debida a estos dos efectos combinados varía con la latitud, con las estaciones del año y con la hora del día. Así, la radiación UV es más alta en los trópicos, en verano y al mediodía. Además, en situaciones de cielo despejado, la variación de la altura solar es el responsable fundamental de la evolución diaria que presenta la radiación UV debida al ciclo diario solar.

■ **Altitud**

La intensidad de la radiación UV aumenta con la altitud sobre el nivel medio del mar debido a dos efectos. Por una parte, a mayor altitud es menor el espesor de atmósfera que recorre la radiación. Y, por otra parte, a mayor altitud la radiación UV será atenuada por una menor cantidad de componentes atmosféricos debido a la importante disminución de la densidad atmosférica con la altura. Diferentes trabajos muestran que la irradiancia UV incrementa su valor entre un 6 a un 8% por cada 1000 metros de aumento en altitud (Blumthaler et al., 1997).

2.5. Medida y estimación de la radiación UV

La evaluación de la radiación solar UV que llega a la superficie terrestre puede realizarse, principalmente, de tres formas:

1. *Medidas experimentales.* La utilización de medidas en superficie permite estudiar con detalle la intensidad de la radiación UV y su variabilidad temporal en localizaciones determinadas. Para ello, debemos disponer de instrumentos de medida adecuados al objetivo de estudio. La limitación que tiene el análisis de la radiación UV mediante instrumentos de superficie está, por una parte, en el escaso número de equipos disponibles, provocando una reducida cobertura espacial de la radiación UV que alcanza la superficie terrestre. Por otra parte, la amplia variedad de equipos existentes en el mercado, dificulta la comparación de las medidas registradas por dichos instrumentos (Leszczynsky et al., 1998). Los instrumentos comúnmente utilizados, clasificados según su resolución espectral, son:

- Espectrorradiómetros, que proporcionan valores espectrales de irradiancia UV en la totalidad del espectro UVA y UVB. El componente básico de estos instrumentos es el monocromador, el cual está formado por dos objetivos y un elemento dispersivo.
- Radiómetros multicanal, los cuales aportan valores de irradiancia UV en varias franjas del espectro UVA y UVB de reducida amplitud.
- Radiómetros de banda ancha o piranómetros, los cuales proporcionan valores de irradiancia UV integrados en un amplio intervalo de longitudes de onda. Es decir, estos instrumentos no tienen resolución espectral.

2. *Estimaciones mediante modelos.* Utilizando para ello modelos de estimación para lugares y periodos de tiempo en los que no se dispone de datos experimentales. Por tanto, debido a la escasez de equipos operativos de medida, los métodos de estimación son instrumentos esenciales para el estudio de la variabilidad espacial de la radiación UV incidente. Los dos principales tipos de modelos son:

- Modelos físicos, que mediante la aplicación de leyes físicas explican los distintos procesos de interacción de la radiación solar UV con la atmósfera. La precisión de los valores radiativos proporcionados por los modelos físicos depende principalmente de información introducida en dichos modelos (*alimentación* de los modelos). Así, debido a la complejidad de los fenómenos atmosféricos, los modelos físicos necesitan abundante información sobre distintas variables atmosféricas.
- Modelos empíricos, basados en el ajuste a expresiones matemáticas, las cuales representan la respuesta de la radiación UV (variable dependiente) a variaciones en los principales factores moduladores de dicha radiación (variables independientes). A pesar de que las expresiones que constituyen estos modelos son menos complejas que la de los modelos físicos, los

métodos de estimación empíricos resultan muy útiles para predecir el comportamiento de la radiación UV en superficie.

3. *Observaciones satelitales.* Las estimaciones de radiación UV que realizan los instrumentos de teledetección a bordo de satélites se basan en la medida del espectro de la radiación solar UV dispersada por la atmósfera hacia el espacio y, además, en la utilización de alguno de los modelos físicos existentes. La estimación satelital de la radiación UV permite complementar las medidas de superficie proporcionando cobertura global. Además, las observaciones desde satélite permiten estimar valores homogéneos de radiación UV debido a que éstas se basan en un único instrumento. Sin embargo, estas observaciones presentan importantes limitaciones respecto a las mediciones realizadas desde superficie. Así, como principal desventaja se encuentra que las estimaciones proporcionadas por los satélites son menos representativa de las condiciones locales que las medidas registradas en suelo.

Por tanto, los instrumentos en superficie, las estimaciones realizadas mediante modelos y las observaciones realizadas por los instrumentos satelitales se complementan para caracterizar la variabilidad espacial y temporal, así como el análisis de tendencias, de los valores de radiación UV.

Capítulo 3

Instrumentación

3.1. Introducción

En este capítulo se describen los instrumentos de medida empleados en la obtención de los datos que se han utilizado en el trabajo de investigación.

En primer lugar, se presentan las características de los piranómetros para la medida de radiación solar UV. La utilización de este tipo de instrumento se justifica por la notable precisión que presentan los valores radiativos integrados espectralmente que registran dichos piranómetros, denominados de banda ancha. Además, el mantenimiento necesario para el registro continuo de medidas es muy inferior al de otros equipos. Por todo ello, estos instrumentos se han convertido en herramientas muy útiles en la vigilancia de los valores de radiación UV en superficie. Así, el número de piranómetros UV instalado en distintas partes del mundo ha experimentado un notable incremento en los últimos años, siendo los instrumentos más utilizados en la mayoría de redes de medida de radiación UV en superficie.

Posteriormente, describimos los piranómetros utilizados para la medida de la radiación solar integrada en la banda 310-2800 nm del espectro solar electromagnético (*radiación solar global*). Los instrumentos de este tipo, al igual que los piranómetros UV, no requieren un gran mantenimiento para su funcionamiento. Las medidas registradas por los piranómetros de radiación solar global se utilizan en este estudio para la caracterización de la nubosidad.

En otro apartado de este capítulo, se describen las características del espectrorradiómetro Brewer utilizado como referencia en la calibración de los radiómetros UV de banda ancha. Este equipo, a diferencia de los piranómetros, registra medidas espectrales de radiación UV, esto es, medidas distintas para cada longitud de onda dentro de la región UV. Sin embargo, los espectrorradiómetros tienen un coste elevado y necesitan un mantenimiento diario. Debido a ello, el número de espectrorradiómetros es bastante inferior al de instrumentos de banda ancha.

Finalmente, se describen las principales características técnicas y la metodología

empleada por el instrumento satelital TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), en la determinación de la cantidad total de ozono.



Figura 3.1: Piranómetro ultravioleta tipo UV-S-E-T de la firma Scintec-Kipp & Zonen.

3.2. Piranómetro de radiación solar UV

Los instrumentos que proporcionan las medidas de radiación solar UV utilizadas en esta investigación son piranómetros, modelo UV-S-E-T de la firma Scintec-Kipp & Zonen. En la figura 3.1 se muestra uno de estos equipos.

Estos radiómetros de banda ancha (280-400 nm), conocidos como radiómetros tipo Robertson-Berger, tienen el siguiente esquema de funcionamiento:

1. En primer lugar, la radiación solar que incide sobre el instrumento a través de una cúpula de cuarzo atraviesa un difusor de teflón, llegando a un filtro transmisor de radiación ultravioleta. Este filtro reproduce la respuesta que presenta la piel humana a los efectos del sol. Esto es, el filtro absorbe la radiación solar incidente selectivamente, simulando la forma en que ésta afecta a la piel humana. Así, elimina completamente las longitudes de onda correspondientes a la región del visible, permitiendo el paso de una mayor cantidad de radiación a medida que su longitud de onda es inferior, y por tanto, más dañina para la piel.
2. Posteriormente, una capa de fósforo fluorescente transforma la radiación UV que atraviesa el filtro en luz visible, predominantemente en las longitudes de onda correspondientes al verde.

3. La luz visible incide sobre un fotodetector de estado sólido que transforma la radiación filtrada en impulsos eléctricos.
4. Finalmente, los impulsos son amplificados y digitalizados, almacenándose los registros promedios (voltajes) correspondientes a cada minuto.

Tabla 3.1: Características del radiómetro modelo UV-S-E-T de Scintec-Kipp & Zonen.

Respuesta coseno	$\pm 4\%$ para ángulo cenital inferior a 70°
Rango operativo de temperatura	-25 a $+50^\circ\text{C}$
Rango espectral	280-400 nm
Altura	12 cm
Diámetro de la base	12,2 cm
Peso	1,1 kg

Esta técnica, elaborada por Robertson (1972) y mejorada por Berger (1976), es la utilizada por la mayoría de los radiómetros UV de banda ancha debido a que presenta una buena estabilidad en su respuesta espectral. En este sentido, Leszczynsky et al. (1998) asignan a este tipo de instrumentos una precisión que oscila entre el 8-9%. El radiómetro UV-S-E-T está equipado con un difusor de teflón especialmente diseñado para asegurar una excelente respuesta angular. Así, la diferencia con la respuesta angular ideal es menor del 4% para ángulos cenitales inferiores a 70° (Scintec, 2001). Además, cabe señalar como característica importante que la temperatura del filtro y del detector se estabiliza a 25°C mediante un módulo termoelectrónico. Dicha estabilización se realiza con el fin de eliminar las posibles variaciones en la respuesta espectral del aparato debido a fluctuaciones en la temperatura ambiente (Huber et al., 2002). La respuesta espectral también puede verse afectada por cambios en la humedad interna del piranómetro (Huber et al., 2003). Para disminuir este efecto, los instrumentos están equipados con un producto desecante el cual se repone periódicamente para garantizar una baja humedad interna. En la tabla 3.1 se muestran características técnicas del radiómetro UV-S-E-T de Scintec-Kipp & Zonen.

El elemento característico más relevante de los radiómetros UV de banda ancha es su función respuesta espectral, también conocida como sensibilidad espectral. Esta respuesta espectral se obtiene mediante el empleo de un filtro que, como se ha comentado anteriormente, simula la reacción de la piel humana a la acción solar. La función respuesta no es uniforme en el rango espectral de estudio, ya que tiene un peso decreciente (el efecto sobre la piel es menos dañino) a medida que aumenta la longitud de onda de la radiación UV que alcanza la superficie terrestre. En la figura 3.2 se muestra la dependencia con la longitud de onda de las respuestas espectrales

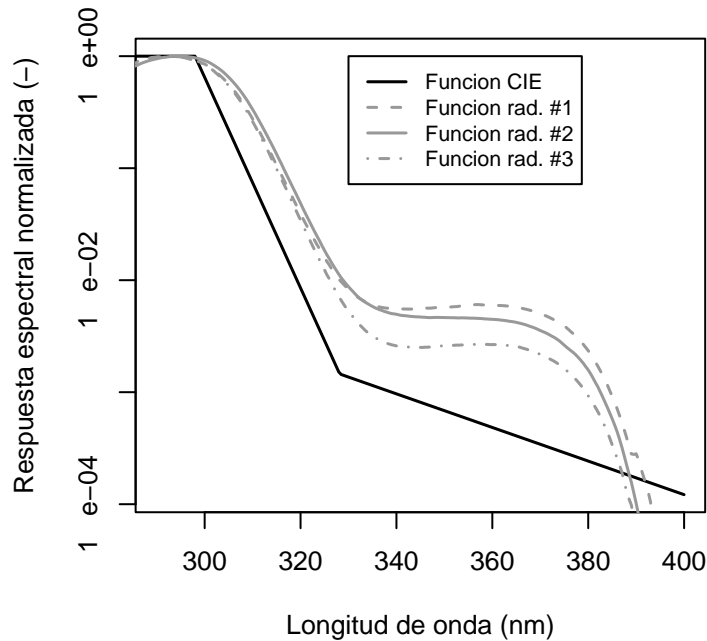


Figura 3.2: Respuesta espectral normalizada correspondiente a la función respuesta CIE y a las funciones espectrales propias de cada radiómetro (escala semilogarítmica).

de los tres radiómetros utilizados en este trabajo. Además, junto a estas tres funciones respuesta se representa la función eritemática propuesta por McKinlay y Diffey (1987) y adoptada como estándar por la *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE). Las curvas se encuentran normalizadas a la unidad en 297 nm, longitud de onda de máxima acción eritemática. Las diferencias existentes entre la función estándar y las tres curvas representadas produce, como explicaremos en el capítulo 5, que los factores de calibración de los radiómetros de banda ancha presenten una importante dependencia con la altura solar.

3.3. Piranómetro de radiación solar global

Para la medida de la radiación solar global en una superficie horizontal se cuenta con piranómetros CM6B de la firma Kipp & Zonen (figura 3.3). En la tabla 3.2 se muestran algunas características técnicas de este instrumento.

El principio físico de funcionamiento de este tipo de instrumentos es el siguiente:



Figura 3.3: Piranómetro CM6B de Kipp & Zonen para la medida de la radiación solar global.

la radiación que incide sobre el piranómetro es absorbida por un pequeño disco negro (sensor termoelectrico). Este sensor se encuentra formado por 64 pares termoelectricos (termopares) constituyendo, una pila termoelectrica (termopila). Con el fin de obtener unas condiciones estables de medida, es necesario que las 64 uniones *frías* permanezcan a una temperatura constante. Estas uniones se encuentran ubicadas a lo largo del borde del sensor, en contacto térmico con el metal que forma el cuerpo del piranómetro (substrato). La resistencia térmica del substrato debe ser muy baja comparada con la del sensor. Por ejemplo, en el piranómetro CM6B una irradiancia de 1000 W/m^2 produce un incremento de temperatura de solamente 3°C en el substrato y, a su vez, una tensión de salida de 12 mV. Por otra parte, las 64 uniones *calientes* están concentradas en el centro del sensor. La temperatura en el centro del disco aumentará debido a la resistencia térmica que ofrecen esas 64 uniones. Finalmente, la termopila genera una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre sus uniones.

El incremento de temperatura producido en el sensor es muy sensible a la influencia del viento, la lluvia, etc. Por ello, para proteger al sensor, éste se encuentra herméticamente cerrado al estar cubierto por dos cúpulas semiesféricas de vidrio. La posible humedad que pudiera concentrarse en el interior del equipo es eliminada mediante un producto desecante, el cual se repone periódicamente.

Tabla 3.2: Características del piranómetro de medida de radiación solar global CM-6B.

Respuesta coseno	$\pm 5\%$ para ángulo cenital inferior a 70°
Rango operativo de temperatura	-30 a $+80^\circ\text{C}$
Rango espectral	310-2800 nm
Altura	9,25 cm
Diámetro	15 cm
Peso	0,85 kg

3.4. Sistema de adquisición de datos

De forma general, se puede definir un sistema de adquisición de datos (datalogger) como un instrumento electrónico y autónomo cuya función es el control y registro de una o varias variables en un proceso de toma de datos. Permite almacenar los valores de las variables medidas, pudiendo seleccionar el periodo de registros de estas variables considerando intervalos fijos. Este sistema permite el posterior envío de los datos a un ordenador en el mismo lugar de la medida o a equipos situados en otros lugares utilizando para ello periféricos para comunicaciones remotas.

En este trabajo los equipos de adquisición de datos utilizados son de tipo CR10X de la firma Campbell Scientific (figura 3.4). El equipo CR10X es un instrumento robusto y versátil que está formado por un módulo de control y un panel de conexiones. La memoria RAM de 128 k almacena hasta 62000 valores, protegidos por una pila de litio que permite el registro continuo de datos. Algunas características técnicas se encuentran en la tabla 3.3.

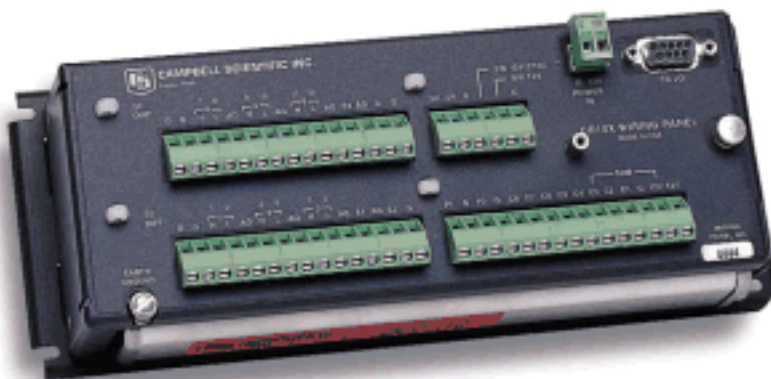


Figura 3.4: Sistema de adquisición de datos CR10X de la firma Campbell Scientific.

El reloj del equipo se mantiene operativo gracias a una pila interna, funcionando independiente de la alimentación principal. El datalogger CR10X se alimenta mediante una fuente de 12 V. Si la tensión de la batería desciende por debajo de los 9,6 V, el equipo CR10X suspende la ejecución del programa para evitar medidas erróneas. Finalmente, el módulo CR10X puede ser programado directamente desde el PC al que está conectado en la localización de medida o bien mediante conexión remota.

Tabla 3.3: Características del datalogger CR10X.

Canales de entrada analógica	12 simples o 6 diferenciales
Rango operacional de temperatura	-25 a +50°C
Memoria RAM	128 k ampliable a 2Mb
Dimensiones	19,8 cm × 8,9 cm × 3,8 cm
Peso	0,91 kg

3.5. Espectrorradiómetro Brewer

Es conocido que los instrumentos más indicados para la medida precisa de irradiancia espectral en superficie son los espectrorradiómetros de alta resolución espectral. La calidad de los datos proporcionados por un espectrorradiómetro dependen en gran medida del mantenimiento y de la supervisión de que sea objeto. Una detallada explicación del mantenimiento del espectrorradiómetro Brewer utilizado en esta investigación es posible encontrarla en la tesis doctoral de J.M. Vilaplana (Vilaplana, 2004). Resumimos en este apartado las principales características de este instrumento y justificamos la idoneidad de su empleo como referencia para la calibración de los radiómetros UV de banda ancha.

En la figura 3.5 mostramos el espectrorradiómetro Brewer #150 modelo MK-III de la firma Kipp & Zonen utilizado en esta tesis. Este tipo de instrumento está diseñado para la medida la irradiancia UV espectral. Además, estima mediante medidas de radiación el contenido total de diversos gases atmosféricos como ozono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno.

El espectrorradiómetro Brewer tiene un doble monocromador que opera con una red holográfica de difracción y permite la medida de irradiancia solar espectral entre 290 y 363 nm con resolución de 0,5 nm y con una precisión en longitud de onda de 0,05 nm. Este instrumento invierte cuatro minutos y medio en realizar un barrido espectral completo. En la tabla 3.4 se presentan otras características técnicas del espectrorradiómetro Brewer MK-III.

Mediante dos lámparas internas, una de mercurio y otra halógena de 20 W, el espectrorradiómetro Brewer realiza automáticamente varios test de calibración diarios.



Figura 3.5: Espectrofotómetro Brewer (MK-III).

Así mismo, periódicamente se realiza un control de la estabilidad del instrumento mediante una lámpara halógena con trazabilidad NIST (National Institute of Standards and Technology), tipo DXW de 1000 W. La precisión relativa de esta lámpara exterior es de 1,56 % en 250 nm y 1,12 % en 350 nm. La transferencia de calibración realizada con la lámpara NIST introduce una incertidumbre de aproximadamente un 5 % en las medidas espectrales del instrumento Brewer. Este espectrorradiómetro ha participado en las cuatro campañas de intercomparación de instrumentos Brewer de la Red Nacional que, con carácter bienal, se ha venido celebrando desde 1999 en la ESAt de El Arenosillo (Vilaplana, 2004). En todas estas campañas, el espectrorradiómetro fue comparado con el instrumento Brewer #17 perteneciente al International Ozone Service (IOS, Canada), que previamente había sido calibrado frente al espectrorradiómetro Brewer de referencia a escala internacional localizado en el Meteorological Service of Canada (MSC). Todo este proceso de verificación garantiza la fiabilidad de las medidas tomadas por el espectrorradiómetro Brewer localizado en el ESAt y justifica su empleo como instrumento de referencia para la calibración de los radiómetros UV de banda ancha.

Tabla 3.4: Características del espectrorradiómetro Brewer MK-III

Óptica	Doble espectrofotómetro Elbert
Microprocesador	RCA COSMAC
Fotomultiplicador	EMI 9789QA
Rango operativo de temperatura	-50 a +50°C
Dimensiones	70 cm × 46 cm × 34 cm
Peso	34 kg

3.6. Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)

Los datos de cantidad total de ozono ($[O_3]$) utilizados en este trabajo de investigación se obtienen mediante el instrumento satelital *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) perteneciente a la NASA (National Aeronautics and Space Administration). La elección de este instrumento se debe, principalmente, a la calidad de las estimaciones de cantidad de ozono que ha proporcionado durante los 27 años que ha estado operativo. Así, en general, no existen diferencias significativas entre estas estimaciones de ozono y las medidas realizadas desde la superficie. Por ejemplo, McPeters et al. (1998) obtiene como resultado que los valores de ozono dados por el instrumento TOMS son, como media, solamente un 1% más elevados que los registrados en 30 estaciones correspondientes a latitudes medias. Otros estudios muestran un notable acuerdo entre medidas en superficie y observaciones proporcionadas por el instrumento satelital TOMS (Sabburg et al., 2001; Masserot et al., 2002; Lam et al., 2002).

El instrumento TOMS proporciona datos diarios de la cantidad total de ozono en columna, teniendo la ventaja secundaria de la disponibilidad libre de sus datos para toda la comunidad científica en la web <http://toms.gsfc.nasa.gov>. Existen otros instrumentos satelitales que también proporcionan datos de ozono de excelente calidad, como el instrumento GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) desarrollado por la Agencia Espacial Europea. Sin embargo, este instrumento proporciona observaciones de ozono cada tres días aproximadamente. Por tanto, en este trabajo se ha decidido utilizar los datos del instrumento TOMS ya que, como hemos comentado, estima valores diarios de ozono con una elevada precisión.

El instrumento satelital TOMS fue lanzado al espacio en 1978, y ha estado operativo a bordo de diversas plataformas satelitales hasta diciembre de 2005. A partir de esta fecha ha sido reemplazado por el instrumento OMI (Ozone Monitoring Instrument), el cual se encuentra a bordo del satélite EOS-Aura desde enero de 2004. En este trabajo hemos empleado los datos proporcionados por el instrumento TOMS a partir de julio de 1996, fecha en la que fue puesto en órbita a bordo de su última plataforma espacial, el satélite polar heliosíncrono Earth-Probe (EP).

El instrumento TOMS mide la radiancia espectral solar dispersada hacia el espacio por la Tierra en seis canales, entre 312,5 y 380 nm, cada uno de ellos de 1 nm de anchura. Las tres longitudes de onda más cortas (312,5 nm, 317,5 nm y 331,2 nm) son utilizadas para la estimación de la cantidad de ozono en columna, ya que en esas longitudes la absorción de la radiación solar por otros componentes atmosféricos es despreciable frente a la absorción que presenta el ozono. Mediante un modelo de transferencia radiativa se obtiene una tabla con las radiancias espectrales dispersadas por la Tierra para las condiciones de medida (latitud, ángulo de visión del satélite, presión y albedo en superficie) en función de distintos valores de ozono. Así, la cantidad de este gas puede ser estimado, una vez medida la radiancia por el satélite, mediante interpolación entre las radiancias calculadas por el modelo (McPeters et al., 1998).

El instrumento TOMS realiza 35 medidas cada 8 segundos, representando prácticamente 300000 medidas diarias que cubren toda la superficie terrestre a excepción de las áreas cercanas a los polos cuando el Sol permanece por debajo del horizonte durante las 24 horas. La resolución espacial del satélite es de 1° de latitud por 1,25° de longitud, siendo la hora de paso del satélite sobre Extremadura entre las 11:20 y las 11:40 UTC.

Capítulo 4

Red de medida

4.1. Introducción

Desde numerosas organizaciones se demanda y alienta la formación de redes de medida de radiación solar UV, a diferentes escalas, para detectar adecuadamente las fluctuaciones espaciales y temporales de dicha radiación. Las redes de medida internacionales resultan excesivamente pobres en cuanto a su densidad de datos para estudios nacionales, por lo que los distintos organismos públicos nacionales promueven la creación de redes más densas. En este marco, el Instituto Nacional de Meteorología de España (INM), junto con el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), ha puesto en marcha dos redes de observación para medir la radiación solar UV que incide sobre la superficie en España. Una de estas redes está constituida por seis espectrorradiómetros Brewer los cuales miden la radiación UV espectral en los emplazamientos de La Coruña, Zaragoza, Madrid, Murcia, El Arenosillo e Izaña. La otra red está formada por radiómetros UV de banda ancha localizados en 16 observatorios del INM. Estas dos redes, si bien resultan adecuadas para caracterizar fluctuaciones a escala nacional, no reflejan suficientemente las fluctuaciones y diversas condiciones regionales. Como ejemplo basta mencionar que en la región de Extremadura sólo posee una estación de medida de radiación solar UV, situada en Badajoz.

En este capítulo se presenta la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura. Esta red tiene como objetivo la detección y el estudio de la variabilidad de la radiación solar y ultravioleta a escala regional. Inicialmente, se describen individualmente los emplazamientos de cada una de las estaciones de medida. Posteriormente, se detallan las características principales que presentan las estaciones de medida. Más tarde, se explica el proceso mediante el cual las medidas de radiación son registradas, almacenadas e introducidas en bases de datos climatológicos. Finalmente, se presentan las líneas futuras de actuación de la red de medida analizada en este capítulo.

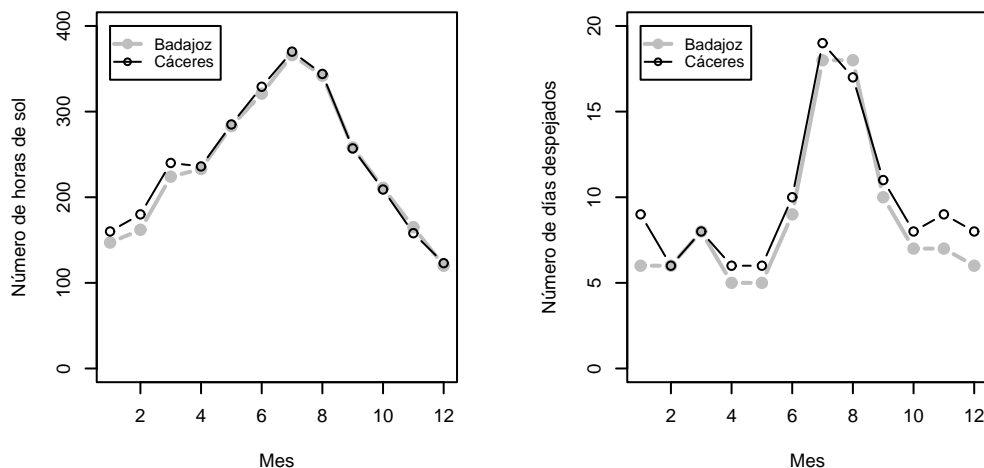


Figura 4.1: Izquierda: Evolución de la media mensual de horas de sol para Badajoz (●) y Cáceres (○) para el periodo 1971-2000. Derecha: Evolución de la media mensual de días despejados para Badajoz (●) y Cáceres (○) para el periodo 1971-2000.(INM, 2001)

4.2. Emplazamientos de medida

Extremadura está situada en la parte occidental de la submeseta sur de la Península Ibérica, ocupando una penillanura elevada (200-600 metros de altitud). La región está comprendida entre los $37,95^{\circ}\text{N}$ y los $40,48^{\circ}\text{N}$ de latitud, y entre los $4,65^{\circ}\text{O}$ y $7,55^{\circ}\text{O}$ de longitud.

De acuerdo con la clasificación climática de Koeppen, Extremadura, es de clase *Csa* (clima templado mediterráneo de veranos cálidos e inviernos templados y lluviosos). En Badajoz la precipitación mensual tiene su máximo en noviembre, con $73,8 \text{ l/m}^2$ y un mínimo en agosto, con $5,5 \text{ l/m}^2$ (Nuñez and Sosa, 1999). Además, Extremadura se caracteriza por un alto número de horas de sol y días despejados al año. En la figura 4.1 se muestra, para el periodo 1971-2000, la evolución de la media mensual de horas de sol y días despejados para las ciudades de Badajoz y Cáceres (INM, 2001). Se observa claramente cómo los valores máximos se alcanzan en verano, concretamente en el mes de julio, con 370 horas de sol y 19 días despejados para Cáceres y 376 horas de sol y 18 días para Badajoz. La media anual durante el periodo 1971-2000, fue de 106 (29% de días despejados al año) y 116 (32%) para las ciudades de Badajoz y Cáceres, respectivamente (INM, 2001). Debido a todo ello, la irradiancia UV que se alcanza en esta región es elevada, resultando de gran

importancia su medida sistemática.



Figura 4.2: Localización geográfica de las estaciones (●) de la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura.

Actualmente, la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura está constituida por tres estaciones situadas en las ciudades de Badajoz, Cáceres y Plasencia. Todas ellas están registrando y suministrando datos de radiación solar UV y global. En la figura 4.2 se muestra la localización geográfica de las tres estaciones de medida actualmente en funcionamiento. Se observa cómo las tres estaciones recogen gran parte de la variación en latitud de la región extremeña, siendo ésta uno de los principales factores geométricos que afectan a la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre.

Los instrumentos de medida están instalados de modo que dispongan de un amplio horizonte y permitir realizar cómodamente las necesarias tareas de mantenimiento. Además, se ha evitado la disposición de los equipos en las cercanías de centros urbanos o zonas industriales, con el propósito de que los instrumentos estén suficientemente alejados de posibles focos de contaminación. Estas medidas de prevención se toman para conseguir que las medidas de radiación solar sean representativas. Es decir, que éstas no se vean afectadas por posibles focos puntuales de contaminación.

En las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se observa la disposición de los instrumentos en las tres estaciones de medida. Cada una de las estaciones cuenta con un piranómetro CM6B de Kipp & Zonen para la medida de radiación solar global y un radiómetro de banda ancha UV-S-E-T de Scintec-Kipp & Zonen para la medida de radiación solar UV. Además, en estas tres figuras se muestra, mediante una flecha amarilla, la situación exacta de las estaciones de medida en las ciudades de Badajoz, Cáceres y Plasencia. En Badajoz, la estación de medida está localizada en la terraza del edificio



Figura 4.3: Estación de medida de radiación solar en Badajoz y su localización exacta (fuente: Google Earth).

del Departamento de Física de la UEx ($38,99^{\circ}\text{N}$, $7,01^{\circ}\text{O}$, 199 m). Este localización se encuentra situada aproximadamente a unos 3 km del centro urbano y a unos 2 km del polígono industrial más cercano.

En la ciudad de Cáceres los instrumentos se encuentran ubicados en la terraza del edificio de la Escuela Politécnica de la UEx en Cáceres ($39,48^{\circ}\text{N}$, $6,34^{\circ}\text{O}$, 397 m). Al igual que en el caso anterior, la estación de medida está alejada aproximadamente 3 km centro urbano, no existiendo zonas industriales en las proximidades. Finalmente, la estación de Plasencia está localizada en el Observatorio Meteorológico que la Confederación Hidrográfica del Tajo tiene instalado en la Presa del Jerte ($40,06^{\circ}\text{N}$, $6,04^{\circ}\text{O}$, 372 m). Este emplazamiento es típicamente rural, ya que se encuentra situado en plena naturaleza.



Figura 4.4: Estación de medida de radiación solar en Cáceres y su localización exacta (fuente: Google Earth).

4.3. Características de la red

El conjunto de estaciones de medida de radiación solar, detallado anteriormente, constituyen una red dado que cumple los requisitos necesarios para dicha denominación (González-Frías et al., 2002):

- *Simultaneidad de las medidas.* Para garantizar este requisito se sincronizan diariamente los relojes de todos los sistemas registradores mediante el Internet Time Service (ITS) del NIST y se programan con el mismo horario de medidas.
- *Compatibilidad y homogeneidad.* Estas dos características se cumplen al utilizar instrumentos del mismo tipo, asegurando un proceso de medida idéntico. En el caso de la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura, todos los instrumentos son de tipo Robertson-Berger, los cuales tienen el mismo proceso físico interno de medida. Además, los tres radiómetros han sido adquiridos al mismo fabricante lo que garantiza unas características similares.



Figura 4.5: Estación de medida de radiación solar en Plasencia y su localización exacta (fuente: Google Earth).

- *Objetivo común.* El objetivo principal de la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura es analizar la variabilidad, tanto espacial como temporal, de la radiación solar UV en dicha región.
- *Representatividad espacial.* Las estaciones de medida están situadas tratando de recoger diferentes entornos, así como la variación latitudinal.
- *Calibración respecto a un patrón común.* Los tres instrumentos de medida han sido calibrados conjuntamente en tres campañas de intercomparación realizadas los años 2001, 2003 y 2005 en la Estación de Sondeos Atmosféricos El Arenosillo, perteneciente al INTA y situada a unos 35 km al este de la ciudad de Huelva. En estas campañas de calibración se utilizó como instrumento de referencia un espectrorradiómetro Brewer tipo MK-III.



Figura 4.6: Radiómetro NILU-UV.

4.4. Proceso de medida

Tanto la radiación solar global como la radiación ultravioleta se miden cada diez segundos, almacenándose los promedios correspondientes a un minuto en el sistema de adquisición de datos CR10X. Estos datos de salida, originalmente en milivoltios, se transforman en magnitudes físicas mediante los factores de calibración obtenidos en las tres campañas de calibrado realizadas durante el periodo 2001-2005.

La alta resolución temporal en la medida de los valores de radiación solar, unida a su registro continuo y sistemático, permite estudiar, además de la variabilidad anual de la radiación solar, su variabilidad diaria (Serrano et al., 2006). Así mismo, el registro minutarío de datos radiativos permite obtener valores de irradiación diaria integrada más fiables que los calculados a partir de las medidas de menor frecuencia que proporcionan otros instrumentos como, por ejemplo, los espectrorradiómetros.

Las estaciones de Badajoz y Cáceres son accesibles a través de la intranet de la UEx y ambas se controlan desde la sede del Departamento de Física en Badajoz. El acceso a los datos de la estación de Plasencia se realiza mediante un sistema remoto utilizando un modem móvil instalado en la propia estación y un modem fijo conectado al ordenador que controla la red (situado en Badajoz). Así, los datos pueden ser monitorizados en tiempo real y descargados periódicamente.

Los datos registrados por los instrumentos de medida se inspeccionan periódicamente, llevándose a cabo la detección de posibles valores anómalos mediante su

comparación con umbrales propuestos. Dichas medidas se almacenan en una base de datos con fines climatológicos. Actualmente se dispone de datos en Badajoz desde febrero de 2001, en Cáceres desde enero de 2001 y en Plasencia desde enero de 2002.

4.5. Acciones actuales y futuras

A partir de las medidas de radiación solar ultravioleta se calcula el índice UV (UVI) según las recomendaciones de la OMM (WMO, 1998). Este conocido índice es un medio eficaz para informar a la población acerca de los peligros que conlleva la sobre-exposición continua a la radiación UV. El objetivo de la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura incluye proporcionar información a la población mediante iniciativas como la puesta en marcha de una página web de acceso público (<http://aire.unex.es/uvi>) con información actualizada, en tiempo real, tanto de los datos de radiación solar UV como de la predicción del UVI para distintos puntos de la geografía extremeña.



Figura 4.7: Fotómetro solar CIMEL en la estación de medida de Cáceres.

En un futuro, se plantea la mejora de la red en dos aspectos. Por un lado, el aumento del número de estaciones en la Comunidad Autónoma de Extremadura. En este sentido, próximamente se pondrá en funcionamiento una cuarta estación, en las cercanías del embalse de Orellana la Nueva (Badajoz). Esta nueva estación, situada al este de la comunidad, permitirá recoger parte de la variación en longitud

de Extremadura, en pos de una descripción más detallada de la variabilidad regional.

Por otra parte, se complementarán los equipos disponibles en la actualidad con otros tipos de instrumentos que aporten información adicional de otras variables. En este sentido, se dispone de un radiómetro NILU-UV (figura 4.6), que permite la medida de radiación UV en cinco bandas espectrales, centradas en 305, 312, 320, 340 y 380 nm, así como en la banda correspondiente a la zona espectral de la radiación fotosintéticamente activa (PAR). Los datos proporcionados por este equipo permitirán profundizar en el análisis de la radiación solar UV, y permitirán contrastarlos con los datos obtenidos por los instrumentos de banda ancha de las distintas estaciones. Además, el instrumento NILU-UV realiza estimaciones de la cantidad total de ozono en columna a partir de las medidas de radiación UV, lo que posibilita disponer de datos locales de este importante gas. Así mismo, desde julio de 2005 se encuentra instalado en Cáceres un fotómetro solar CIMEL (figura 4.7), que mide valores de radiancia solar. A partir de los valores registrados por este instrumento es posible estimar diferentes variables relacionadas con la carga de aerosoles existentes en la atmósfera (espesores ópticos, parámetros de Angström, etc). Este equipo se encuentra integrado en la red mundial AERONET (AErosol ROBot NETwork) gestionada por la NASA (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Capítulo 5

Calibración

5.1. Introducción

El estudio de la radiación UV a partir de los datos proporcionados por radiómetros de banda ancha necesita, como requisito imprescindible, una adecuada calibración de dichos instrumentos. El proceso de calibración consiste en la obtención de unos factores que permiten transformar el voltaje de salida registrado por los instrumentos en unidades radiométricas (W/m^2). La calibración de los radiómetros de banda ancha debe realizarse periódicamente con el objetivo de corregir los cambios en la respuesta del instrumento debidos a su envejecimiento.

Existe una gran diversidad de métodos para obtener los factores de calibración de los radiómetros de banda ancha, lo que puede dar lugar a importantes diferencias en los factores de calibración calculados. Para evitar esta fuente de discrepancia y poder comparar las medidas proporcionadas por distintos instrumentos, en los últimos años, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) está promoviendo la estandarización de los métodos de calibración de los radiómetros UV de banda ancha.

Una de las técnicas habituales de calibrado consiste en la intercomparación de los radiómetros de banda ancha con un equipo de referencia, utilizando como fuente radiativa el sol. El instrumento patrón empleado es un espectrorradiómetro Brewer de doble monocromador. Esta técnica ha sido utilizada durante las dos últimas décadas por varios grupos de investigación (Mayer and Seckmeyer, 1996; Leszczynsky et al., 1998; Vilaplana et al., 2006), siendo, además, recomendada por el programa Global Atmosphere Watch (GAW) dirigido por la OMM (WMO, 1996).

En este capítulo se detallan las características del emplazamiento donde se lleva a cabo la calibración de los tres radiómetros UV de banda ancha pertenecientes a la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura. A continuación, se describen las tres campañas de calibración realizadas entre los años 2001 y 2005. Posteriormente, se indican los pasos previos necesarios para poder comparar las medidas proporcionadas por los radiómetros de banda ancha y el espectrorradiómetro

Brewer. En este sentido, se explica la corrección aplicada a las medidas del equipo de referencia debido a la desviación que presentan respecto al comportamiento teórico esperado por la Ley de Lambert.

Posteriormente, se analizan los métodos de calibración existentes en bibliografía para el cálculo de los factores de calibración de los radiómetros UV de banda ancha. Además, se propone un nuevo método que será comparado con los propuestos por otros autores. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la selección del método más adecuado y su posterior validación. Finalmente, se estudia la estabilidad que presentan los radiómetros de banda ancha a lo largo del tiempo. Para ello, se analiza la evolución temporal de los factores de calibración de cada instrumento.



Figura 5.1: Estación de Sondeos Atmosféricos (ESAt) ubicada en El Arenosillo (Huelva).

5.2. Emplazamiento

Las tres calibraciones de los radiómetros UV de banda ancha se realizaron en la Estación de Sondeos Atmosféricos (ESAt) localizada en El Arenosillo ($37,1^{\circ}\text{N}$; $6,7^{\circ}\text{O}$), a nivel del mar, a unos 35 kilómetros al este de la ciudad de Huelva. Este observatorio, perteneciente al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), está dedicado a la investigación atmosférica desde 1969. La ESAt participa en numerosos proyectos nacionales e internacionales que hacen de esta estación un lugar habitual de intercomparaciones de equipos de medida de radiación, ozono y aerosoles

(Gröbner et al., 2001; INM, 2004; de La Casinière et al., 2006; Antón et al., 2006). Además, se encuentra integrada en diversas redes de medida internacionales: World Ozone Ultraviolet Data Centre (WOUDC), AERosol ROBot NETwork (AERONET) y Ionosphere International Network (IIN).

La figura 5.1 muestra las excelentes condiciones de observación de que se disponen en la ESAt. Así, desde la terraza se observa un horizonte totalmente despejado de obstáculos, lo cual permite realizar medidas a lo largo de todo el día sin interferencia en el campo de observación. Además, el bosque de pinos que rodea la instalación proporciona un albedo homogéneo y constante a lo largo de todo el año. Por otra parte, la existencia de unas condiciones meteorológicas estables, con un promedio de 124 días despejados al año (Vergaz, 2001), hacen de la ESAt un emplazamiento idóneo para la calibración de instrumentos radiométricos.

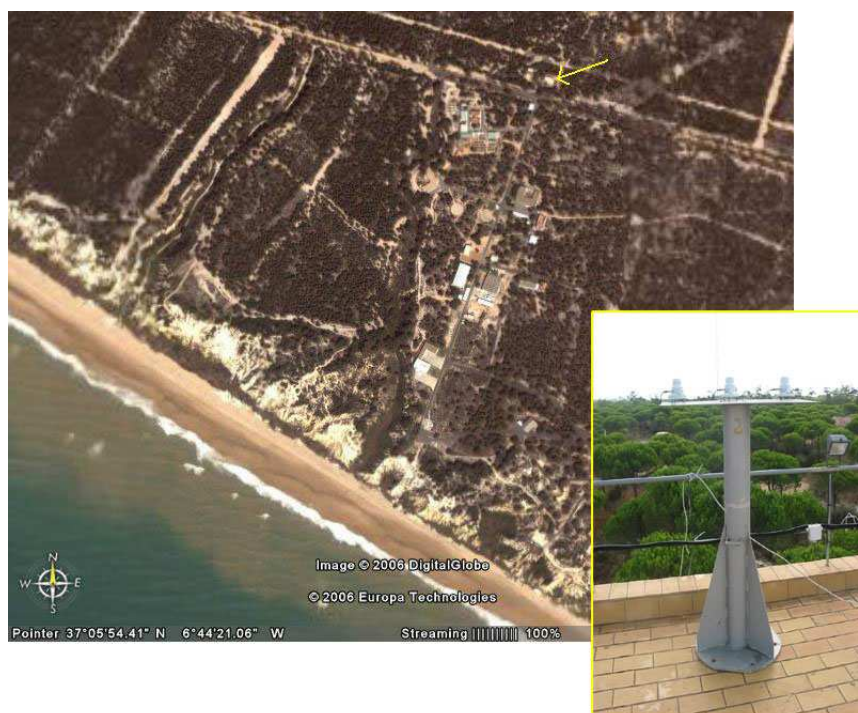


Figura 5.2: Los tres radiómetros UV-S-E-T situados sobre una plataforma horizontal en la terraza del observatorio de la ESAt.

Los radiómetros UV de banda ancha se instalaron en la terraza del observatorio del ESAt sobre una plataforma horizontal de 1,5 metros de altura, convenientemente orientados (figura 5.2) y próximos al espectrorradiómetro Brewer de referencia.

5.3. Campañas de calibración

Entre los días 22 de septiembre y 1 de octubre de 2001 se realizó la primera campaña de calibración de los radiómetros UV de banda ancha, coincidiendo con la participación en la II Intercomparación Nacional de Instrumentos para la Medida de Radiación Ultravioleta organizada conjuntamente por el INM y el INTA. Siguiendo las recomendaciones de la OMM de calibrar los radiómetros UV cada dos años (WMO, 1996) se realizaron dos campañas más: en el año 2003 (entre los días 16 de septiembre y 21 de octubre) y en el año 2005 (entre los días 30 de septiembre y 27 de octubre).

Para la calibración de los radiómetros UV de banda ancha se seleccionaron medidas correspondientes a ángulos cenitales solares menores de 80° . Con esta restricción se garantiza la eliminación de posibles medidas anómalas registradas por los radiómetros UV para elevados ángulos cenitales solares. Tras descartar los ángulos superiores a 80° , el número de datos utilizados para la obtención de los factores de calibración fueron 242 en 2001, 869 en 2003 y 733 en 2005.

Durante las campañas se registraron situaciones meteorológicas muy variadas, incluyendo días despejados y días con diferentes condiciones nubosas. Además, el valor medio de la cantidad total de ozono medida en cada campaña fue de 299 UD en 2001, 292 UD en 2003 y 285 UD en 2005, valores todos cercanos a 310 UD que es el valor medio anual registrado en esas latitudes (Vilaplana, 2004).

El rango de las medidas de la cantidad total de ozono durante cada campaña de calibración no cubre completamente el intervalo de posibles valores que experimenta este gas a lo largo de todo un año. No obstante, al analizar los valores de cantidad de ozono registrados en los años 2001, 2003 y 2005, se comprobó que el número de días cuyo valor medio de ozono se encontraba dentro de los intervalos medidos en cada campaña era elevado. Por ejemplo, el 50 % de los días de 2001 tuvieron un valor medio de ozono dentro del intervalo registrado en la campaña de ese mismo año (275-313 UD). Asimismo, el 67 % y 44 % de los días de 2003 y 2005, tuvieron valores medios de ozono dentro de los intervalos 260-321 UD y 260-311 UD, respectivamente. Por tanto, los valores de cantidad total de ozono medidos durante las tres campañas de calibración pueden ser considerados representativos de la evolución anual que experimenta este gas.

5.4. Procesado previo de las medidas

5.4.1. Análisis del error de cero de los radiómetros de banda ancha

Se define error de cero, denominado en inglés error de offset, como el voltaje que registran los radiómetros durante el periodo nocturno, esto es, en ausencia de radiación solar. Este error podría atribuirse a la presencia de corrientes externas y a

los campos magnéticos asociados a dichas corrientes (Krotkov et al., 2005), así como a variaciones en la temperatura interna de los radiómetros (Bush et al., 2000). En este trabajo, para cada radiómetro, se ha calculado el valor medio diario del error de cero considerando los voltajes correspondientes a ángulos cenitales superiores a 100° . El valor medio junto con su error estándar fue de $7,653 \pm 0,005$ mV para el radiómetro #1, de $3,456 \pm 0,002$ mV para el radiómetro #2 y de $2,375 \pm 0,012$ mV para el radiómetro #3. La magnitud de este error comparada con los valores registrados durante el día es muy pequeña incluso si consideramos días completamente cubiertos. Por ejemplo, el percentil 5 del total de valores registrados para ángulos cenitales menores de 65° correspondiente a cada radiómetro fue de 221,5 mV, 217,1 mV y 168,4 mV.

Con el objetivo de estimar la variabilidad en los valores cero, se calcula el coeficiente relativo de variación (CRV) para el periodo de registro completo como:

$$CRV(\%) = 100 \times \frac{SD}{m}, \quad (5.1)$$

donde SD y m son respectivamente la desviación típica y la media del conjunto de medidas.

Los valores CRV obtenidos son 2,4%, 2,5% y 17,3% correspondientes a los radiómetros #1, #2 y #3, respectivamente. Se comprueba que el instrumento #3 presenta una notable variabilidad en sus valores cero comparada con la que presentan los instrumentos #1 y #2. Este hecho se muestra claramente en la figura 5.3 donde se representa la evolución que experimenta el error de cero de los tres instrumentos para el periodo completo de registro de datos. Se observa que los radiómetros #1 y #2 presentan un valor prácticamente constante para todo el periodo. En cambio, el radiómetro #3 muestra dos comportamientos diferenciados que explican el elevado coeficiente de variación obtenido. En el primero de ellos (desde su instalación hasta mayo del año 2004) existe una notable variabilidad ($CRV = 9,2\%$) y un valor medio de $2,730 \pm 0,011$ mV. En el segundo periodo (desde mayo de 2004 hasta final del periodo de medidas) el error de cero se estabiliza ($CRV = 2,1\%$) alrededor de un valor de $1,994 \pm 0,002$ mV. Una vez analizado las posibles causas de la variabilidad del error de cero de este radiómetro, no se han encontrado razones suficientes para poder explicarlo. Sin embargo, este comportamiento no tendrá influencia en las medidas diurnas debido al bajo valor que presenta dicho error de cero.

En general, cuando existe una notable variabilidad en los valores del error de cero a lo largo del año, la corrección de este error se realiza restando su valor medio diario a los valores registrados durante el día. En este trabajo, la corrección del error de cero de los radiómetros UV #1 y #2 se realizará restando a la totalidad de los voltajes registros por estos instrumentos un valor fijo de 7,653 mV y 3,456 mV, respectivamente. Para el radiómetro #3 se divide el periodo completo en los dos periodos analizados en el párrafo anterior, considerando un error de cero fijo de 2,730 mV y 1,994 mV, respectivamente.

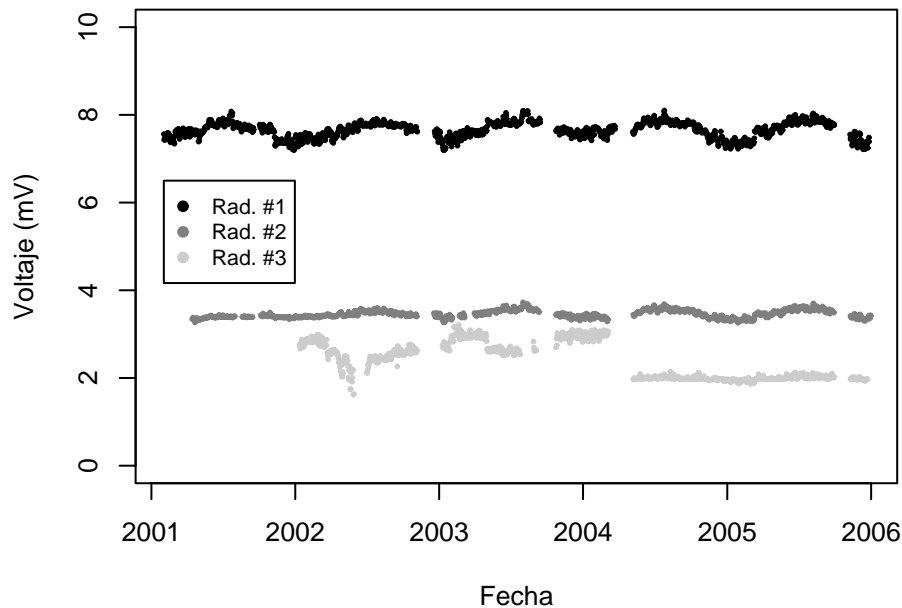


Figura 5.3: Error de cero correspondiente a cada radiómetro para el periodo completo de estudio.

Una vez analizado el error de cero que presentan los radiómetros cuando se encuentran instalados en sus emplazamientos habituales de medida, se estudia dicho error durante las tres campañas de calibración realizadas en El Arenosillo. Al igual que en el análisis del periodo completo, se han considerado los voltajes registrados para ángulos solares cenitales superiores a 100° . En la figura 5.4 se muestra la evolución del error de cero registrado por cada instrumento en las tres campañas realizadas. Se observa que durante cada campaña los voltajes medios diarios no experimentan variaciones notables, pudiendo considerar como error de cero de cada radiómetro el valor medio de dichos voltajes.

En la tabla 5.1 se muestra el valor medio, el error estándar y el coeficiente de variación del error de cero de cada radiómetro correspondiente a las tres campañas. Comprobamos que en las campañas 2001 y 2005 los tres instrumentos registran valores cero muy próximos a los obtenidos para el periodo de medida completo. Así, por ejemplo, la desviación máxima entre el valor de cero de alguna de las tres campañas y el valor medio para el periodo completo fue de 3.5%, 1.8%, y 9.5% para los radiómetros #1, #2 y #3, respectivamente. En cambio, en la campaña 2003 se

midieron valores muy diferentes a los registrados para el periodo completo en los emplazamientos de Badajoz, Cáceres y Plasencia, existiendo diferencias superiores al 100 %. Además, en esta campaña se obtuvieron coeficientes de variación superiores a los calculados en las otras dos campañas de calibración. No obstante, este error de cero sigue siendo muy bajo comparado con los valores diarios registrados por los tres radiómetros. Por tanto, el comportamiento observado en la campaña 2003 no tiene influencia sobre el valor de los factores de calibración de los radiómetros.

Tabla 5.1: Error de cero correspondiente a cada radiómetro de banda ancha. Campañas 2001, 2003 y 2005.

Campaña	Radiómetro	Error de cero (mV)	<i>SE</i> (mV)	<i>CRV</i> (%)
2001	#1	7.378	0.004	0.7
	#2	3.396	0.002	1.5
	#3	2.150	0.004	2.2
2003	#1	10.837	0.014	2.7
	#2	6.332	0.026	8.3
	#3	5.743	0.014	4.9
2005	#1	7.680	0.005	1.3
	#2	3.517	0.001	0.7
	#3	2.171	0.001	1.2

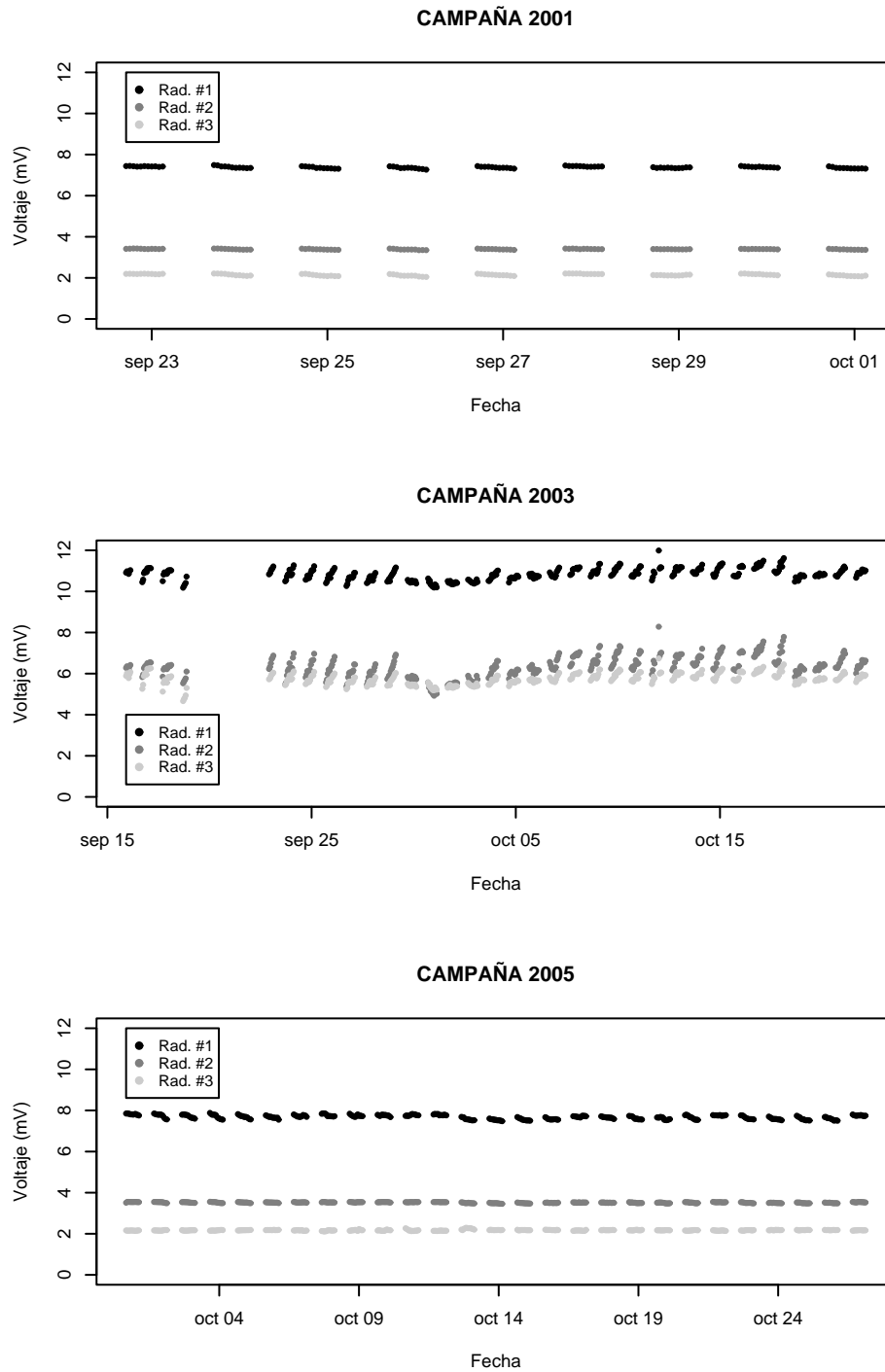


Figura 5.4: Error de cero de cada radiómetro medido en las tres campañas de calibración.

5.4.2. Corrección del error coseno del instrumento Brewer

El error coseno de un instrumento se define como la desviación que presentan sus medidas debida a la diferencia existente entre la respuesta angular del equipo y la respuesta angular ideal. Dicha respuesta ideal está basada en la Ley del Lambert, también conocida como Ley del Coseno. Esta ley establece que la irradiancia directa medida en una superficie es igual a la irradiancia directa en la dirección perpendicular a la superficie multiplicada por el coseno del ángulo que forma la dirección de propagación con la dirección normal a la superficie. En la práctica, los instrumentos de medida no siguen exactamente esta ley, desviándose, por tanto, de la respuesta angular ideal. El error coseno asociado a la radiación directa depende exclusivamente del ángulo cenital solar (θ).

El espectrorradiómetro Brewer está diseñado para la medida de la radiación solar global (directa más difusa). Así, al error coseno de este instrumento contribuye la desviación en la radiación directa comentada en el párrafo anterior y la desviación que sufre la radiación difusa. El error asociado a esta componente se puede considerar constante bajo ciertas hipótesis. Además, el error coseno del espectrorradiómetro Brewer depende de la proporción de radiación directa y difusa que componen la radiación global. Esta última dependencia vendrá determinada por la longitud de onda, las condiciones atmosféricas existentes durante la medida y por el ángulo cenital solar correspondiente. Por tanto, el error coseno de las medidas de radiación solar global de un espectrorradiómetro dependerá de la longitud de onda, del día y la hora de registro, además de los factores que atenúan la radiación solar, principalmente la nubosidad.

El error coseno representa una de las principales causas de incertidumbre en las medidas de un espectrorradiómetro (Gröbner et al., 1996). Además, dicho error presenta una notable variabilidad debido a las dependencias apuntadas en el párrafo anterior, pudiendo oscilar entre un 1 % y un 20 % (Seckmeyer and Bernhard, 1993). Este hecho genera dificultades en la comparación de datos proporcionados por instrumentos localizados en distintos emplazamientos (Kimlin et al., 2003). Asimismo, dicha variabilidad afecta también a la homogeneidad de las medidas de un mismo instrumento en condiciones atmosféricas diferentes. Por tanto, existe un gran interés en corregir el error coseno asociado a los espectrorradiómetros Brewer, ya que son instrumentos muy adecuados para el registro preciso de valores de radiación UV (WMO, 2003a).

La metodología seguida en este trabajo para corregir el error coseno del espectrorradiómetro Brewer utilizado se basa en los trabajos de Fioletov et al. (2002) y Bernhard et al. (2002), ya que dicho instrumento proporciona medidas de radiación global. Existen otros trabajos que emplean metodologías de corrección del error coseno basadas en medidas de radiación directa o difusa como Feister et al. (1997) y Bais et al. (1998).

Metodología

La corrección del error coseno que presenta un espectrorradiómetro Brewer se realiza mediante el factor de corrección de la respuesta coseno (f_g), definido como el cociente entre la irradiancia UV medida por este instrumento (E_{medida}^g) y la irradiancia UV ideal conforme a la Ley del Coseno (E_{ideal}^g). Por tanto, un factor de corrección coseno de valor unidad significará que la respuesta angular del instrumento es perfecta.

$$f_g(\theta, \tau, \lambda) = \frac{E_{medida}^g}{E_{ideal}^g}. \quad (5.2)$$

Como se ha comentado anteriormente este factor de corrección depende de la longitud de onda, del ángulo cenital solar y de la nubosidad existente en el momento de medida. La variable que caracteriza este factor atenuante en la corrección del error coseno del espectrorradiómetro Brewer #150 es el espesor óptico de nubes (τ).

De la misma forma podemos definir factores de corrección para la irradiancia UV directa (f_b) y difusa (f_d):

$$f_b(\theta) = \frac{E_{medida}^b}{E_{ideal}^b}. \quad (5.3)$$

$$f_d = \frac{E_{medida}^d}{E_{ideal}^d}. \quad (5.4)$$

Por otra parte, la proporción de irradiancia UV directa en la irradiancia UV global la denotamos como $r(\theta, \tau, \lambda)$, estando definida por la siguiente expresión:

$$r(\theta, \tau, \lambda) = \frac{E_{ideal}^b}{E_{ideal}^g}. \quad (5.5)$$

Como la irradiancia UV global se obtiene como la suma de las componentes directa y difusa, tenemos que la proporción de irradiancia UV difusa en la irradiancia UV global vendrá dada por:

$$1 - r(\theta, \tau, \lambda) = \frac{E_{ideal}^d}{E_{ideal}^g}. \quad (5.6)$$

Así mismo, la ecuación 5.2 puede expresarse como suma de las dos componentes:

$$f_g(\theta, \tau, \lambda) = \frac{E_{medida}^b}{E_{ideal}^g} + \frac{E_{medida}^d}{E_{ideal}^g}. \quad (5.7)$$

Sustituyendo las ecuaciones 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 en la ecuación anterior se obtiene la expresión definitiva para el factor de corrección de irradiancia UV medida por un espectrorradiómetro Brewer:

$$f_g(\theta, \tau, \lambda) = f_b(\theta) \cdot r(\theta, \tau, \lambda) + f_d [1 - r(\theta, \tau, \lambda)]. \quad (5.8)$$

Por tanto, para el cálculo de f_g es necesario conocer:

- f_b , que se determina experimentalmente en el laboratorio de calibración utilizando una lámpara como fuente de emisión de radiación directa.
- f_d , que se calcula teóricamente a partir de la función de corrección f_b obtenida en el laboratorio.
- r , que se calcula teóricamente mediante el modelo de transferencia radiativa UVSpec/libRadtran (Mayer and Kylling, 2005). La elección de este modelo se debe a la excelente aproximación de sus estimaciones a los valores medidos en superficie (Mayer et al., 1997; vanWeele et al., 2000).

Función de corrección de irradiancia directa (f_b)

En el presente trabajo, el procedimiento seguido para el cálculo del factor de corrección f_b correspondiente al espectrorradiómetro Brewer #150 es similar al empleado por Vilaplana (2004). En ese estudio se explica con detalle la metodología seguida para obtener el factor f_b correspondiente a un radiómetro UV de banda ancha.

El factor de corrección f_b del instrumento Brewer se calcula experimentalmente a partir de las medidas realizadas en el laboratorio de calibración del ESAAt. La metodología para dicho cálculo comienza con la obtención de la respuesta angular (f_a) del equipo utilizado. Para ello se utiliza una lámpara halógena de 1000 W estabilizada (fuente de emisión de radiación directa) a una distancia fija del centro de la entrada del espectrorradiómetro Brewer. Dicha lámpara se encuentra montada sobre un brazo giratorio, el cual recorre diferentes ángulos cenitales (θ). Este ángulo es el que forman la dirección de emisión de la lámpara y la dirección perpendicular a la superficie del instrumento de medida. Además, la lámpara y el espectrorradiómetro deben encontrarse suficientemente separados para poder considerar al filamento de la lámpara como una fuente de emisión puntual. Una vez realizado el correspondiente montaje, se realizan varias medidas de irradiancias UV para distintos ángulos cenitales ($E^b(\theta)$). La repetición del proceso garantiza la precisión de las medidas radiativas registradas.

Posteriormente, las medidas tomadas en el laboratorio son normalizadas dividiéndolas por la irradiancia de incidencia normal ($E^b(\theta = 0)$). Así, para cada ángulo cenital, la respuesta angular del espectrorradiómetro se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_a(\theta) = \frac{E^b(\theta)}{E^b(\theta = 0)}. \quad (5.9)$$

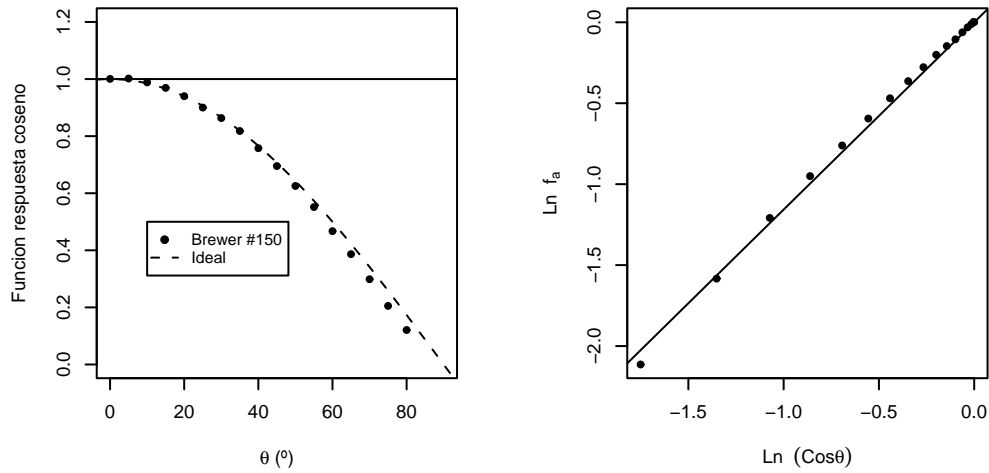


Figura 5.5: Izquierda: Representación de la función respuesta coseno del espectrorradiómetro Brewer (f_a) y de la función respuesta ideal respecto al ángulo cenital (θ). Derecha: $\text{Ln } f_a$ frente a $\text{Ln } \cos \theta$ junto con la recta de regresión.

En la gráfica de la izquierda, figura 5.5, se representan los valores de $f_a(\theta)$ obtenidos experimentalmente frente al ángulo cenital. A esta figura se le ha añadido la función respuesta ideal ($f_a(\theta) = \cos \theta$). Se observa cómo la respuesta del espectrorradiómetro utilizado en este trabajo se aleja de la respuesta ideal para ángulos superiores a 40° . Además, los valores de respuesta angular obtenidos experimentalmente pueden ser ajustados mediante la siguiente expresión potencial (Fioletov et al., 2002):

$$f_a(\theta) = \cos^a(\theta). \quad (5.10)$$

A esta función se la denomina *función de respuesta angular*, siendo característica de cada instrumento. Para obtener el coeficiente a se toman logaritmos a ambos lados de la igualdad en la ecuación anterior, y se realiza un ajuste por el método de mínimos cuadrados. La pendiente de la recta junto con su error estándar es $1,157 \pm 0,013$. Esta pendiente es una estimación del valor del coeficiente a buscado. En la gráfica de la derecha, figura 5.5, se muestran los 17 valores, así como la recta de regresión. Se observa cómo dicha recta recoge adecuadamente la variación de los valores ajustados ($R^2=0,998$).

Una vez obtenida la función respuesta angular del espectrorradiómetro comienza el cálculo de la función de corrección f_b de dicho instrumento. Así, a partir de la

ecuación 5.9 tenemos que:

$$E_{medida}^b = E^b(\theta = 0) \cdot f_a(\theta). \quad (5.11)$$

Por otra parte, la ley de Lambert establece que:

$$E_{ideal}^b = E^b(\theta = 0) \cdot \cos(\theta). \quad (5.12)$$

Sustituyendo las expresiones 5.11 y 5.12 en la ecuación 5.3 obtenemos:

$$f_b(\theta) = \frac{E^b(\theta = 0) \cdot f_a(\theta)}{E^b(\theta = 0) \cdot \cos(\theta)} = \frac{f_a(\theta)}{\cos(\theta)}. \quad (5.13)$$

En la figura 5.6 se representa los valores f_b en función del ángulo cenital. Esta figura muestra cómo por debajo de 40° los valores de f_b se sitúan en torno a la unidad, es decir, para esos ángulos la respuesta angular del espectrorradiómetro Brewer es muy similar a la respuesta ideal, caracterizada por la Ley del Coseno.

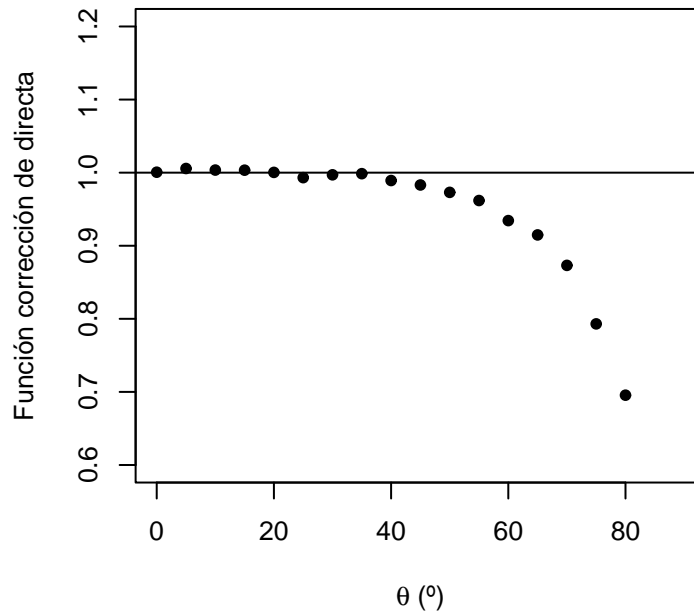


Figura 5.6: Factor de corrección de irradiancia directa en función del ángulo de incidencia θ .

Finalmente, introduciendo la ecuación 5.10 en la expresión 5.13 y conocido el valor del coeficiente a tenemos que la función de corrección f_b puede expresarse como:

$$f_b(\theta) = \cos^{(a-1)}(\theta) = \cos^{(0,157 \pm 0,013)}(\theta). \quad (5.14)$$

Factor de corrección de irradiancia difusa (f_d)

Considerando la hipótesis de que la distribución de la radiancia difusa celeste es isotrópica, esto es, homogénea en todas direcciones, el factor de corrección de irradiancia difusa está relacionado con el de directa mediante la siguiente expresión (Vilaplana, 2004):

$$f_d = 2 \int_0^{\pi/2} f_b \cos \theta \sin \theta d\theta. \quad (5.15)$$

Como se ha explicado anteriormente, los valores f_b pueden expresarse en función del ángulo cenital mediante la ecuación 5.14. Así, cuando se sustituye dicha expresión potencial en la ecuación anterior y se integra posteriormente, tenemos que el factor f_d se obtiene mediante el siguiente cociente:

$$f_d = \frac{2}{1+a}. \quad (5.16)$$

Por tanto, la contribución de la componente difusa al error coseno vendrá caracterizada por un factor constante $f_d = 0,927 \pm 0,006$.

Función de corrección del cociente directa/global (r)

En el ESAAt no se dispone de medidas de irradiancia UV directa. Por tanto, la función r se calcula mediante un modelo de transferencia radiativa. En este trabajo se ha utilizado el modelo UVSpec/libRadtran.

Inicialmente, se analiza la influencia de la longitud de onda sobre la función r . Así, se calcula esta función para cielo despejado ($\tau = 0$), valor constante de cantidad de ozono (310 UD), valores de λ entre 290 nm y 363 nm y valores de ángulo cenital solar entre 0° y 90° . En la gráfica de la izquierda, figura 5.7, se representa la evolución de los valores de la función r con θ para tres longitudes de onda: 305 nm, 324 nm y 350 nm. Se observa que a medida que decrece la longitud de onda, la función r disminuye. Este hecho se debe a que la proporción de radiación directa que forma la radiación global disminuye a medida que descendemos en longitud de onda en el espectro electromagnético.

En la misma gráfica, figura 5.7, se comprueba, además, la influencia del ozono en la función r . En este sentido, de las tres longitudes de onda representadas, dos de ellas (305 nm y 324 nm) corresponden a la región UVB. Por una parte, la radiación UV en $\lambda = 305$ nm presenta una notable absorción atribuida, principalmente, al ozono estratosférico. En cambio, este gas provoca una atenuación mucho más débil en la radiación UV de $\lambda = 324$ nm. En la gráfica se observa claramente cómo las diferencias

entre las curvas correspondientes a las funciones r para $\lambda = 305$ nm y $\lambda = 324$ nm son pequeñas. Por tanto, la cantidad de ozono existente en la atmósfera no influye determinantemente en la proporción de radiación directa que compone la radiación global.

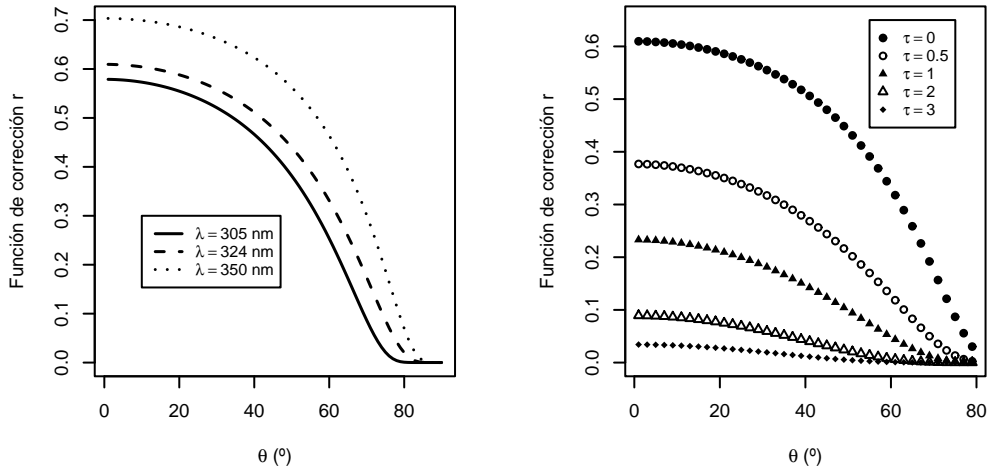


Figura 5.7: Izquierda: Evolución de la función r respecto a θ para cielo despejado ($\tau = 0$) y tres λ diferentes. Derecha: Evolución de la función r respecto a θ para un valor de λ constante (324 nm) y valores de τ entre 0 y 3.

Una vez que se ha comprobado que la función r no tiene una clara dependencia con la cantidad de ozono, se cuantifica la dependencia que presenta con la nubosidad. Este factor de atenuación es el responsable principal de la variabilidad que presenta la función r (Fioletov et al., 2002; Bernhard et al., 2002). Así, se aplica en el modelo UVSpec un valor constante de longitud de onda ($\lambda = 324$ nm), variando tanto θ como τ . En la gráfica de la derecha, figura 5.7, se muestra los resultados obtenidos. Se observa claramente cómo, a medida que aumenta τ , los valores de r se reducen considerablemente, esto es, la proporción de irradiancia UV directa en la irradiancia UV global se va reduciendo gradualmente. Así, para valores de τ superiores a 3, los valores de la función r son prácticamente nulos para todo ángulo cenital solar.

Función de corrección de irradiancia global (f_g)

La función de corrección de irradiancia global $f_g(\theta, \tau, \lambda)$ se obtiene a partir de la ecuación 5.8, utilizando las funciones de corrección f_b y r , y el factor f_d . Es decir, a partir de dicha ecuación tenemos un valor de f_g para cada conjunto de valores (θ, τ, λ) .

En la figura 5.8, gráfica de la izquierda, se muestra la evolución de los valores de la función f_g respecto al ángulo cenital solar para tres valores de λ , considerando $\tau = 0$. En esta gráfica, se observa que la dependencia espectral de la función f_g es débil en la región UVB, ya que las curvas para $\lambda = 305$ nm y $\lambda = 324$ nm se encuentran muy próximas. La contribución de la región espectral UVB al valor de la irradiancia UV eritemática se sitúa en torno al 80%. Por tanto, es posible utilizar una única función f_g calculada en dicha región, por ejemplo, en $\lambda = 324$, para corregir todas las medidas espectrales del espectrorradiómetro Brewer (Fioletov et al., 2002).

En la misma figura 5.8, gráfica de la derecha, se muestra la evolución de los valores de la función f_g respecto al ángulo cenital solar, para distintos valores de τ , considerando el caso seleccionado, $\lambda = 324$ nm. Se observa cómo a medida que aumenta τ la función de corrección de irradiancia global se acerca al factor de irradiancia difusa f_d . Este hecho se debe a que a medida que aumenta la nubosidad, la función r tiende a cero, provocando que la función f_g se acerque al factor f_d (ecuación 5.8).

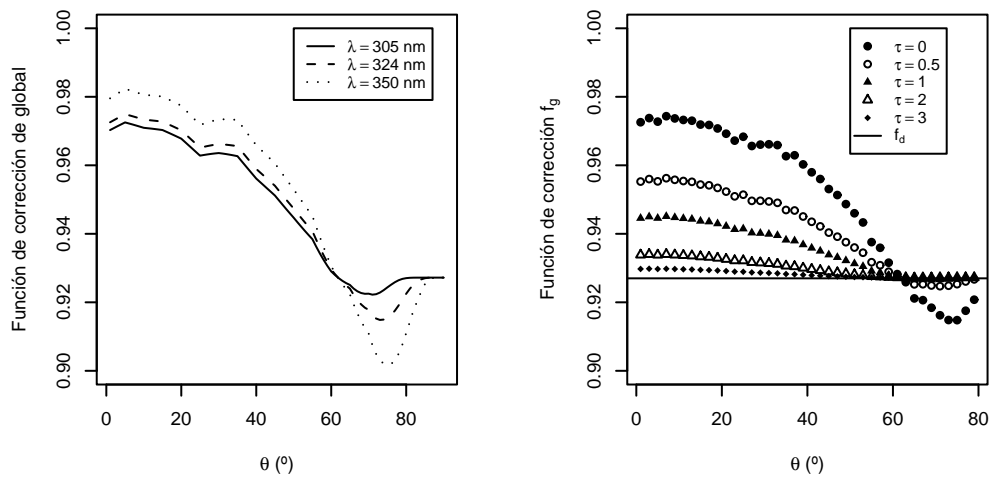


Figura 5.8: Izquierda: Dependencia de la función de corrección f_g respecto a θ para tres valores de λ diferentes para el caso despejado ($\tau = 0$). Derecha: Dependencia de la función f_g respecto a θ para un valor de λ constante (324 nm) y valores de τ entre 0 y 3.

Por tanto, el valor de corrección f_g correspondiente a cada medida experimental del espectrorradiómetro Brewer está determinado por los valores de las variables θ y τ asociados a cada registro. La variable θ es fácilmente calculable conociendo tanto las coordenadas del lugar de medida como el día y hora de registro del instrumento Brewer. En cambio, en el ESA_t no se dispone de ningún instrumento para la medida

de la variable τ . Por tanto, no es posible obtener experimentalmente la función de corrección f_g .

En este trabajo, con el objetivo de calcular la función f_g del espectrorradiómetro Brewer #150 para toda situación atmosférica, se emplea el modelo de transferencia radiativa UVSpec/libRadtran. Inicialmente, se calcula la función de nubosidad (A_{modelo}) mediante dicho modelo. Esta función se calcula como el cociente entre la irradiancia UV espectral ($\lambda = 324$ nm) dada por el modelo para unos valores de θ y τ determinados ($E_{modelo}^g(\theta, \tau)$) y la estimación de esa misma irradiancia para cielo despejado ($E_{modelo}^g(\theta, \tau = 0)$). Esto es:

$$A_{modelo}(\theta, \tau) = \frac{E_{modelo}^g(\theta, \tau)}{E_{modelo}^g(\theta, \tau = 0)}. \quad (5.17)$$

Para estimar A_{modelo} es necesario conocer el valor de las variables θ y τ . Además, a partir de estas dos variables y considerando $\lambda = 324$ nm se obtiene el correspondiente valor de la función f_g mediante la ecuación 5.8. Así, es posible generar una matriz de datos similar a la que encontramos en la tabla 5.2, a la que llamaremos $F(\theta, A)$.

Tabla 5.2: Matriz de datos teórica para la estimación de f_g

	θ_1	θ_2	θ_3	...	θ_n
A_{modelo}^1	f_g^{11}	f_g^{12}	f_g^{13}	...	f_g^{1n}
A_{modelo}^2	f_g^{21}	f_g^{22}	f_g^{23}	...	f_g^{2n}
A_{modelo}^3	f_g^{31}	f_g^{32}	f_g^{33}	...	f_g^{3n}
...
A_{modelo}^n	f_g^{n1}	f_g^{n2}	f_g^{n3}	...	f_g^{nn}

Por otra parte, a partir de cada medida registrada por el espectrorradiómetro Brewer es posible obtener un factor de nubosidad semi-empírico. Este factor viene definido como:

$$A = \frac{E_{medido}^g}{E_{despejado}^g}, \quad (5.18)$$

donde $E_{despejado}^g$ es la irradiancia UV global ($\lambda = 324$ nm) estimada para cielo despejado. La estimación de esta variable se realiza mediante un modelo empírico basado en un ajuste potencial entre los valores de E_{medido}^g correspondientes a casos despejados y el coseno del ángulo cenital solar ($\cos \theta$). Para obtener dicho modelo, se seleccionan los pares de valores E_{medido}^g y $\cos \theta$ correspondientes a casos despejados. Con el objetivo de realizar esta selección se utiliza la reflectividad estimada por el instrumento satelital TOMS (R_{TOMS}). Así, se considera día despejado a aquel con una $R_{TOMS} < 10\%$ (Kallikosta et al., 2000).

Por tanto, conociendo los valores de A y ángulo cenital solar correspondientes a cada medida experimental del espectrorradiómetro Brewer, tendremos el factor de corrección f_g interpolando esos datos en la matriz $F(\theta, A)$.

Finalmente, los datos del espectrorradiómetro Brewer serán corregidos empleando la ecuación 5.2. Esto es:

$$E_{ideal}^g = \frac{E_{medida}^g}{f_g}. \quad (5.19)$$

Como la función f_g es inferior a la unidad, la irradiancia UV corregida será siempre superior a la irradiancia UV medida.

Validación del método de corrección del error coseno

Con el fin de validar el método de corrección del error coseno expuesto en la sección anterior, se han usado los datos registrados por el espectrorradiómetro Brewer #150 y un equipo de referencia entre los días 9 y 18 de septiembre de 2005. Durante este periodo tuvo lugar en El Arenosillo una intercomparación internacional de espectrorradiómetros Brewer en el marco del programa Vigilancia Atmosférica Global de la OMM. En esta campaña, en la que hubo 13 equipos de distintos países, participó el instrumento de referencia del Proyecto QASUME (Quality Assurance of Spectral Ultraviolet Measurements in Europe) financiado por la Comisión Europea. Este proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de un instrumento viajero de referencia, con el fin de poder calibrar los distintos instrumentos de medida de radiación UV espectral que operan en Europa (Gröbner et al., 2006). Las medidas de radiación UV global proporcionadas por este aparato de referencia tienen una incertidumbre en torno al $\pm 4\%$ para las longitudes de onda entre 300 y 400 nm (Gröbner and Sperfeld, 2005).

El primer paso para realizar la corrección coseno es obtener la expresión empírica que relacione los valores $E_{despejado}^g$ medidos por el espectrorradiómetro Brewer ($\lambda = 324$ nm) con el coseno de θ . Para ello, mediante la reflectividad del TOMS se han seleccionado 35 casos despejados. En la figura 5.9, se representa la dependencia de los valores $E_{despejado}^g$ ($\lambda = 324$ nm) con el coseno de θ . A esta figura se le ha añadido la curva obtenida, una vez realizada la regresión por el método de mínimos cuadrados. Dicha curva viene dada por la expresión:

$$E_{despejado}^g = (0,421 \pm 0,007) \cdot (\cos \theta)^{(1,58 \pm 0,02)}. \quad (5.20)$$

Posteriormente, a partir de la ecuación 5.18 se estima el factor de nubosidad semi-empírico A . Una vez calculado dicho factor y conocido el valor del ángulo cenital solar se obtiene el factor de corrección f_g interpolando en la matriz $F(\theta, A)$. Finalmente, los datos espectrales de irradiancia UV medidos por el espectrorradiómetro Brewer serán corregidos empleando la ecuación 5.19.

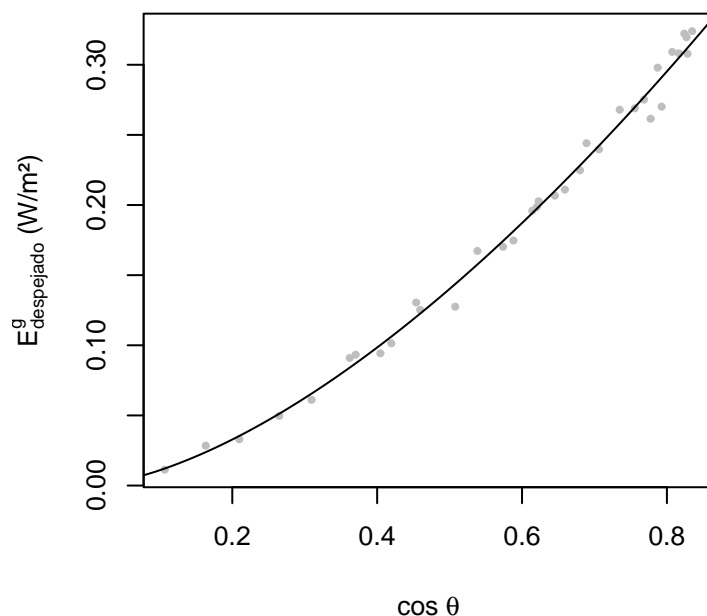


Figura 5.9: Dependencia de la irradiancia UV ($\lambda = 324$ nm), medida por el espectrorradiómetro Brewer para casos despejados en función del coseno del ángulo cenital solar.

En la figura 5.10 se muestra el cociente entre la irradiancia UV medida por el instrumento de referencia QASUME y los datos proporcionados por el espectrorradiómetro Brewer sin corregir, corregidos para la longitud de onda representada y corregidos considerando $\lambda = 324$ nm. En las dos gráficas se observa cómo los datos corregidos se acercan notablemente a los valores del instrumento de referencia (cociente próximo a la unidad). Además, se comprueba que prácticamente no existen diferencias entre las dos correcciones presentadas en cada gráfica.

Para cuantificar cuantitativamente las diferencias, se calcula el parámetro *MABE*, esto es, el valor absoluto medio de las diferencias relativas que existen entre los datos representados en la figura anterior. Así, para la irradiancia medida en $\lambda = 305$ nm, el parámetro *MABE* tomando los datos sin corregir presenta un valor de 5,0 %, mientras que para los datos corregidos considerando $\lambda = 305$ nm tiene un valor de 2,6 % y para $\lambda = 324$ nm de 2,8 %. Para el otro caso analizado ($\lambda = 350$ nm), el parámetro *MABE* tiene un valor de 8,3 % (datos sin corregir), de 3,5 % (datos corregidos para $\lambda = 350$ nm) y de 3,9 % (datos corregidos para $\lambda = 324$ nm). La corrección del

error coseno consigue disminuir aproximadamente el 50 % de las diferencias entre las medidas del espectrorradiómetro Brewer y el instrumento de referencia. Además, se puede considerar muy representativa la corrección de los datos de irradiancia UV en $\lambda = 305 \text{ nm}$ y $\lambda = 350 \text{ nm}$, empleando la función de corrección correspondiente a $\lambda = 324 \text{ nm}$.

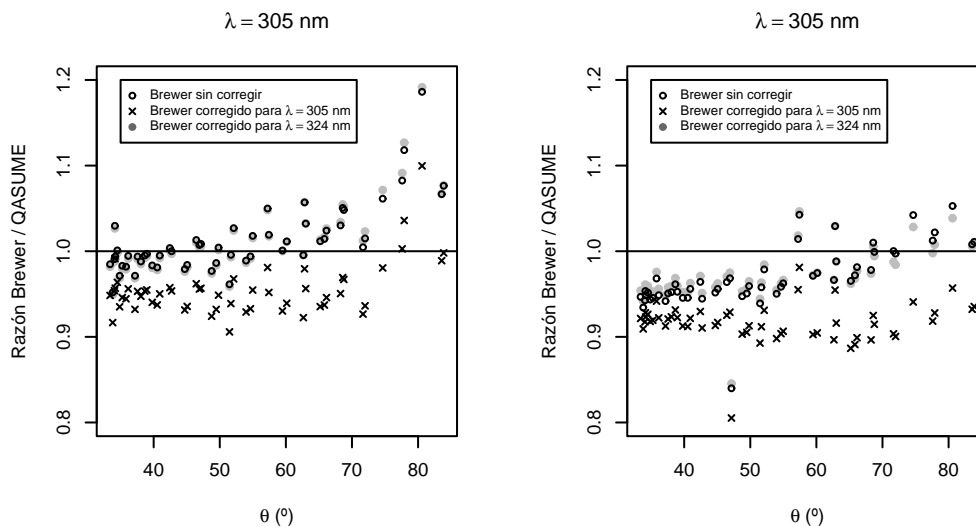


Figura 5.10: Cociente entre la irradiancia UV medida por el instrumento QASUME y los datos del espectrorradiómetro Brewer #150 sin corregir (\bullet), corregidos para la longitud de onda representada (\times) y corregidos considerando $\lambda = 324 \text{ nm}$ (\circ).

En término medio las diferencias entre los datos del espectrorradiómetro Brewer #150 una vez corregidos y el instrumento de referencia QASUME, se encuentran dentro del intervalo de incertidumbre de éste último. Por tanto, el método descrito en esta sección se puede considerar válido para la corrección del error coseno del espectrorradiómetro Brewer empleado en este trabajo como instrumento de referencia.

5.4.3. Diferencias en la resolución temporal y espectral entre el espectrorradiómetro Brewer y los radiómetros

Antes de proceder a realizar la comparación entre los datos proporcionados por el espectrorradiómetro Brewer y los tres radiómetros de banda ancha hay que considerar dos factores:

Por un lado, el asociado a la diferente resolución temporal de los instrumentos. Esto es, mientras que los radiómetros de banda ancha miden cada 10 segundos, almacenando el promedio minutar, el espectrorradiómetro Brewer invierte 4 minutos

y medio en realizar cada barrido espectral. Así, para poder comparar las medidas proporcionadas por los dos tipos de instrumentos es absolutamente necesario tener medidas simultáneas. Para ello, se calcula el promedio de los voltajes de salida de cada radiómetro UV correspondiente al intervalo de tiempo que emplea el instrumento Brewer en realizar un barrido espectral completo (Bais et al., 1999).

Por otro lado, debe tenerse en cuenta el intervalo espectral a considerar en cada instrumento. La medida espectral de irradiancia UV del espectrorradiómetro tiene como límite superior 363 nm. En cambio, los radiómetros de banda ancha proporcionan valores integrados hasta 400 nm. Por tanto, es necesario prolongar el intervalo espectral del espectrorradiómetro Brewer hasta los 400 nm. Si no se realiza la prolongación del espectro de dicho instrumento, se pueden llegar a subestimar hasta un 8% los factores de calibración de los radiómetros UV de banda ancha (Bais et al., 1999).

En este trabajo, para solucionar el problema de la prolongación de la señal del espectrorradiómetro Brewer, se emplea el modelo de transferencia radiativa UVSPEC/libRadtran. Puesto que en el rango 363-400 nm la absorción por ozono es baja, se elige un intervalo espectral dentro del rango de medida del espectrorradiómetro Brewer en el que dicha absorción sea también pequeña. Así, el intervalo seleccionado se encuentra entre 350 y 363 nm (Vilaplana, 2004). A continuación, se integran los valores radiativos medidos por el espectrorradiómetro Brewer dentro de ese intervalo espectral, obteniendo la irradiancia UV eritemática correspondiente al intervalo 350-363 nm ($E_{bre}(350 - 363)$). Además, se estima, mediante el modelo de transferencia, la irradiancia UV eritemática integrada entre 363 y 400 nm ($E_{mod}(363 - 400)$). En ambos procesos, para poder obtener valores de irradiancia UV eritemática se ha aplicado la función espectral CIE a los valores espectrales antes de realizar la correspondiente integración. Finalmente, se calcula la razón entre la irradiancia UV eritemática estimada mediante el modelo y la obtenida a partir de las medidas realizadas con el espectrorradiómetro de referencia:

$$P = \frac{E_{mod}(363 - 400)}{E_{bre}(350 - 363)}. \quad (5.21)$$

Se seleccionan los cocientes P correspondientes a casos despejados, ya que la estimación de $E_{mod}(363 - 400)$ se realiza para atmósfera sin nubes. En la figura 5.11 se representa la evolución de los valores de P respecto al ángulo cenital solar para la campaña del año 2003. A esta figura se le ha añadido un ajuste polinómico de segundo grado, que viene dado por la siguiente expresión:

$$P(\theta) = (1,9 \pm 0,2) - (0,017 \pm 0,008)\theta + (0,0003 \pm 0,0001)\theta^2, \quad (5.22)$$

siendo R^2 igual a 0.931

La contribución del rango de longitud de onda 363-400 nm a la irradiancia UV resultante vendrá dado por el producto de $E_{bre}(350 - 363)$ por el valor de $P(\theta)$

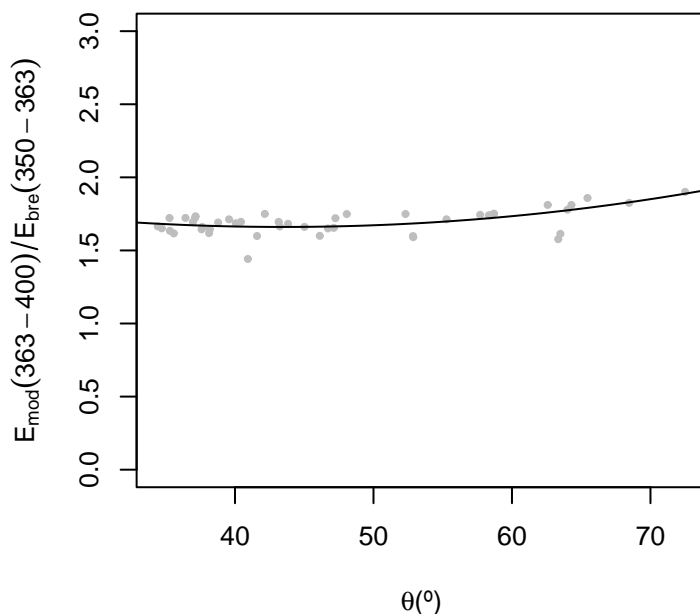


Figura 5.11: Dependencia con el ángulo cenital solar de la razón entre la irradiancia UV eritemática estimada en el intervalo espectral 363-400 nm (modelo UVSpec) y la medida en el intervalo 350-363 nm (Brewer). Campaña 2003.

estimado por la ecuación anterior. Por tanto, la irradiancia UV eritemática integrada en el rango 290-400 nm ($E^{Bre-CIE}$) se obtendrá como la suma de la irradiancia obtenida mediante la integración de los valores espectrales procedentes del espectrorradiómetro Brewer en el intervalo 290-363 nm ($E_{bre}(290-363)$), más la contribución $E_{bre}(363-400)$ calculada tal como se acaba de describir. Esto es, la irradiancia UV eritemática considerada en este trabajo como referencia se obtiene como:

$$E^{Bre-CIE} = E_{bre}(290-363) + P(\theta) \cdot E_{bre}(350-363). \quad (5.23)$$

Tomando los datos registrados durante las tres campañas, el segundo sumando de la expresión anterior representa, en término medio, un 6,5% la irradiancia UV eritemática medida por el espectrorradiómetro Brewer. En lo sucesivo, cuando nos refiramos a datos de irradiancia obtenidos a partir de este espectrorradiómetro estaremos considerando los valores de irradiancia calculados mediante la ecuación anterior, esto es, valores de irradiancia UV eritemática en el rango espectral de 290 a 400 nm.

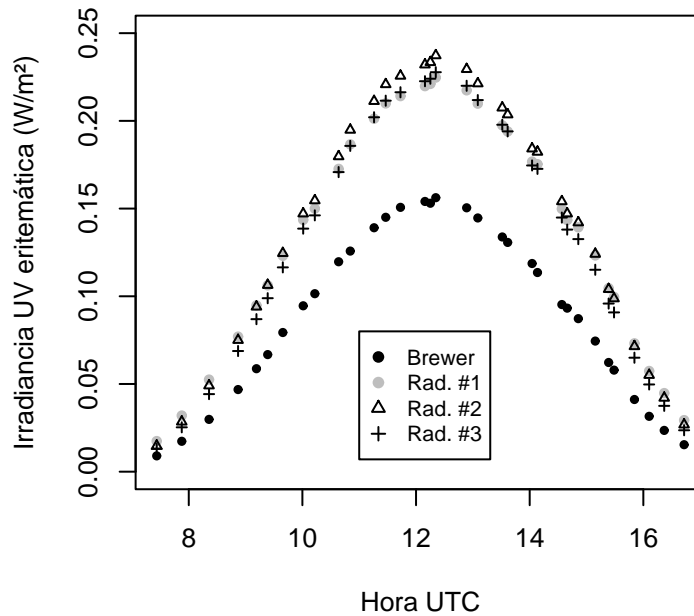


Figura 5.12: Evolución de la irradiancia UV eritemática obtenida mediante el espectrorradiómetro Brewer y la medida por los tres radiómetros utilizando el factor de calibración dado por el fabricante. Día 27 de septiembre de 2003.

5.5. Calibrado del fabricante

La necesidad de realizar un calibrado individual para cada uno de los tres radiómetros UV de banda ancha queda patente en la figura 5.12. En esta figura se representan, para el día 27 de septiembre de 2003, los valores de la irradiancia eritemática medidos por los tres radiómetros de banda ancha, aplicando el factor de calibrado proporcionado por el fabricante (FC_f). Este factor es el mismo para los tres radiómetros, siendo igual a $0,1735 \text{ W/m}^2\text{V}$. En la misma figura también se representan los datos medidos por el espectrorradiómetro Brewer para el mismo día. Se observa claramente cómo los tres radiómetros sobrestiman la irradiancia UV dada por el instrumento de referencia. Esta sobreestimación supera el 40% al medio día solar, provocando la obtención de alarmantes valores erróneos del índice UVI . Por tanto, la calibración proporcionada por el fabricante es incorrecta, poniendo de manifiesto la necesidad de obtener los factores más apropiados de cada uno de los radiómetros.

En la tabla 5.3 se muestran los valores $RMSE$ correspondientes a cada radiómetro

cuando empleamos el factor FC_f en las tres campañas. Los errores obtenidos al utilizar dicho factor son muy elevados, superando las fluctuaciones que experimenta la irradiancia UV debidas a los cambios en la cubierta nubosa y en la cantidad de ozono.

Tabla 5.3: Factor de calibrado proporcionado por el fabricante y la raíz del error cuadrático medio correspondiente a cada radiómetro de banda ancha. Campañas 2001, 2003 y 2005.

Campaña	Radiómetro	FC_f (W/m ² V)	$RMSE$ (W/m ²)
2001	#1	0,1735	0,0441
	#2	0,1735	0,0414
	#3	0,1735	0,0186
2003	#1	0,1735	0,0428
	#2	0,1735	0,0470
	#3	0,1735	0,0406
2005	#1	0,1735	0,0462
	#2	0,1735	0,0567
	#3	0,1735	0,0477

5.6. Métodos de calibración de un paso

En esta sección se detallan cuatro métodos de un paso, tres de los cuales han sido recopilados de la bibliografía consultada y el cuarto corresponde a una propuesta original de este trabajo. Posteriormente, se muestran los resultados obtenidos al aplicar cada uno los cuatro modelos al conjunto de datos obtenidos en las tres campañas de calibración realizadas. Además, se selecciona el modelo más adecuado para el cálculo de los factores de calibración correspondientes a cada radiómetro de banda ancha analizado. Finalmente, se valida dicho modelo con el objetivo de asignarle un error.

5.6.1. Metodología

La metodología de un paso consiste en obtener los factores de calibración (FC) mediante la comparación directa entre la señal de voltaje de salida de los radiómetros

(V) y la irradiancia UV eritemática calculada a partir de la integración de los valores espectrales proporcionados por el espectrorradiómetro Brewer ($E^{Bre-CIE}$).

En la bibliografía consultada para la realización de este trabajo se han encontrado tres modelos que siguen el método de un paso:

- **Modelo del cociente.**

La OMM propone calcular los factores de calibración de los radiómetros de banda ancha como el promedio de los cocientes obtenidos al dividir $E^{Bre-CIE}$ entre V :

$$FC_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{E_i^{Bre-CIE}}{V_i}, \quad (5.24)$$

donde n es el número de medidas simultáneas utilizadas en el estudio.

Este modelo ha sido utilizado en diferentes trabajos (Leszczynski et al., 1996; Leszczynsky et al., 1998; Lantz et al., 1999; Oppenrieder et al., 2003).

- **Modelo de primer orden.**

Este modelo consiste en el cálculo del factor de calibración mediante una regresión polinómica de primer orden entre los datos de salida del instrumento a calibrar y los proporcionados por el equipo de referencia (Nunez et al., 1997; Bodhaine et al., 1998). Matemáticamente se puede expresar como:

$$E^{Bre-CIE} = FC_p \cdot V, \quad (5.25)$$

siendo la pendiente de la recta, FC_p , el factor de calibración.

- **Modelo de segundo orden.**

En el capítulo 3 se explicó que la respuesta espectral de los radiómetros de banda ancha no coincide exactamente con la función CIE (figura 3.2). Esta función peso es la que se utiliza en la integración de las medidas espectrales del espectrorradiómetro Brewer con el objetivo de obtener valores de irradiancia UV eritemática. Así, variaciones en la intensidad de la irradiancia UV incidente en la superficie terrestre, generará respuestas diferentes, tanto en la salida de los radiómetros, como en el valor integrado obtenido a partir del instrumento de referencia. Las fluctuaciones en la irradiancia UV en superficie, anteriormente mencionadas, dependen principalmente de la cantidad total de ozono ($[O_3]$) y el ángulo cenital solar (θ). Por tanto, es conocido que los factores de calibración de los radiómetros de banda ancha presentan una importante dependencia con estas dos variables (Bodhaine et al., 1998; Vilaplana et al., 2002).

Para tratar de recoger la dependencia de la calibración con el ángulo cenital solar, Cancillo et al. (2005) proponen un nuevo modelo de un paso, llamado *modelo de segundo orden*. Este modelo, como su propio nombre indica, se basa en el ajuste a un modelo polinómico de segundo orden entre los valores $E^{Bre-CIE}$ y V . Matemáticamente, la expresión analizada es:

$$E^{Bre-CIE} = FC_{s1} \cdot V + FC_{s2} \cdot V^2, \quad (5.26)$$

donde FC_{s1} y FC_{s2} son los factores de calibración obtenidos por este modelo.

Finalmente, en esta tesis, se propone un nuevo modelo que sigue la metodología de los modelos de un sólo paso:

- **Modelo del coseno.**

Cancillo et al. (2005) muestran que existe una relación lineal entre el ángulo cenital solar y los cocientes obtenidos al dividir los valores $E^{Bre-CIE}$ entre los valores V . En esta tesis, en la sección 5.6.2 se comprueba que dichos cocientes presentan una dependencia lineal con el coseno del ángulo cenital solar (figura 5.13). Por tanto, es posible generar unos nuevos factores de calibración que introduzcan explícitamente esa dependencia. Denominaremos a este nueva metodología de calibración como *modelo del coseno*.

$$E^{Bre-CIE} = FC_{c1} \cdot V + FC_{c2} \cdot V \cdot \cos \theta, \quad (5.27)$$

donde FC_{c1} y FC_{c2} son los factores de calibración obtenidos mediante este modelo.

Debemos resaltar que en los tres modelos basados en regresiones el término independiente se ha considerado nulo. La inclusión de dicho término en los ajustes de los modelos no modifica los resultados de las regresiones, siendo los factores de calibración prácticamente los mismos. Sin embargo, aún después de eliminar el error de cero de los radiómetros, las regresiones libres de primer y segundo orden presentan ordenada en el origen de signo negativo. La introducción de dicho término en los modelos de calibración genera valores negativos de irradiancia UV para ángulos cenitales solares elevados (Antón, 2004). Estos valores negativos no tienen sentido físico y conducen a subestimar ligeramente los valores radiativos acumulados diarios. Por tanto, para evitar esta posible subestimación y como los resultados de los ajustes son similares tanto con ordenada en el origen libre como siendo ésta nula, decidimos emplear expresiones con ordenada en el origen nula.

Con el fin de comparar la bondad del ajuste a las distintas dependencias propuestas se calcula para cada uno de los modelos la *raíz cuadrada del error cuadrático*

medio ($RMSE$). Además, para las tres regresiones se calcula el *coeficiente de determinación* (R^2) y los errores estándar (SE) de los coeficientes de regresión.

El parámetro $RMSE$ viene dado por la siguiente expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (E^{Bre-CIE} - E^{Rad-CIE})^2}, \quad (5.28)$$

siendo N el número total de medidas y p el número de coeficientes que tiene el modelo. Así, cuanto más próximos estén las irradiancias $E^{Bre-CIE}$ y $E^{Rad-CIE}$, más bajo será el valor del parámetro $RMSE$ y, por tanto, más apropiado será el modelo de calibración empleado.

El coeficiente de determinación R^2 suele emplearse para analizar la bondad de los ajustes de regresión. Se define como el cociente entre la varianza explicada por el modelo y la varianza total.

Una vez elegido el modelo más adecuado, éste será validado con un conjunto de casos distintos a los utilizados en el cálculo de los factores de calibración de dicho modelo. La validación de un modelo consiste en evaluar su bondad y cuantificarla asignándole un error. Con el objetivo de evaluar cuantitativamente el grado de aproximación entre los valores de irradiancia UV obtenidos por el espectrorradiómetro Brewer con los estimados por el radiómetro de banda ancha al aplicar los factores de calibración seleccionados, se emplean los parámetros estadísticos: *media de las diferencias relativas* (MBE) y la *media del valor absoluto de las diferencias relativas* ($MABE$), los cuales vienen dados por las siguientes expresiones:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{E^{Rad-CIE} - E^{Bre-CIE}}{E^{Bre-CIE}}. \quad (5.29)$$

$$MABE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|E^{Rad-CIE} - E^{Bre-CIE}|}{E^{Bre-CIE}}. \quad (5.30)$$

Mientras que el primer parámetro estadístico nos indica si el modelo seleccionado sobreestima o subestima los valores medidos por el instrumento de referencia, el segundo nos muestra el grado de ajuste que se obtiene al emplear dicho modelo.

5.6.2. Resultados

Del total de valores radiativos disponibles se seleccionan dos conjuntos de datos independientes con el fin de realizar el ajuste y validación de los modelos.

Para el ajuste de los distintos modelos de calibración se emplea en torno al 80% del total de casos escogidos al azar, utilizando el procedimiento de muestreo por remplazamiento. Alrededor del 20% de los restantes casos se emplea para la validación de los modelos seleccionados. El mayor peso dado al conjunto de valores de ajuste se

debe al intento de obtener los factores de calibración más representativos posibles. Se ha preferido elegir casos al azar para tener el mayor número de condiciones meteorológicas distintas, ya que en un periodo continuo se podrían haber acumulado un mismo tipo de situación atmosférica. Siguiendo estos criterios seleccionamos para los ajustes 200 casos (83 % del total) para la campaña 2001, 670 (77 %) para la campaña 2003 y 564 (77 %) para la campaña 2005.

Los cuatro modelos de un paso se ajustan utilizando los casos seleccionados en cada campaña, estimando los factores de calibración de cada uno de dichos modelos.

Modelo del cociente

En la tabla 5.4 se encuentran los factores de calibración de los tres radiómetros, así como sus correspondientes errores SE y $RMSE$, obtenidos mediante la ecuación 5.24 en cada una de las campañas. Hay que resaltar que estos factores son entre un 53 % y un 63 % más pequeños que el factor dado por el fabricante (tabla 5.3). Además, el valor $RMSE$ se reduce en más de $0,040 \text{ W/m}^2$. Este resultado sugiere que cada radiómetro necesita una calibración individual. Por tanto, un único e idéntico factor no debería ser aplicado a todos los instrumentos, incluso si éstos son del mismo modelo y fabricante. Las diferencias existentes entre los factores de calibración de cada instrumento se deben principalmente a las diferencias en sus respuestas espectrales (Lantz et al., 1999). En este trabajo, las diferencias existentes en las tres respuestas espectrales son notorias (figura 3.2). Este hecho provoca ligeras diferencias en la señal de salida de los radiómetros incluso cuando se encuentran bajo las mismas condiciones atmosféricas.

En la figura 5.13 se representan los cocientes utilizados en el cálculo del factor FC_r (ecuación 5.24), correspondiente al radiómetro #1 y a la campaña 2003. En la gráfica de la izquierda se muestra la evolución de dichos cocientes en función de la hora, mientras que la gráfica de la derecha muestra la dependencia de los cocientes con el coseno del ángulo cenital solar. La línea horizontal dibujada indica el valor medio de los datos representados, es decir, el valor de FC_r . Las dos gráficas muestran la clara dependencia de los cocientes con el ciclo diario de la altura solar. Además, se observa cómo el factor FC_r subestima los cocientes en las horas centrales de día. Este hecho provoca que el radiómetro subestime sistemáticamente la irradiancia UV eritemática para los ángulos cenitales solares más bajos, esto es, cuando se registran los valores más altos de irradiancia. Así, cuando se apliquen los factores FC_r a los voltajes de salida de los radiómetros, se obtendrán valores erróneos del UVI . Esta circunstancia resulta extremadamente peligrosa cuando uno de los principales objetivos en la instalación de instrumentos de medida de radiación UV es informar a la población sobre los riesgos a una exposición continuada a esta radiación. Este mismo comportamiento ha sido encontrado en los otros dos radiómetros para las tres campañas.

Tabla 5.4: Factor de calibración, error estándar y raíz del error cuadrático medio obtenidos mediante el modelo del cociente para cada radiómetro de banda ancha. Campañas 2001, 2003 y 2005.

Campaña	Radiómetro	FC_r (W/m ² V)	$SE(FC_r)$ (W/m ² V)	$RMSE$ (W/m ²)
2001	#1	0,1123	0,0007	0,0071
	#2	0,1193	0,0003	0,0041
	#3	0,1424	0,0005	0,0046
2003	#1	0,1089	0,0004	0,0069
	#2	0,1076	0,0003	0,0049
	#3	0,1146	0,0003	0,0042
2005	#1	0,1008	0,0005	0,0070
	#2	0,0932	0,0004	0,0062
	#3	0,1051	0,0003	0,0033

La dispersión de los cocientes para un determinado ángulo cenital solar es considerablemente inferior a la obtenida para el conjunto de datos. Así, el modelo del cociente podría utilizarse para obtener buenos factores FC_r para ángulos determinados de cierto interés. Sin embargo, este modelo no debería aplicarse para medidas tomadas en un amplio intervalo de valores del ángulo cenital solar.

Modelo de primer orden

La tabla 5.5 muestra los factores de calibración, su error estándar, y los coeficientes R^2 y $RMSE$ obtenidos al aplicar el modelo de calibración de primer orden (ecuación 5.25) a cada uno de los tres radiómetros para las tres campañas de intercomparación. Si comparamos los resultados de este modelo con los obtenidos mediante el modelo del cociente observamos cómo los nuevos factores de calibración tienen errores bastante menores. Además, el coeficiente $RMSE$ también se reduce considerablemente (entre un 22 % y un 27 %). La disminución del error asociado a los factores de calibración obtenidos al aplicar el modelo de primer orden se debe a que este modelo es más complejo y, por tanto, recoge ciertos comportamientos que el modelo del cociente no consigue explicar.

Como ejemplo, en la figura 5.14 se representan los valores $E^{Bre-CIE}$ frente a V^{Rad} correspondiente al radiómetro #1 (campaña 2003). La pendiente de la recta de regresión con ordenada en el origen nula (ecuación 5.25), calculada mediante el

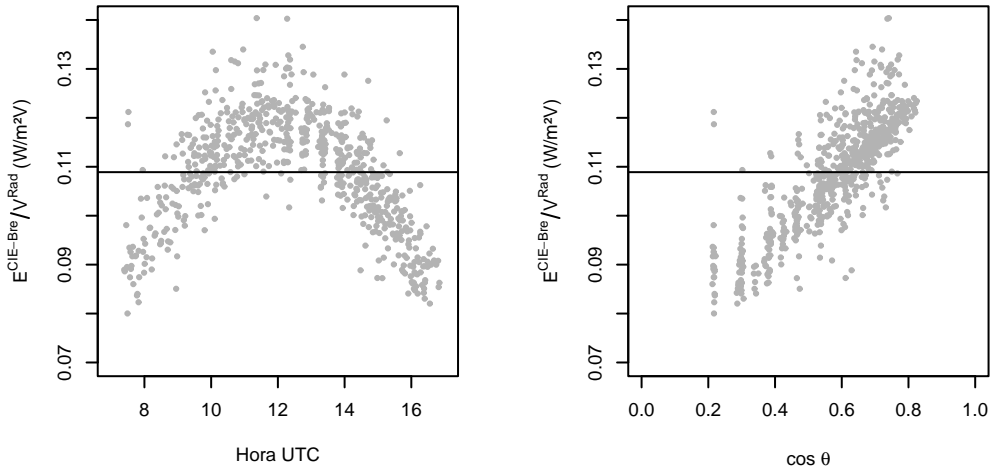


Figura 5.13: Izquierda: Representación de los cocientes obtenidos al dividir $E^{CIE-Bre}$ entre V^{Rad} medidos por el radiómetro #1 frente a la hora. Campaña 2003. Derecha: Representación de dichos cocientes frente al coseno del ángulo cenital solar.

método de mínimos cuadrados, podrá emplearse como factor para transformar la señal de salida del radiómetro a valores radiativos. No obstante, la figura muestra cómo los valores altos de $E^{Bre-CIE}$ son subestimados por este ajuste de primer orden. Al igual que ocurría con los factores obtenidos con el modelo del cociente, al utilizar los factores FC_p sobre los valores de salida de los radiómetros de banda ancha, se obtiene valores del UVI inferiores a los reales.

Modelo de segundo orden

En la figura 5.14 se observa cómo los datos presentan cierta curvatura. Así, parece apropiado el uso del modelo de segundo orden para el cálculo de los factores de calibración. Este modelo consiste en un ajuste a una expresión polinómica de grado dos entre los valores de irradiancia UV eritemática medidos por el espectrorradiómetro Brewer y los voltajes de salida de cada uno de los radiómetros (ecuación 5.26). La variación que presentan los valores $E^{Bre-CIE}$ con V^{Rad} es recogida por la curvatura de segundo orden. Además, este modelo reduce los errores para valores altos de $E^{Bre-CIE}$. Este comportamiento también se observa en los otros radiómetros de banda ancha.

En la tabla 5.6 se encuentran los factores de calibración, su error estándar, y los parámetros R^2 y $RMSE$ obtenidos al aplicar el modelo de calibración de segundo

Tabla 5.5: Factor de calibración, error estándar, coeficiente de determinación y raíz del error cuadrático medio obtenidos mediante el modelo de primer orden para cada radiómetro de banda ancha. Campañas 2001, 2003 y 2005.

Campaña	Radiómetro	FC_p (W/m ² V)	$SE(FC_p)$ (W/m ² V)	R^2	$RMSE$ (W/m ²)
2001	#1	0,1182	0,0005	0,997	0,0053
	#2	0,1205	0,0004	0,998	0,0039
	#3	0,1454	0,0005	0,998	0,0041
2003	#1	0,1144	0,0003	0,995	0,0056
	#2	0,1106	0,0002	0,997	0,0043
	#3	0,1164	0,0002	0,997	0,0041
2005	#1	0,1074	0,0003	0,995	0,0053
	#2	0,0987	0,0003	0,996	0,0046
	#3	0,1059	0,0002	0,998	0,0032

orden (ecuación 5.26) a cada uno de los tres radiómetros para las tres campañas. Al comparar los resultados obtenidos con este modelo y los generados al aplicar el modelo de primer orden (tabla 5.5) se comprueba cómo, en general, los estadísticos R^2 y $RMSE$ mejoran al utilizar el modelo de segundo orden.

Modelo del coseno

Para intentar conseguir unos factores de calibración que recojan completamente la dependencia de los cocientes con el ángulo cenital solar (figura 5.13) introducimos explícitamente la variable $\cos\theta$ en la relación entre $E^{CIE-Br e}$ y V (ecuación 5.27). En la tabla 5.7 se muestran los factores de calibración, su error estándar y los coeficientes R^2 y $RMSE$ obtenidos al aplicar este modelo de calibración. El análisis de los resultados obtenidos al aplicar este modelo se describen en la siguiente sección.

5.6.3. Selección del modelo

Si se comparan los valores $RMSE$ (tablas 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7) de los cuatro modelos de calibración que siguen la metodología de un paso analizados en este trabajo, se comprueba cómo el modelo del coseno mejora considerablemente los resultados obtenidos por los tres modelos existentes en la bibliografía consultada. Esta mejora se debe principalmente a que el nuevo modelo consigue recoger adecuadamente la

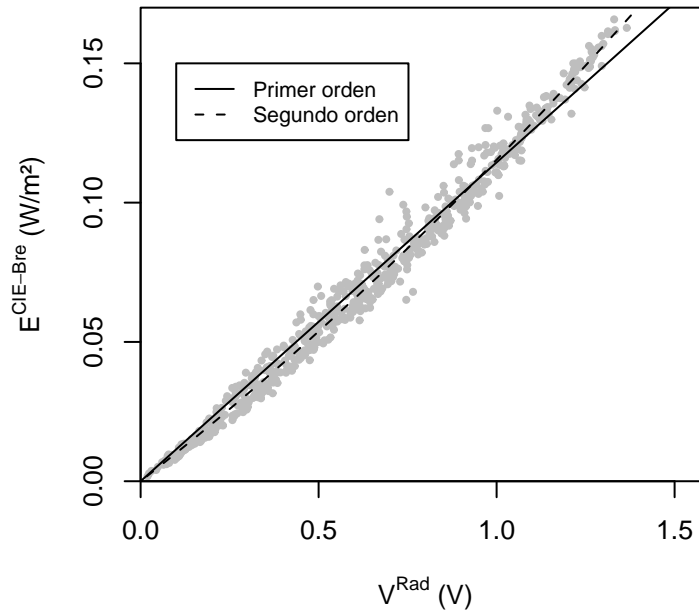


Figura 5.14: Irradiancia UV eritemática obtenida mediante el espectrorradiómetro Brewer frente a la señal de salida del radiómetro #1. Campaña 2003

dependencia de los pares de valores $(E^{Bre-CIE}, V^{Rad})$ con el ángulo cenital solar.

En la figura 5.15 se muestra, para la campaña 2003, la evolución de las diferencias relativas entre el instrumento de referencia y el radiómetro #1 $(E^{Rad-CIE} - E^{Bre-CIE} / E^{Bre-CIE})$ respecto al ángulo cenital solar, tras aplicar los cuatro modelos de calibración de un paso. Los puntos representados corresponden a la media de las diferencias obtenidas para intervalos de $\theta = 1^\circ$. Se observa claramente cómo aplicando el modelo del coseno, se obtienen diferencias más pequeñas para todo el intervalo representado de ángulos cenitales. Las diferencias se encuentran acotadas en el intervalo $(-14\%, 25\%)$ para el modelo del cociente, $(-7\%, 35\%)$ para el modelo de primer orden y $(-7\%, 20\%)$ para el modelo de segundo orden. El intervalo de diferencias relativas se reduce considerablemente cuando utilizamos los factores de calibración obtenidos con el modelo del coseno $(-9\%, 4\%)$. Este último intervalo se reduce a $(-2\%, 2\%)$, cuando consideramos ángulos cenitales solares inferiores a 60° . La mayor dependencia con el ángulo cenital solar se produce en los modelos del cociente y de primer orden. Dicha dependencia se corrige parcialmente mediante el modelo de segundo orden y en mayor medida utilizando el modelo del coseno. Este mismo comportamiento se observa en

Tabla 5.6: Factores de calibración, sus errores estándar, coeficiente de determinación y raíz cuadrada del error cuadrático medio obtenidos mediante el modelo de segundo orden para cada radiómetro. Campañas 2001, 2003 y 2005.

Rad.	FC_{s1} (W/m ² V)	SE (FC_{s1}) (W/m ² V)	FC_{s2} (W/m ² V ²)	SE(FC_{s2}) (W/m ² V ²)	R^2	RMSE (W/m ²)
#1	0,1071	0,0017	0,0108	0,0016	0,997	0,0048
#2	0,1171	0,0014	0,0033	0,0013	0,998	0,0039
#3	0,1394	0,0017	0,0071	0,0020	0,998	0,0040
#1	0,0996	0,0009	0,0158	0,0009	0,997	0,0047
#2	0,1023	0,0007	0,0085	0,0007	0,998	0,0040
#3	0,1109	0,0008	0,0058	0,0008	0,998	0,0039
#1	0,0891	0,0010	0,0205	0,0011	0,997	0,0042
#2	0,0841	0,0008	0,0150	0,0008	0,998	0,0036
#3	0,1043	0,0007	0,0017	0,0008	0,998	0,0032

los radiómetros #2 y #3.

Por tanto, de acuerdo con los valores $RMSE$ y la figura 5.15, seleccionamos el modelo del coseno como el más adecuado de entre aquellos modelos de calibración que siguen la metodología de un paso.

5.6.4. Validación del modelo seleccionado

Una vez elegido el modelo coseno como el método de un paso más apropiado, pasamos a validarlo con datos independientes a los utilizados en la obtención de los coeficientes de dicho modelo. Como se ha explicado anteriormente, el conjunto de datos seleccionados para la validación representa aproximadamente un 20% del total de casos. Así, en la campaña 2001 tenemos 42 casos (17% del total), en la de 2003 disponemos de 199 (23%) y en la campaña 2005 utilizamos 169 (23%).

Inicialmente, se calculan los valores $E^{Rad-CIE}$ a partir de los factores de calibración obtenidos mediante el modelo del coseno. La tabla 5.8 muestra los resultados obtenidos al realizar la regresión entre los valores $E^{Rad-CIE}$ y los proporcionados por el espectrorradiómetro Brewer para las tres campañas de calibración. Se comprueba cómo las pendientes de las rectas de regresión están muy cercanas a la unidad y los tres coeficiente R^2 son superiores a 0,99.

En la tabla 5.8 también se observa que el parámetro $MABE$ tiene un valor inferior al 5% para los tres radiómetros. Este dato indica que las medidas de los radiómetros

Tabla 5.7: Factores de calibración, sus errores estándar, coeficiente de determinación y raíz cuadrada del error cuadrático medio obtenidos mediante el modelo del coseno para cada radiómetro. Campañas 2001, 2003 y 2005.

Rad.	FC_{c1} (W/m ² V)	SE (FC_{c1}) (W/m ² V)	FC_{c2} (W/m ² V ²)	SE(FC_{c2}) (W/m ² V ²)	R^2	RMSE (W/m ²)
#1	0,0791	0,0032	0,0540	0,0043	0,998	0,0040
#2	0,1051	0,0032	0,0212	0,0044	0,998	0,0037
#3	0,1166	0,0038	0,0396	0,0052	0,998	0,0037
#1	0,0684	0,0014	0,0672	0,0022	0,998	0,0036
#2	0,0818	0,0014	0,0418	0,0020	0,998	0,0034
#3	0,0933	0,0015	0,0334	0,0022	0,998	0,0035
#1	0,0557	0,0013	0,0800	0,0020	0,999	0,0028
#2	0,0576	0,0011	0,0634	0,0017	0,999	0,0025
#3	0,0922	0,0016	0,0200	0,0024	0,998	0,0030

están muy próximas a las dadas por el instrumento de referencia. Además, los valores del parámetro MBE se sitúan entre el $-2,6\%$ y el $-0,4\%$, teniendo, por tanto, todos un valor negativo. Así, al emplear los factores de calibración obtenidos mediante el modelo coseno, en término medio, se subestiman ligeramente los valores proporcionados por el instrumento Brewer. Todos estos resultados confirman la validez de dicho modelo. Como ejemplo, en la figura 5.16 se representan los valores de irradiancia UV medidos por el espectrorradiómetro Brewer frente a los registrados por el radiómetro #1 utilizando los factores de calibración generados mediante el modelo del coseno (campaña 2003). A esta figura se le ha añadido la recta de pendiente unidad. Se observa cómo los puntos representados se distribuyen en torno a esta recta, indicando el notable acuerdo que existe entre el instrumento de referencia y el radiómetro #1 cuando se utiliza el modelo del coseno para el cálculo de sus factores de calibración. Estos resultados son muy similares a los obtenidos para los radiómetros de banda ancha #2 y #3.

En la figura 5.12 se constató la necesidad de obtener los factores de calibración de los radiómetros de banda ancha, ya que el proporcionado por el fabricante provocaba que los valores radiativos se alejasen de los medidos por el espectrorradiómetro Brewer. Una vez obtenidos los factores de calibración más adecuados para cada radiómetro se representa, para el mismo día que en la figura anterior, los datos proporcionados por el instrumento de referencia y los dados por los tres radiómetros (figura 5.17). Se observa cómo los nuevos factores de calibración consiguen que los tres

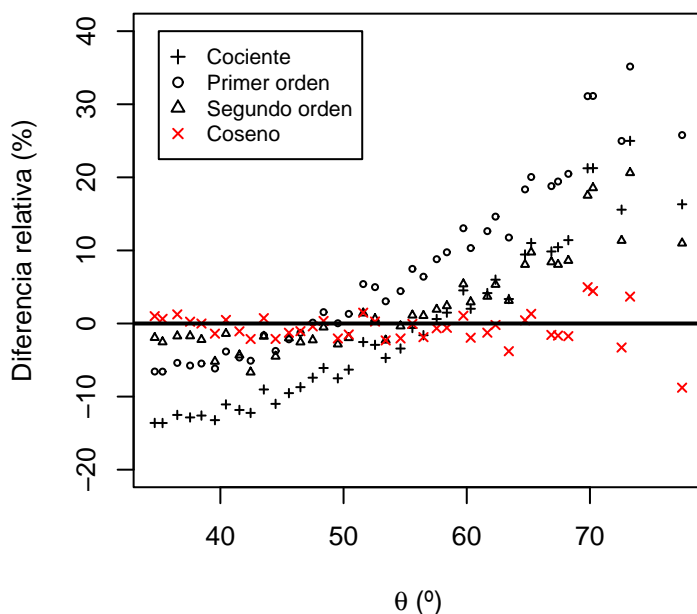


Figura 5.15: Diferencias relativas entre la irradiancia UV medida por el espectrorradiómetro Brewer y la registrada por el radiómetro #1 empleando los factores de calibración obtenidos mediante los cuatro modelos de un paso. Campaña 2003.

radiómetros proporcionen valores de irradiancia UV eritemática muy similares entre sí, y además reproduzcan notablemente los valores radiativos del espectrorradiómetro Brewer. Al mediodía solar las diferencias entre el espectrorradiómetro Brewer y cada radiómetro son inferiores al 1%. Estas diferencias eran superiores al 40% cuando empleamos el factor dado por el fabricante. Por tanto, los factores de calibración calculados mediante el modelo del coseno consiguen una excelente aproximación a los valores radiativos proporcionados por el instrumento de referencia.

5.7. Método de calibración de dos pasos

La OMM considera a este método como el de referencia para el cálculo de los factores de calibración de los radiómetros de banda ancha, siempre que se disponga de toda la información necesaria para su aplicación (Bais et al., 1999). Este método de calibración es más complejo que los modelos de un paso analizados en las secciones

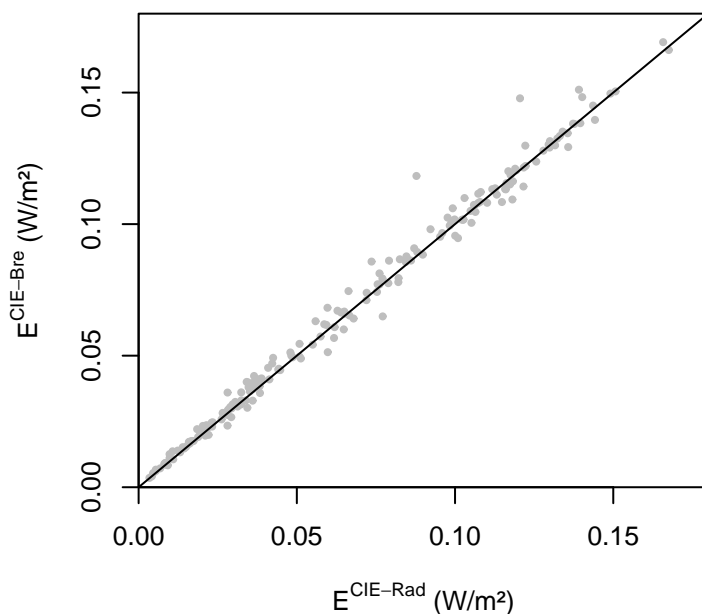


Figura 5.16: Valores de irradiancia UV medidos por el instrumento Brewer frente a los medidos por el radiómetro #1 utilizando los factores de calibración generados mediante el modelo del coseno (campaña 2003).

anteriores. Así, es absolutamente necesario conocer la respuesta espectral específica de cada instrumento y tener medidas o estimaciones de la irradiancia UV espectral en un amplio rango de valores de cantidad total de ozono y ángulo cenital solar. Esta complejidad posibilita que el método de dos pasos recoja prácticamente en su totalidad las dependencias que presentan los factores de calibración de los radiómetros respecto a las dos variables mencionadas anteriormente.

5.7.1. Metodología

El nombre de este método se debe a que dichos factores se obtienen mediante dos etapas bien diferenciadas.

En primer paso consiste en aplicar la función respuesta específica de cada radiómetro (*función propia*) a los valores espectrales del espectrorradiómetro Brewer con el objetivo de obtener el factor de calibración absoluto de cada instrumento (K). Siempre que la función propia esté perfectamente caracterizada, el factor K debe ser

Tabla 5.8: Resultados de la validación de los factores de calibración obtenidos mediante el modelo coseno. Campañas 2001, 2003 y 2005

Rad.	<i>Pendiente</i>	<i>SE(Pendiente)</i>	R^2	<i>MBE (%)</i>	<i>MABE (%)</i>
#1	0,973	0,007	0,998	-0,4	3,3
#2	0,982	0,005	0,999	-2,0	3,2
#3	0,987	0,004	0,999	-2,1	2,9
#1	0,998	0,007	0,991	-2,4	5,0
#2	0,998	0,007	0,991	-2,4	4,9
#3	0,993	0,007	0,991	-2,6	5,2
#1	0,993	0,005	0,995	-0,6	3,7
#2	0,995	0,005	0,996	-0,6	3,3
#3	0,991	0,005	0,995	-1,1	4,0

totalmente independiente de las variaciones de cantidad total de ozono y ángulo cenital solar. Este factor K se estima como la pendiente resultante de la regresión lineal entre el voltaje de salida de los radiómetros y la irradiancia UV calculada a partir de la integración de los valores espectrales proporcionados por el espectrorradiómetro Brewer pesados con la función propia del radiómetro ($E^{Bre-Propia}$). Esto es:

$$E^{Bre-Propia} = K \cdot V. \quad (5.31)$$

Si la función propia fuera idéntica a la función CIE, el factor K sería el factor de calibración de los radiómetros de banda ancha. Sin embargo, ambas funciones no coinciden (figura 3.2), siendo necesario obtener un factor que informe sobre la relación existentes entre las irradiancias UV obtenidas utilizando las dos funciones peso. Así, el segundo paso de este método de calibración consiste, inicialmente, en estimar valores de irradiancia UV espectral mediante un modelo de transferencia radiativa. Posteriormente, se calcula la irradiancia UV propia ($E^{Mod-Propia}$) y la irradiancia UV eritemática ($E^{Mod-CIE}$) pesando dichos valores espectrales con la función propia y la función CIE, respectivamente. El cociente de las dos irradiancias presenta una clara dependencia con el ángulo cenital solar y la cantidad de ozono. Así, es posible construir una matriz de calibración C que recoja estas dependencias:

$$C_i([O_3], \theta) = \frac{E_i^{Mod-CIE}}{E_i^{Mod-Propia}}. \quad (5.32)$$

El modelo de transferencia utilizado es el UVSpec/libRadtran con valores de ángulo cenital solar entre 0° y 90° con paso de 5° y valores de cantidad de ozono entre 200

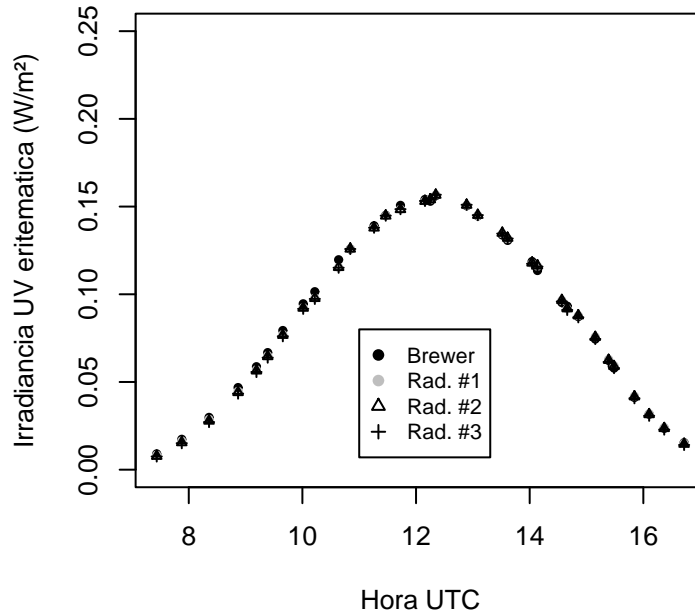


Figura 5.17: Evolución de la irradiancia UV eritemática obtenida mediante el espectrorradiómetro Brewer y la medida por cada uno de los tres radiómetros, utilizando los factores de calibración obtenidos mediante el modelo del coseno (de un paso) para el día 27 de septiembre de 2003.

y 400 UD, en intervalos de 10 UD.

Finalmente, el factor de calibración eritemático (F) se obtiene como el producto de la matriz C por el factor absoluto K :

$$F_i([O_3], \theta) = K \cdot C_i([O_3], \theta). \quad (5.33)$$

El factor adimensional C proporciona información de las diferencias existentes entre las irradiancias UV obtenidas mediante las dos funciones peso. Los dos principales factores de los que depende C son la cantidad total de ozono y el ángulo cenital solar. Para cada pareja de valores ($[O_3], \theta$) tendremos un coeficiente C distinto, y por tanto, un factor de calibración F diferente.

En marzo de 2004, se obtuvieron las funciones respuestas propias de cada radiómetros de banda ancha en el laboratorio de calibración que la empresa Kipp & Zonen tiene en Delft (Holanda). Es conocido que estas funciones respuesta varían con el transcurso del tiempo. Por tanto, en este trabajo se ha decidido utilizar el

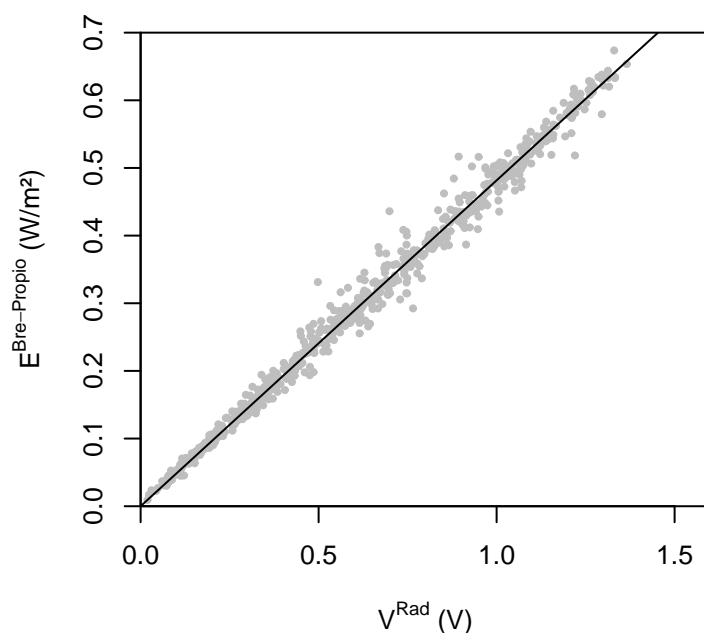


Figura 5.18: Factor de calibración absoluto K del radiómetro #1. Campaña 2003.

método de dos pasos con los datos registrados durante la campaña de calibración del año 2003, por ser la más próxima a la fecha de la caracterización de las respuestas espectrales propias de los instrumentos.

5.7.2. Resultados

Siguiendo los pasos descritos anteriormente, en primer lugar, se realiza el ajuste lineal entre la irradiancia UV propia y el voltaje de salida de cada uno de los tres radiómetros (ecuación 5.31). Esta regresión se ha realizado con el conjunto de datos independientes que se han empleado en la obtención de los factores de los modelos de un paso. Los resultados se muestran en la tabla 5.9 con las pendientes de cada una de las rectas de ajuste, las cuales definen la constante de calibración absoluta (K), correspondiente a cada instrumento. Además, en dicha tabla se presentan los errores estándar de los factores y los coeficientes R^2 y $RMSE$.

A modo de ejemplo, en la figura 5.18, se representa la irradiancia UV propia frente a la señal de salida del radiómetro #1. A esta figura se le ha añadido la recta de regresión.

Tabla 5.9: Resultados de la regresión entre la irradiancia UV propia obtenida mediante el espectrorradiómetro Brewer y la señal de salida de cada radiómetro. Campaña 2003.

Radiómetro	K (W/m ² V)	$SE(K)$ (W/m ² V)	R^2	$RMSE$ (W/m ²)
#1	0,4816	0,0009	0,997	0,0172
#2	0,5069	0,0009	0,997	0,0177
#3	0,3858	0,0007	0,998	0,0178

Posteriormente, se calcula la matriz adimensional C utilizada en la ecuación 5.33 para determinar el factor de calibración F de los radiómetros de banda ancha.

En la figura 5.19 se muestra la evolución de la matriz C para distintos casos de cantidad total de ozono y ángulo cenital solar, correspondiente al radiómetro #1. Se observa que los valores de C son siempre inferiores a la unidad. Este hecho indica que los valores de irradiancia UV propia son mayores a los de irradiancia UV eritemática para cualquier condición de ángulo cenital solar y cantidad de ozono. Además, para valores bajos de estas dos variables se obtienen las estimaciones más altas de la matriz C , es decir, las medidas de irradiancia UV eritemática y propia serán más parecidas. Por otra parte, se observa que, para cualquier valor de cantidad de ozono, a medida que aumenta el ángulo cenital solar, los valores de C disminuyen. Además, la dependencia de estos valores con el ozono es negativa, es decir, mayor ozono implica un menor valor de C . Finalmente, en la figura anterior también se observa cómo, para ángulos cenitales bajos, la dependencia de la matriz C con la cantidad de ozono es mucho mayor que para ángulos elevados, donde las curvas llegan prácticamente a unirse. Esto es, variaciones importantes de ozono para ángulos altos no modifican sustancialmente los valores radiativos generados a partir de las dos funciones peso.

Los factores de calibración obtenidos por el método de dos pasos vendrán dados por la ecuación 5.33, siendo K la constante absoluta determinada anteriormente (tabla 5.9) y C la matriz obtenida mediante el modelo de transferencia radiativa. Como ejemplo, para obtener la irradiancia UV eritemática dada por el radiómetro #1, el voltaje de salida V debe ser multiplicado por el correspondiente factor F representado en la figura 5.20.

5.7.3. Validación del método de dos pasos

Una vez detallada la metodología seguida en el método de dos pasos, se realiza la validación del mismo. Para ello, se utiliza un conjunto de datos diferente al usado en el proceso de cálculo de los factores de calibración. Así, se han empleado los mismos

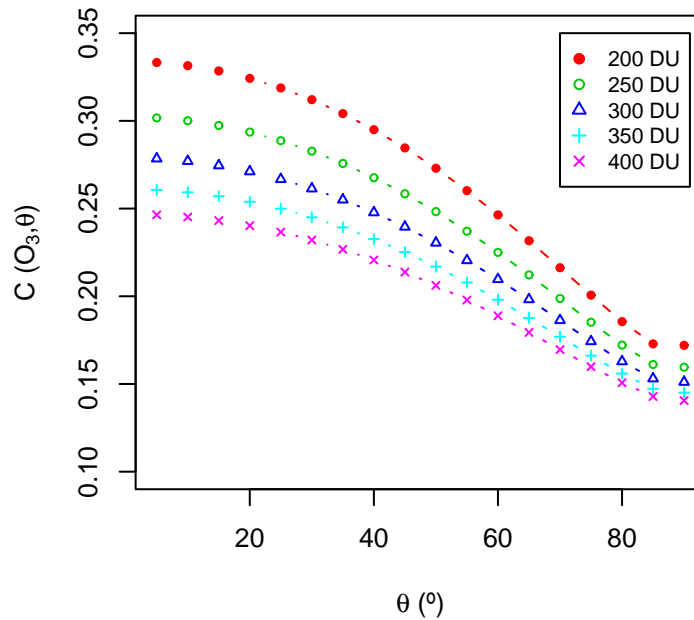


Figura 5.19: Factor de conversión adimensional C como función del ángulo cenital para distintos valores de cantidad total de ozono.

valores utilizados en la validación del modelo de un paso seleccionado como más apropiado para la campaña 2003 (sección 5.6.4). Además, para validar el método de dos pasos, son necesarios los datos de cantidad total de ozono registrados por el espectrorradiómetro Brewer durante dicha campaña.

La tabla 5.10 muestra los resultados obtenidos al realizar la regresión entre los valores $E^{Rad-CIE}$ y las medidas $E^{Bre-CIE}$ proporcionados por el espectrorradiómetro Brewer para cada radiómetro (campaña 2003). Las pendientes de las rectas de ajuste están próximas a la unidad y los tres coeficiente R^2 son superiores a 0,99. Este hecho muestra la excelente bondad de la regresión. Además, el parámetro $MABE$ tiene un valor cercano al 5% para los tres radiómetros, mostrando que las diferencias entre las medidas de los radiómetros y las proporcionadas por el instrumento de referencia son pequeñas. Los valores del estadístico MBE se encuentran alrededor del -2% . El signo negativo indica que el método de dos pasos provoca que los valores de los radiómetros subestimen ligeramente los datos dados por el espectrorradiómetro Brewer en término medio.

En la figura 5.21 se muestran los valores de irradiancia UV eritemática propor-

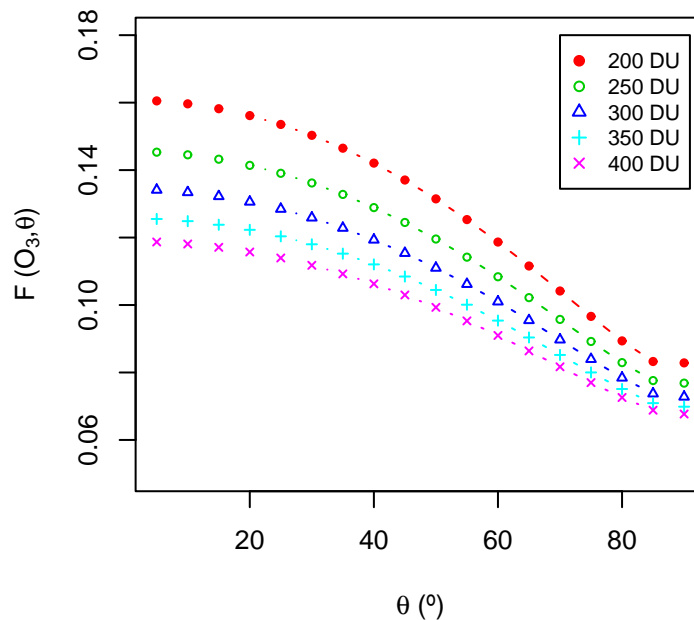


Figura 5.20: Factor de calibración del radiómetro #1 obtenido mediante el método de dos pasos en función del ángulo cenital solar para distintos valores de cantidad total de ozono. Campaña 2003.

cionados por el espectrorradiómetro Brewer frente a los medidos por el radiómetro #1 utilizando los factores de calibración obtenidos mediante el método de dos pasos (campaña 2003). Se observa claramente como los puntos representados se encuentran distribuidos en torno a la recta de pendiente unidad. Por tanto, el método de dos pasos consigue un notable acuerdo entre los datos del radiómetro y los dados por el instrumento Brewer de referencia. Estos resultados son análogos a los obtenidos para los radiómetros #2 y #3.

5.8. Comparación entre el método de un paso seleccionado y el método de dos pasos

En esta sección se realiza la comparación entre el modelo seleccionado como más apropiado de entre los que siguen la metodología de un paso (modelo del coseno) y el método de dos pasos, que como se ha comentado, es el método de referencia para la

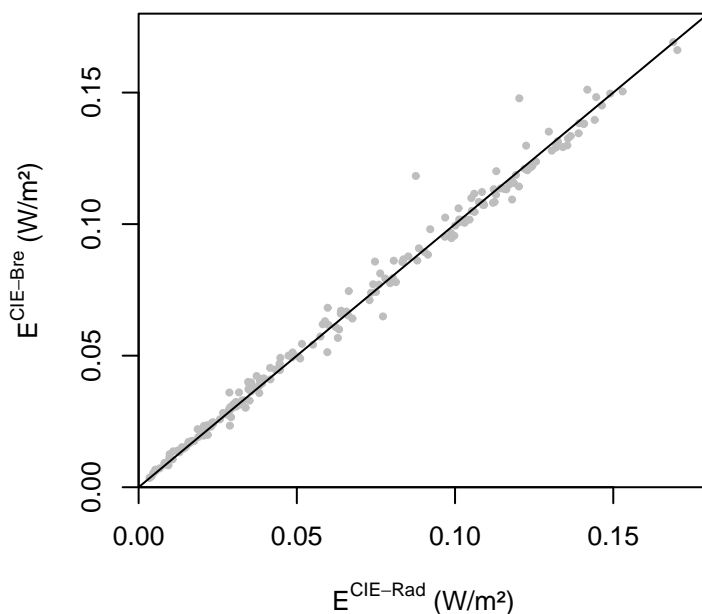


Figura 5.21: Irradiancia UV eritmática medida por el espectrorradiómetro Brewer frente a la medida por el radiómetro #1 utilizando los factores de calibración obtenidos por el método de dos pasos (campana 2003).

calibración de los radiómetros de banda ancha. Para ello, tomamos los 199 casos seleccionados para la validación de los métodos de uno y dos pasos en la campaña 2003. En la figura 5.22 se representan los valores $E^{Rad-CIE}$ calculados mediante los factores generados por el modelo del coseno, E_{1paso} , con los valores $E^{Rad-CIE}$ calculados mediante el método de dos pasos, E_{2pasos} . Se observa la notable relación existente entre los valores representados, siendo la dispersión muy baja. Además, tanto los valores altos como bajos se encuentran situados en torno a la recta de pendiente unidad, representada también en la gráfica.

En valor medio, las diferencias relativas entre los valores radiativos E_{1paso} y E_{2pasos} son del 1,4%. Esto indica el alto grado de aproximación entre los datos al emplear uno u otro método de calibración.

Aunque el método de dos pasos proporciona resultados algo más próximos a los valores de referencia, tiene algunas desventajas que hacen que su uso esté menos extendido. En primer lugar, necesita información de la cual no se dispone habitualmente en las estaciones de medida como la estimación precisa de la respuesta espec-

Tabla 5.10: Resultados de la validación de los factores de calibración obtenidos mediante el método de dos pasos. Campaña 2003

Rad.	<i>Pendiente</i>	<i>SE(Pendiente)</i>	R^2	<i>MBE (%)</i>	<i>MABE (%)</i>
#1	0,987	0,007	0,991	-1,9	4,8
#2	0,979	0,006	0,992	-3.3	5,4
#3	0,985	0,007	0,991	-2.8	5,2

tral específica de los radiómetros. Esta respuesta solamente la pueden proporcionar laboratorios perfectamente equipados como el ESAAt en España. En segundo lugar, la aplicación del método de dos pasos requiere conocer la cantidad total de ozono simultánea a cada medida radiativa. Finalmente, debido a que las campañas de intercomparación se realizan durante un corto periodo de tiempo, son necesarias las estimaciones de irradiancia espectral proporcionadas por un modelo de transferencia radiativa para un amplio rango de condiciones de ozono y ángulo cenital solar. El empleo de un cierto código de transferencia radiativa y la asignación de diversos parámetros atmosféricos en el modelo podrían introducir dependencias no deseadas en los factores de calibración, limitando, por tanto, su aplicabilidad.

En cambio, el método de un paso no requiere ninguna de las informaciones adicionales detalladas en el párrafo anterior. Por tanto, su uso, en general, se prefiere en las calibraciones de los radiómetros de banda ancha (Bodhaine et al., 1998; Leszczynsky et al., 1998). Por tanto, al obtener unas diferencias relativas entre los dos métodos inferiores al 2% y dada la complejidad del método de dos pasos, consideramos al método de un paso del coseno muy apropiado para el cálculo de los factores de calibración de los radiómetros de banda ancha.

5.9. Estabilidad en la medida de los radiómetros

El hecho de haber realizado tres campañas de calibración durante el periodo 2001-2005, permite analizar la variación que experimentan con el tiempo los factores de calibración obtenidos mediante el método del coseno. Así, en la figura 5.23 se muestra, para los tres radiómetros, la variación del factor FC_{c1} (izquierda) y FC_{c2} (derecha) a lo largo de las tres campañas de calibración.

Por una parte, se observa que el factor FC_{c1} , para los instrumentos #1 y #2, presenta una disminución prácticamente lineal. Las diferencias relativas entre los valores numéricos de los factores de las campañas 2001-2003 y 2003-2005 fueron, para el radiómetro #1 de -13,5% y de -23,4%, respectivamente y para el radiómetro #2 del -22,1% y -29,6%. Además, la figura muestra que, a medida que transcurre el

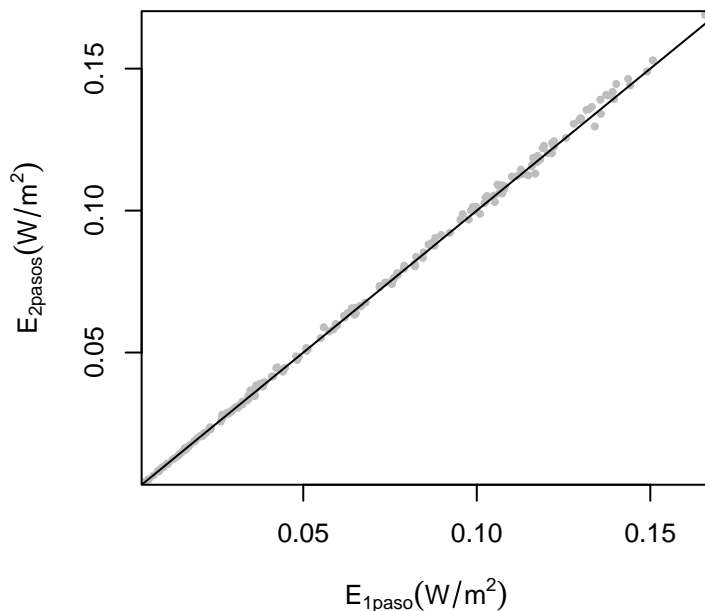


Figura 5.22: Valores de irradiancia UV eritemática obtenidos por el radiómetro #1 empleando el método de un paso (modelo del coseno) frente a los valores radiativos obtenidos utilizando el método dos pasos. Campaña 2003.

tiempo, los valores de los factores FC_{c1} de esos radiómetros se aproximan entre sí. En cambio, el radiómetro #3 muestra para el factor FC_{c1} , un descenso del $-20,0\%$ entre las campañas 2001 y 2003, para posteriormente mantener su valor prácticamente constante entre 2003-2005 (diferencia del $-1,2\%$).

Por otra parte, el comportamiento del factor FC_{c2} muestra también una mayor similitud entre los radiómetros #1 y #2. En este caso, a medida que transcurre el tiempo, el factor FC_{c2} incrementa su valor para ambos radiómetros, tendiendo también a aproximarse. Para el instrumento #1, las diferencias entre las campañas 2001-2003 y 2003-2005 fueron del $24,5\%$ y $19,0\%$, mientras que para el radiómetro #2 las diferencias fueron del $96,9\%$ y $51,7\%$, respectivamente. Por el contrario, el radiómetro #3 presenta un descenso en el factor FC_{c2} del $-15,7\%$ y $-37,2\%$ y, por tanto, una menor dependencia temporal.

Estas diferencias en los factores de calibración de los radiómetros se podrían explicar por las variaciones que experimentan las respuestas espectrales de los instrumentos con el tiempo debidas, principalmente, a su envejecimiento. Además se observa

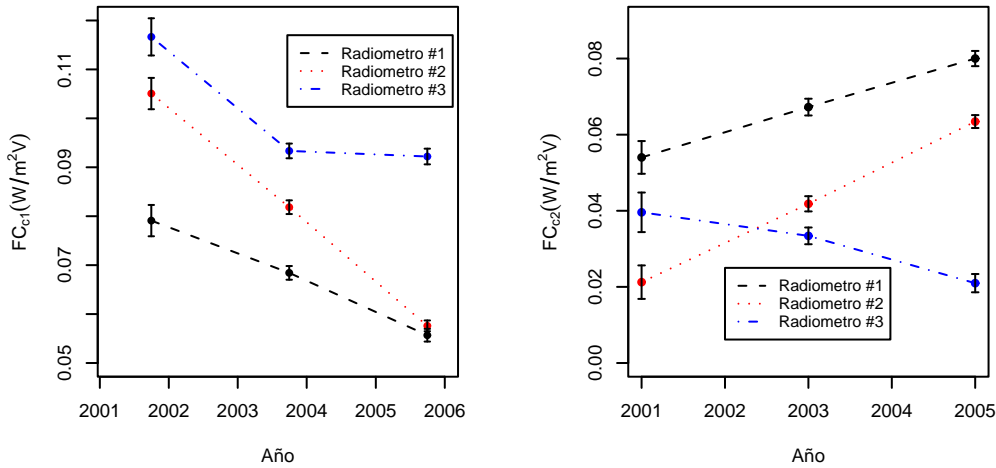


Figura 5.23: Izquierda: Variación temporal del factor de calibración FC_{c1} correspondiente a cada uno de los tres radiómetros durante el periodo 2001-2005. Derecha: Idem para el factor de calibración FC_{c2}

cómo estas variaciones afectan de manera distinta a cada uno de los radiómetros (WMO, 1996). Así, los instrumentos #1 y #2 presentan un comportamiento similar en cuanto a la variación de sus factores, mostrando incluso una aproximación en sus valores. En cambio, el instrumento #3 presenta una clara estabilización de sus factores entre las campañas 2003-2005, descendiendo, además, su dependencia con el ángulo cenital solar.

Para incidir más en el análisis de la estabilidad, se analizan las diferencias que existen entre las medidas de los radiómetros y los valores del espectrorradiómetro Brewer cuando empleamos los factores obtenidos en las tres campañas. Para ello, consideramos los 169 pares de casos utilizados en la validación de la campaña 2005. Inicialmente, a los 169 voltajes de salida de cada radiómetro, se les aplica los factores de calibración obtenidos mediante el modelo del coseno correspondientes a cada una de las tres campañas que se recogen en la tabla 5.7. Posteriormente, calculamos el parámetro $MABE$ a partir de las diferencias entre las 169 medidas del espectrorradiómetro Brewer y los valores radiativos obtenidos por los tres radiómetros. Así, para cada instrumento, se obtendrán tres estadísticos $MABE$ asociados a los factores de calibración de cada una de las tres campañas. Todos los parámetros calculados se muestran en la tabla 5.11. Se observa que los parámetros $MABE$ 2005, obtenidos a partir de los factores de calibración de esa campaña, son los más pequeños. Ello es lógico ya que en esta comparación se están tomando como referencia casos

correspondientes a la campaña 2005.

Si se comparan los parámetros obtenidos a partir de los factores de las campañas 2003 y 2001, se comprueba que las desviaciones más pequeñas respecto al espectrorradiómetro Brewer las presenta el radiómetro #1, tanto con los factores de 2001 como con los de 2003. Esto hace que consideremos a este instrumento (el correspondiente a la estación de medida de Badajoz) como el radiómetro UV más estable de la Red Regional de Medida de la Radiación Solar en Extremadura.

Tabla 5.11: Parámetros MABE obtenidos al aplicar los factores de calibración de cada campaña a los casos seleccionados en la validación de la campaña 2005.

Radiómetro	MABE 2001 (%)	MABE 2003 (%)	MABE 2005 (%)
#1	9,8	6,7	3,7
#2	26,3	13,3	3,3
#3	32,0	7,8	4,0

5.10. Dependencia temporal de los factores de calibración

En la sección anterior se ha comprobado que existen importantes variaciones en los factores de calibración de los radiómetros con el transcurso del tiempo. Así, con el objetivo de impedir que existan cambios bruscos en los factores de calibración de los instrumentos y, por tanto, en los valores radiativos proporcionados por éstos, se proponen expresiones matemáticas que recojan la dependencia temporal de dichos factores.

En este trabajo se considera que los factores de calibración de los radiómetros UV tienen una variación lineal minutaria entre dos campañas consecutivas. Esta hipótesis es válida siempre que las características de los instrumentos se mantengan constantes con el tiempo. Además, se considera que los factores de calibración permanecen constantes desde el inicio de medidas hasta la realización de la primera campaña de calibración (septiembre 2001) y desde la última campaña (septiembre 2005) hasta diciembre de 2005.

Siguiendo lo descrito en el párrafo anterior, entre la campaña 2001 y 2003, se toma como minuto uno, el primer minuto después de medianoche del día en el que se instalaron los radiómetros después de finalizada la campaña 2001 (2 de octubre de 2001). A este día se le asignan los factores de calibración obtenidos en esa campaña. Los factores variarán con el transcurso del tiempo hasta llegar al minuto 1026720,

correspondiente a las 23:59 horas del 14 de septiembre de 2003 (último día en el que permanecieron los radiómetros en sus emplazamientos antes de desmontarlos y enviarlos a la campaña 2003). A ese último minuto se le asignan los factores obtenidos en la campaña 2003. Así, por ejemplo, las expresiones mediante las que obtenemos los factores de calibración del radiómetro #1 entre las campañas 2001 y 2003 serán:

$$FC_{c1} = (0,0791 \pm 0,0032) - (1,04 \pm 0,45) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.34)$$

$$FC_{c2} = (0,0540 \pm 0,0043) + (1,28 \pm 0,63) \cdot 10^{-8} \cdot t, \quad (5.35)$$

donde t se mide en minutos conforme a lo expresado en el párrafo anterior.

Se actúa del mismo modo para estimar los factores de calibración entre las campañas 2003 y 2005. Así, asignamos como minuto uno a las 00:00 horas del 25 de octubre de 2003 (primer día en el que se instalaron los radiómetros después de concluida la campaña de ese año), mientras que el último será el correspondiente a las 23:59 horas del 28 de septiembre de 2005 (minuto 1015200). En este caso, las expresiones empleadas para obtener los factores entre esas dos fechas correspondientes al radiómetro #1 fueron:

$$FC_{c1} = (0,0684 \pm 0,0014) - (1,25 \pm 0,26) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.36)$$

$$FC_{c2} = (0,0672 \pm 0,0022) + (1,26 \pm 0,41) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.37)$$

A los datos posteriores a la calibración 2005, se le asignarán los factores de calibración obtenidos en dicha campaña.

De forma análoga, para el radiómetro #2 se tendrá:

- Entre la campaña 2001 y 2003:

$$FC_{c1} = (0,1051 \pm 0,0032) - (2,26 \pm 0,45) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.38)$$

$$FC_{c2} = (0,0212 \pm 0,0044) + (2,01 \pm 0,62) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.39)$$

- Entre la campaña 2003 y 2005:

$$FC_{c1} = (0,0818 \pm 0,0014) - (2,39 \pm 0,25) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.40)$$

$$FC_{c2} = (0,0418 \pm 0,0020) + (2,13 \pm 0,36) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.41)$$

Finalmente, para el radiómetro #3, se ha obtenido:

- Entre la campaña 2001 y 2003:

$$FC_{c1} = (0,1166 \pm 0,0038) - (2,27 \pm 0,52) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.42)$$

$$FC_{c2} = (0,0396 \pm 0,0052) - (0,61 \pm 0,72) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.43)$$

- Entre la campaña 2003 y 2005:

$$FC_{c1} = (0,0933 \pm 0,0015) - (1,12 \pm 0,31) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.44)$$

$$FC_{c2} = (0,0334 \pm 0,0022) - (1,22 \pm 0,45) \cdot 10^{-8} \cdot t. \quad (5.45)$$

Capítulo 6

VARIABLES DE LOS MODELOS

6.1. Introducción

En este capítulo se realiza un detallado análisis de las variables que forman parte de los distintos modelos empíricos propuestos en este trabajo. En primer lugar, se describe la *transmisividad UV eritemática*, utilizada como variable dependiente en todos los modelos empíricos estudiados. Esta variable caracteriza la atenuación que experimenta la radiación solar UV al atravesar la atmósfera. Por tanto, estará estrechamente relacionada con los principales factores que intervienen en la variabilidad que dicha radiación presenta en la superficie terrestre.

En este trabajo se han considerado los cuatro factores principales que modulan la intensidad de la radiación UV medida en superficie: nubosidad, ozono, altura solar y aerosoles. La influencia que ejercen estos cuatro factores sobre la radiación solar UV medida en superficie es descrita mediante tres variables independientes:

1. El *índice de claridad*, caracteriza la transmisividad solar global, cuyo principal modulador es la nubosidad existente en el momento de medida de la radiación UV. Además, este índice recoge también las variaciones que experimenta el contenido de aerosoles atmosféricos. El índice de claridad se calcula a partir de medidas de irradiancia solar global simultáneas a las medidas de la radiación UV.
2. La *cantidad de ozono*, obtenida a partir de las estimaciones realizadas por el instrumento satelital TOMS, caracteriza la cantidad total de este gas integrada en toda la columna.
3. La *masa óptica del aire*, describe la fluctuación de la radiación solar medida en superficie, debida a las variaciones en el camino óptico atravesado por la radiación dentro de la atmósfera. En este capítulo se analizan cuatro expresiones ampliamente utilizadas en el cálculo de esta variable geométrica, seleccionando la expresión más adecuada.

6.2. Transmisividad ultravioleta eritemática

En el capítulo 2 se ha explicado cómo la radiación solar UV extraterrestre sufre importantes procesos combinados de absorción y dispersión al atravesar la atmósfera. Este hecho produce que la cantidad de radiación solar UV que alcanza la superficie terrestre sea, en general, sensiblemente inferior a la que llega al tope de la atmósfera. Por tanto, es posible definir una variable que tenga en cuenta la modulación que experimenta la radiación UV en su camino a través de la atmósfera hasta alcanzar la superficie terrestre. En este sentido, se define la transmisividad de flujo de radiación solar UV eritemática, a la que llamaremos, *transmisividad UV eritemática* (T_{UV}) como:

$$T_{UV} = \frac{E_{UV}}{E_{UV}^{TOA}}, \quad (6.1)$$

siendo E_{UV} la irradiancia UV eritemática registrada en una localización en superficie y E_{UV}^{TOA} la irradiancia UV eritemática extraterrestre, es decir, fuera de la atmósfera, para las mismas condiciones de latitud y longitud que dicha localización.

La irradiancia UV eritemática medida por un radiómetro UV de banda ancha se obtiene integrando la irradiancia solar espectral (E_λ) para el intervalo de longitudes de onda en que mide dicho radiómetro:

$$E_{UV} = \int_{280}^{400} E_\lambda R_\lambda d\lambda, \quad (6.2)$$

donde R_λ es la función de respuesta espectral del radiómetro. En el caso de radiación eritemática, esta función simula la acción de la radiación solar sobre la piel humana. El efecto más habitual de la radiación solar UV es la quemadura de la piel, también conocida como eritema. Así, la función de respuesta espectral que caracteriza a los radiómetros UV de banda ancha se denomina función de respuesta eritemática.

Aunque la integral 6.2 se extiende teóricamente a todo el espectro ultravioleta, en la práctica, el producto $E_\lambda \cdot R_\lambda$ presenta valores no nulos aproximadamente entre 280 y 400 nm. El límite inferior se debe a la acción del oxígeno y ozono, ya que por debajo de 280 nm estos gases absorben la totalidad de la radiación solar UV. El límite superior viene condicionado por el rápido descenso del efecto de la radiación sobre la piel al aumentar la longitud de onda, siendo el valor de la función respuesta prácticamente nulo por encima de los 400 nm (figura 3.2).

En cuanto a la irradiancia UV extraterrestre su valor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{UV}^{TOA} = S_{UV} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta, \quad (6.3)$$

donde:

- θ es el ángulo cenital solar que depende de las coordenadas del lugar de medida, día del año y hora de registro.
- $\left(\frac{r_0}{r}\right)^2$, es el factor de corrección debido a la excentricidad que presenta la órbita terrestre, siendo r la distancia variable sol-tierra y r_0 la distancia media sol-tierra a lo largo de un año. Este factor de corrección se calcula mediante la expresión propuesta por J.W. Spencer en 1971 (Iqbal, 1983), la cual depende exclusivamente del día del año (d):

$$\begin{aligned} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = & 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos \Gamma + 0,00128 \cdot \sin \Gamma + \\ & + 0,000719 \cdot \cos(2 * \Gamma) + 0,000077 \cdot \sin(2 * \Gamma), \end{aligned} \quad (6.4)$$

donde:

$$\Gamma = 2\pi \frac{(d - 1)}{365}. \quad (6.5)$$

- S_{UV} es el parámetro o constante solar correspondiente a la irradiancia UV eritemática. Se define como la cantidad de irradiancia UV eritemática que incide sobre la unidad de área expuesta perpendicularmente a los rayos solares fuera de la atmósfera a la distancia media sol-tierra. Esta constante se ha calculado a partir de la expresión 6.2, considerando la variable E_λ como la irradiancia espectral solar extraterrestre dada por Frohlich y Wherli (Iqbal, 1983) y R_λ la función de respuesta CIE. El valor obtenido es $S_{UV} = 10,031 \text{ Wm}^{-2}$, aproximadamente un 0,73% del valor de la constante solar correspondiente al espectro solar completo.

En este trabajo se ha decidido emplear la transmisividad de flujo radiativo en lugar de la irradiancia medida en la superficie terrestre como variable dependiente en todas las expresiones empíricas. Esta elección permite separar la variación de la radiación debida a los cambios en la geometría de la iluminación de la Tierra (los cuales corresponden a fluctuaciones periódicas bien conocidas teóricamente) de los procesos de atenuación de la radiación dentro de la atmósfera, y centrar los modelos en éstos últimos. No obstante, una vez obtenida la expresión empírica final, la estimación de los valores de irradiancia UV es inmediata.

En la figura 6.1 se representa la evolución temporal de la transmisividad UV eritemática media diaria en las tres estaciones de medida. Se representa, además, la media móvil con una amplitud de ventana de 20 días, que elimina gran parte de las fluctuaciones de periodo corto debidas fundamentalmente a cambios en la nubosidad. Estas curvas muestran un evidente ciclo anual, el cual depende de:

- El rango de ángulos cenitales solares alcanzados durante cada día. Así, por ejemplo, a mayor ángulo medio, mayor camino recorrido por la radiación dentro

de la atmósfera. Esto produce una mayor atenuación de la radiación y, por tanto, un menor valor de la transmisividad UV.

- Los ciclos anuales de variación de los constituyentes atmosféricos que interactúan con la radiación UV. Por ejemplo, el ozono tiene un claro ciclo anual de variación con valores máximos en primavera y mínimos en otoño.

Aparte del análisis de la evolución temporal de la transmisividad UV, resulta de interés el estudio de la frecuencia de los valores de dicha variable. En la figura 6.2 se muestran los histogramas de los valores de la transmisividad UV media diaria correspondientes al periodo de estudio en cada estación. Los valores oscilan entre 0 y 0,022. Se observa que la función de distribución de la frecuencia de valores es asimétrica y bimodal. El primer máximo relativo, con valores intermedios de T_{UV} , entre 0,008 y 0,010, atribuible principalmente a los días despejados de invierno (en Extremadura es una situación muy común), y a los parcialmente nublados de primavera y otoño. El segundo máximo, con valores entre 0,015 y 0,017, debido a los días con nula nubosidad en las estaciones de primavera y verano, principalmente.

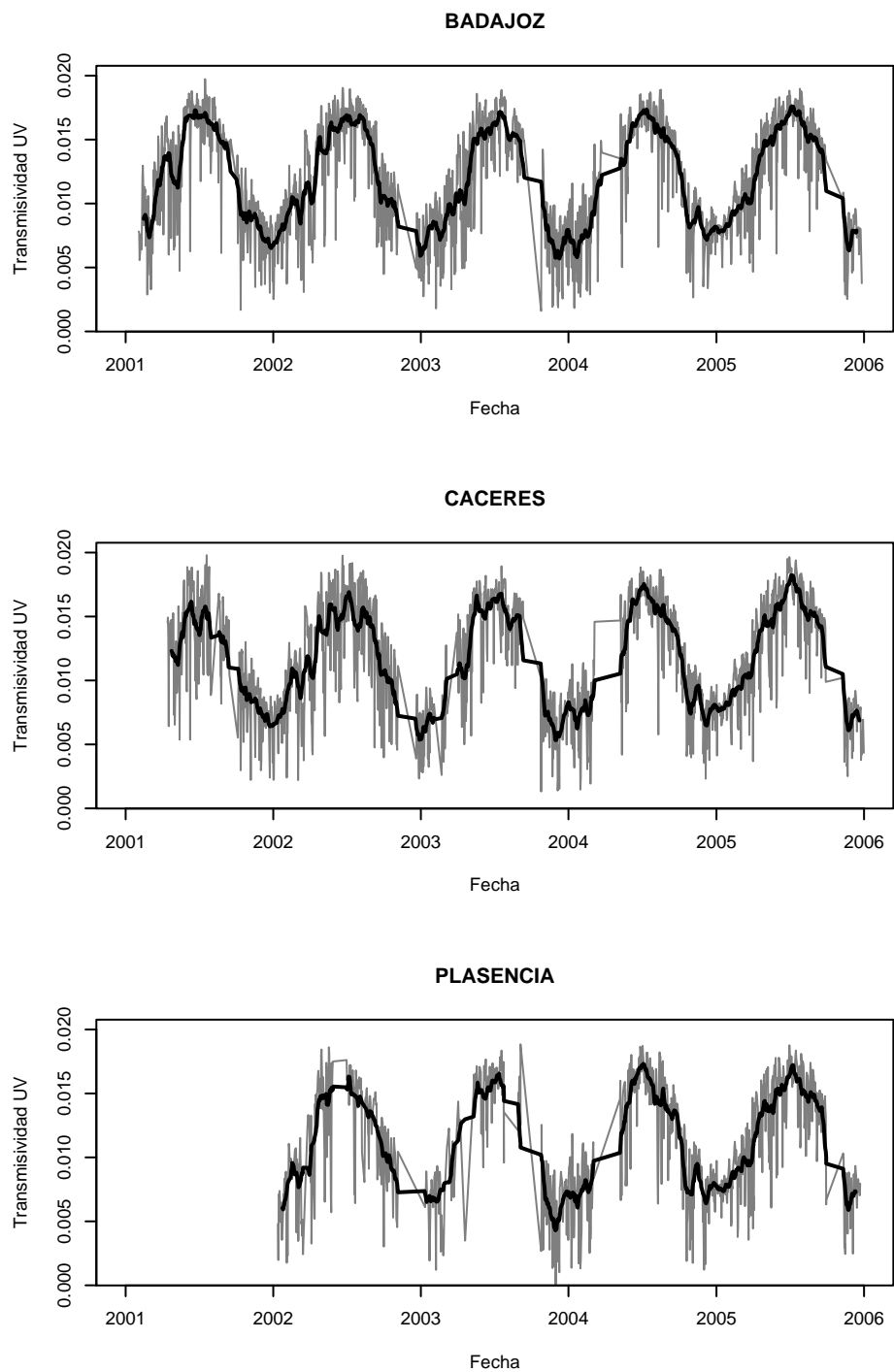


Figura 6.1: Evolución de los valores medios diarios de la transmisividad UV en Badajoz, Cáceres y Plasencia.

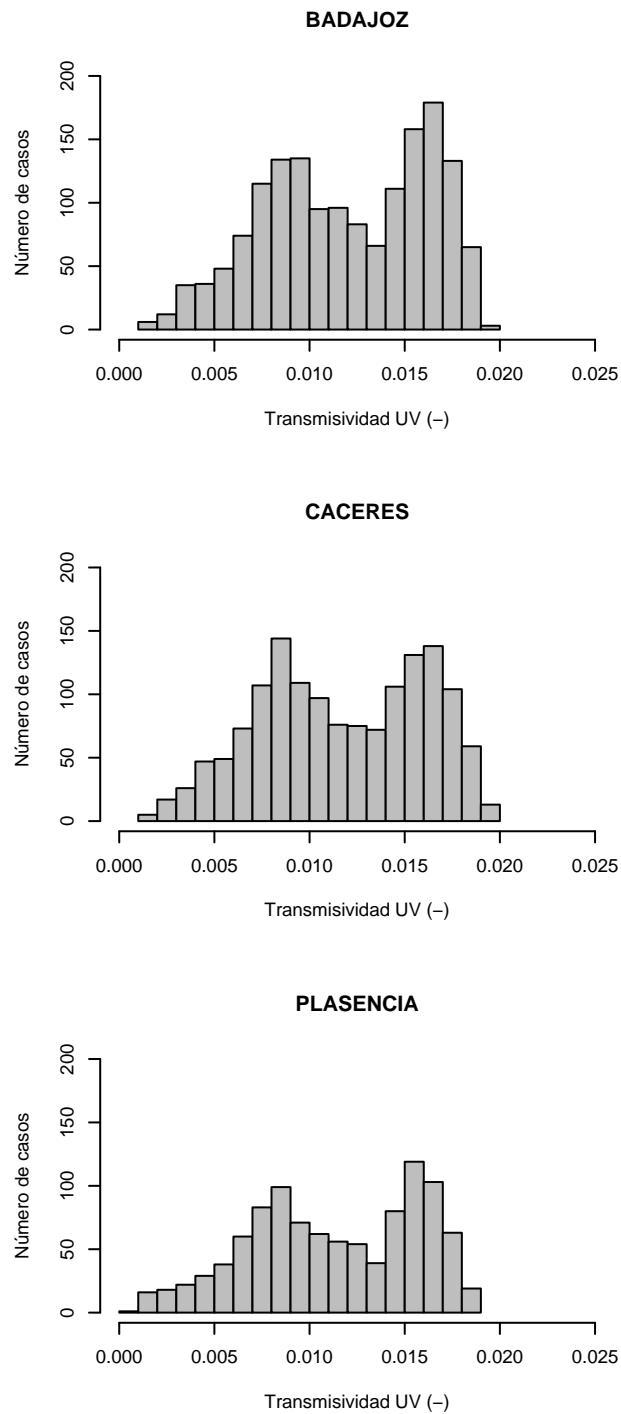


Figura 6.2: Histograma de frecuencias absolutas de los valores medios diarios de la transmisividad UV en Badajoz, Cáceres y Plasencia.

6.3. Índice de claridad

Se define la transmisividad solar atmosférica de flujo como el cociente entre la irradiancia solar global E (radiación solar integrada para toda longitud de onda) medida en superficie y la irradiancia extraterrestre E^{TOA} . Esto es:

$$K_t = \frac{E}{E^{TOA}}. \quad (6.6)$$

Esta variable, conocida como *índice de claridad*, describe globalmente los procesos de atenuación por absorción y dispersión que sufre la radiación solar en su paso por la atmósfera. Así, la utilización de este índice permite obtener una estimación aproximada del efecto conjunto que la nubosidad y la carga de aerosoles ejercen sobre las medidas de irradiancia UV eritemática.

Para obtener el índice de claridad simultáneo a las medidas de irradiancia UV, se ha instalado en cada estación, junto a los radiómetros UV de banda ancha, un piranómetro CM-6B de la firma Kipp & Zonen. Este instrumento, descrito en el capítulo 3, mide la irradiancia solar global. Por otra parte, la irradiancia solar extraterrestre se ha calculado mediante la ecuación 6.3, donde, ahora, el parámetro solar extraterrestre corresponde al espectro solar completo, teniendo un valor de $S = 1367 \text{ Wm}^{-2}$.

La existencia de nubosidad provoca que el índice de claridad sea, en general, inferior al valor que se obtendría en casos despejados. Este hecho se debe a que la nubosidad produce una notable atenuación de la radiación solar global que atraviesa la atmósfera. En este trabajo, la utilización del índice de claridad es más adecuada que el uso de otros parámetros empleados habitualmente en la caracterización de la nubosidad, como son el número de octas y la visibilidad. Este hecho se debe a la posibilidad de calcular dicho índice en cualquier instante y que su valor no depende de la inspección visual de un observador. El índice de claridad es usado por distintos autores como parámetro para la estimación de la nubosidad (Foyo-Moreno et al., 1999; Cañada et al., 2000; Murillo et al., 2003).

La carga de aerosoles atmosféricos influye notablemente en la atenuación de la radiación solar global (Iqbal, 1983). Por tanto, el índice de claridad informará también sobre la existencia de aerosoles en la atmósfera. Para analizar este comportamiento, se ha relacionado el índice de claridad con el espesor óptico de aerosoles (AOD) en 380 nm obtenido en la estación de Cáceres para el periodo comprendido entre el 25 de julio de 2005 y el 9 de octubre de 2006. Los valores de espesores ópticos de aerosoles se han calculado a partir de las medidas de radiación solar directa registradas por un fotómetro solar CIMEL instalado junto a los radiómetros de medida de radiación solar ultravioleta y global. La figura 6.3 muestra los valores del índice de claridad frente al espesor óptico de aerosoles en 380 nm, junto con la recta de ajuste. Aunque el análisis de regresión nos indica que la correlación no es buena ($R^2 = 0,42$), se

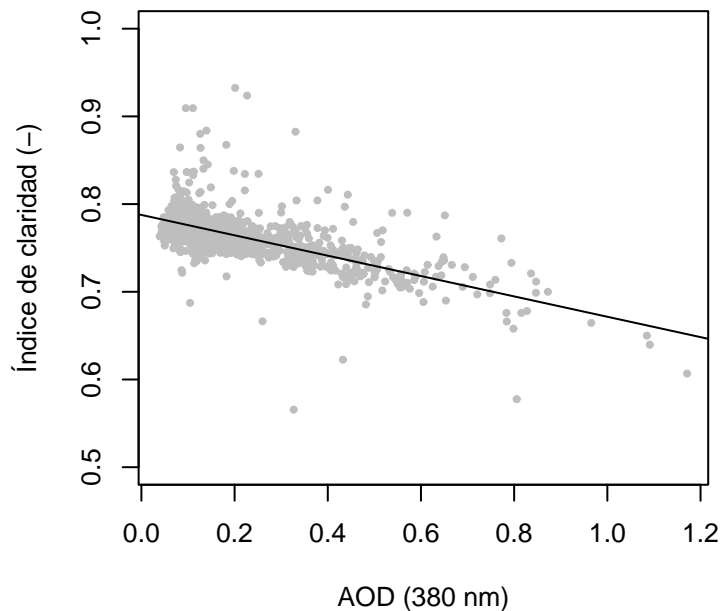


Figura 6.3: Índice de claridad frente al espesor óptico de aerosoles medido en 380 nm.

observa claramente cómo a medida que el espesor óptico de aerosoles aumenta, el índice de claridad reduce su valor. Además, cuando la carga de aerosoles es baja ($AOD < 0,1$), se obtiene un valor medio del índice de claridad de 0,78. En cambio, para una alta carga de aerosoles ($AOD > 0,6$) el valor medio del índice de claridad es 0,68, indicando una reducción de más de un 12% en dicho índice.

Es conocido que la atenuación de la radiación solar por parte de los aerosoles tiene una evidente dependencia espectral, siendo dicha atenuación más importante en la región UV (Lorente et al., 1994; Cachorro et al., 2001). Por tanto, es posible que el índice de claridad recoja sólo parcialmente esa influencia sobre la transmisividad UV eritemática. La introducción del espesor óptico de aerosoles medido en la región espectral UV como variable independiente en los modelos empíricos salvaría el problema. Sin embargo, durante el periodo de estudio de esta investigación (2001-2005), únicamente se disponen de cinco meses de datos de espesor óptico en la estación de Cáceres. Además, se ha constatado que otro posible índice que caracteriza la carga de aerosoles, como es el índice de aerosoles proporcionado por el instrumento satelital TOMS, no es estadísticamente significativo cuando se correlaciona con la transmisividad UV eritemática (Antón et al., 2005).

Por tanto, el índice de claridad contiene información aproximada, en un solo parámetro, de la nubosidad y la carga de aerosoles existente en el momento de medida de la irradiancia UV eritemática.

La figura 6.4 muestra la evolución temporal del índice de claridad medio diario, junto con su media móvil de amplitud 20 días. Se observa que dicha evolución muestra un comportamiento anual mucho menos marcado que la correspondiente a la transmisividad UV (figura 6.1). No obstante, se logra apreciar valores elevados del índice de claridad en verano e importantes variaciones durante el resto de año. Estas variaciones se deben a la importante influencia de la nubosidad sobre el índice de claridad y, por tanto, sobre la radiación solar global medida en suelo.

Si se comparan las figuras 6.3 y 6.4, se puede apreciar que los descensos bruscos en el índice de claridad se deben en gran parte a la nubosidad. Así, las variaciones principales que experimenta dicho índice son atribuibles a la presencia de nubes durante la toma de medidas. No obstante, como se ha comentado anteriormente, la carga de aerosoles no debe obviarse.

Los histogramas de frecuencia correspondientes al índice de claridad para cada uno de los emplazamientos se muestran en la figura 6.5. Se observa una distribución de las frecuencias claramente asimétrica, unimodal y con cola de valores hacia la izquierda. La moda de las tres series se sitúa entre 0,70 y 0,75. Este hecho muestra el predominio de casos despejados en Extremadura.

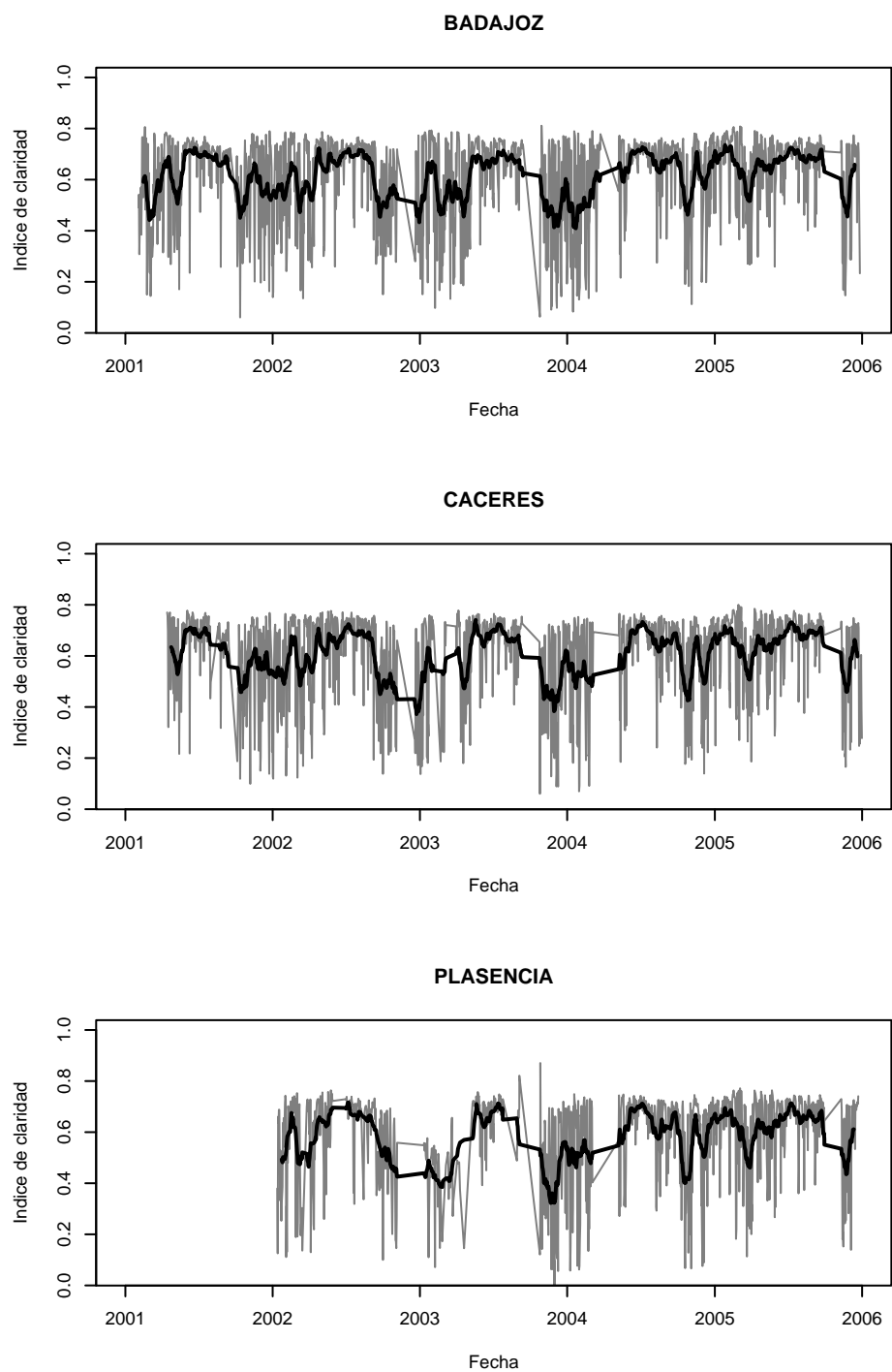


Figura 6.4: Evolución de los valores medios diarios del índice de claridad en Badajoz, Cáceres y Plasencia.

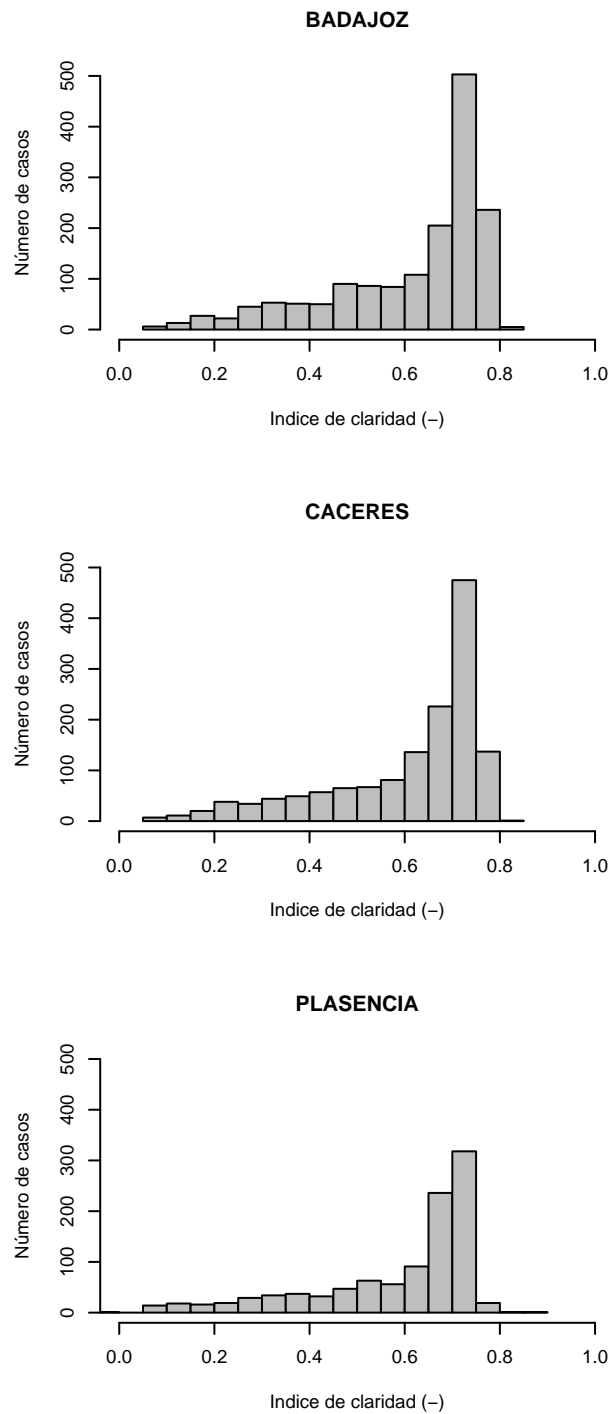


Figura 6.5: Histograma de frecuencias absolutas de los valores medios diarios del índice de claridad en Badajoz, Cáceres y Plasencia.

6.4. Cantidad total de ozono

Como se ha comentado en el capítulo segundo, el ozono es el principal gas absorbente de la radiación solar UV. Por tanto, su inclusión en los modelos es fundamental para explicar las variaciones que experimenta la radiación UV en la superficie terrestre.

En este estudio los datos de cantidad total de ozono en columna ($[O_3]$) son obtenidos mediante el instrumento satelital *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) descrito en el capítulo 3.

EL satélite proporciona una única medida al día (alrededor de las 11:30 UTC) para cada pixel de 1° de latitud por $1,25^\circ$ de longitud, por lo que en este trabajo, se ha asumido que la cantidad de ozono se mantiene constante a lo largo del día. Esta suposición es totalmente válida para los meses correspondientes a las estaciones de otoño e invierno, en los que la cantidad total de ozono permanece muy estable a lo largo del día. Sin embargo, la cantidad total de ozono experimenta una apreciable variabilidad diaria en primavera y verano (Antón et al., 2007).

Para evaluar el error cometido al utilizar una única medida como representativa de la cantidad de ozono durante todo el día, se acude a la estación ESAAt de El Arenosillo. Esta estación es el emplazamiento más cercano que realiza diversas medidas a lo largo del día (el número depende de las condiciones meteorológicas). Dichas medidas son proporcionadas por el espectroradiómetro Brewer ubicado en el ESAAt. Con el fin de cuantificar el error mencionado se define la dispersión relativa (d_r) de los valores de cantidad de ozono medidos en un día determinado como:

$$d_r(\%) = 100 \left(\frac{[O_3]_{max} - [O_3]_{min}}{[O_3]} \right),$$

donde $[O_3]_{max}$, $[O_3]_{min}$ y $\overline{[O_3]}$ representan los valores de ozono diario máximo, mínimo y medio, respectivamente.

Así, se obtiene que la dispersión relativa media durante el período comprendido entre los años 1998 y 2003 es de $(5,40 \pm 0,04)\%$. Por tanto, el uso en este trabajo de un valor constante para cada día del año puede ser considerado como una aproximación válida. La figura 6.6 representa el histograma de frecuencias de la dispersión relativa. Se observa cómo dichas dispersiones, en la mayoría de los casos, son reducidas. Así, en el 57% de los días la dispersión relativa es inferior al 5%, y en el 91% del total de casos es menor del 10%. El 9% de días en los que la variación que experimenta la cantidad de ozono es superior al 10% podría ser atribuido principalmente a fenómenos dinámicos como la llegada de masas de aire de características diferentes a las existentes, principalmente en primavera. Así, es conocido que el paso de un sistema de alta (baja) presión se ve reflejado en una disminución (aumento) de la concentración total de ozono (Petzoldt, 1999).

En el estudio de la variación temporal que experimenta la cantidad total de ozono

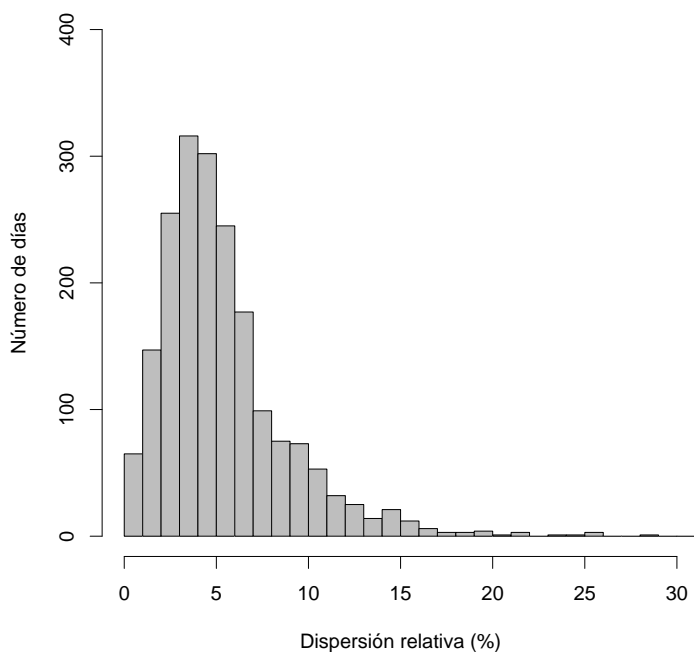


Figura 6.6: Histograma de frecuencias de la dispersión relativa diaria de la cantidad total de ozono medida en la estación ESAAt de El Arenosillo durante el periodo 1998-2003.

estimada por el instrumento TOMS (figura 6.7), se puede comprobar cómo sigue un ciclo anual con valores máximos en primavera (alrededor de 420 UD) y mínimos en otoño (en torno a 250 UD), comportamiento característico de las latitudes medias en las que se encuentra Extremadura. Con el objetivo de observar claramente las marcadas fluctuaciones estacionales, se muestra también la media móvil con un ventana de amplitud 20 días. Este comportamiento puede explicarse, principalmente, en términos dinámicos atribuible a la circulación natural de las masas de aire en la estratosfera (circulación Brewer-Dobson) (Grewer, 2005).

En la figura 6.8, se muestran los histogramas de la cantidad total de ozono estimada por el instrumento TOMS correspondientes a las tres estaciones de estudio. Se observa cómo los valores oscilan entre 200 UD y 475 UD. Los histogramas sugieren que la función de distribución de frecuencias de ozono es acampanada, unimodal (con moda entre 300 y 310 UD) y asimétrica positiva (cola de valores a la derecha). Por otra parte, se ha calculado la mediana (m) y la media (M) para cada uno de los tres emplazamientos. Así, se obtiene $m=307$ UD y $M=311$ UD para Badajoz, $m=309$ UD

y $M=312$ UD para Cáceres y $m=308$ UD y $M=311$ UD para Plasencia. La diferencia relativa entre los dos estadísticos es inferior al 1,3%, siendo la mediana inferior a la media, como corresponde a una distribución asimétrica positiva.

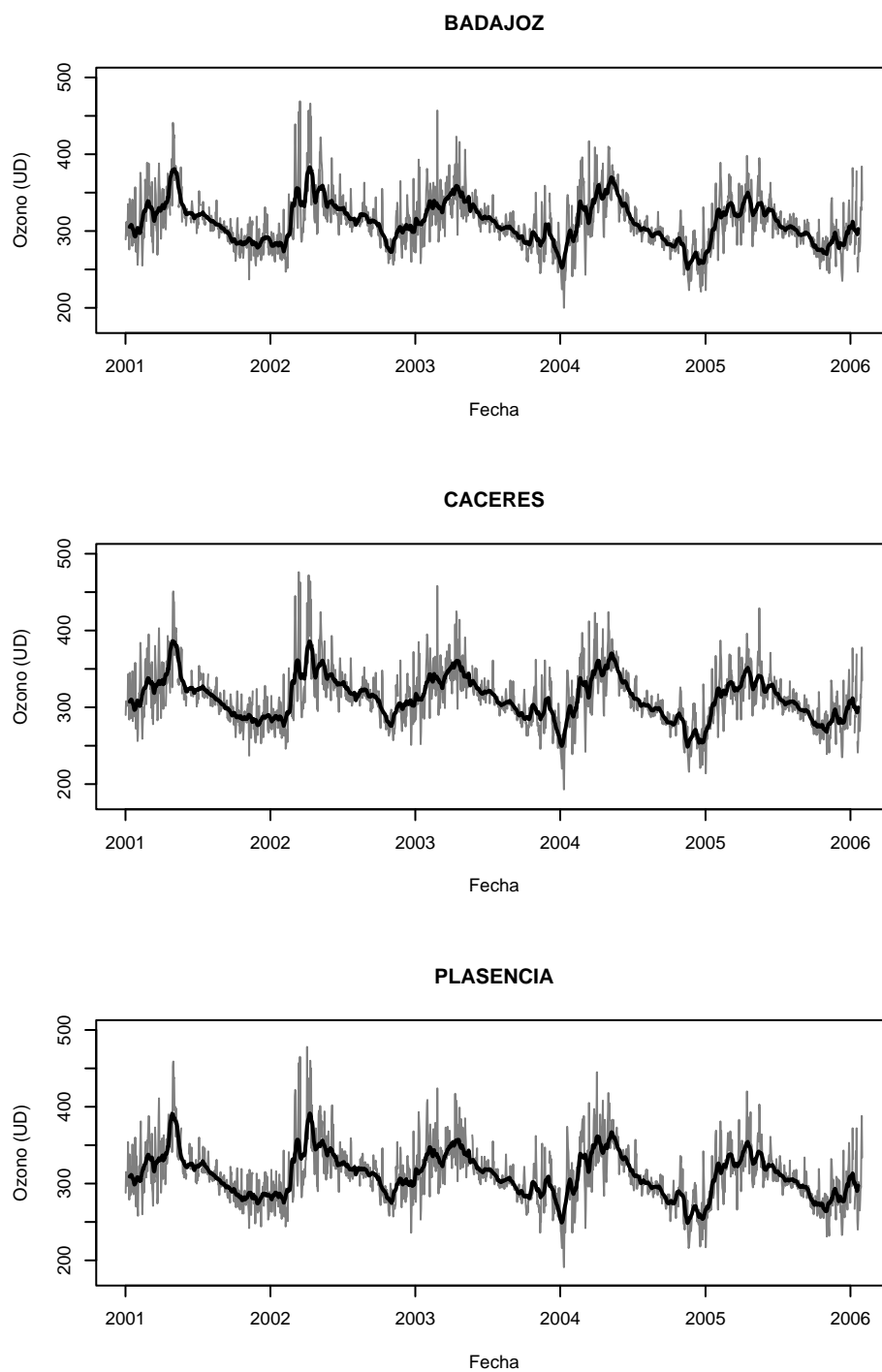


Figura 6.7: Evolución de la cantidad total de ozono estimada en Badajoz, Cáceres y Plasencia por el instrumento TOMS.

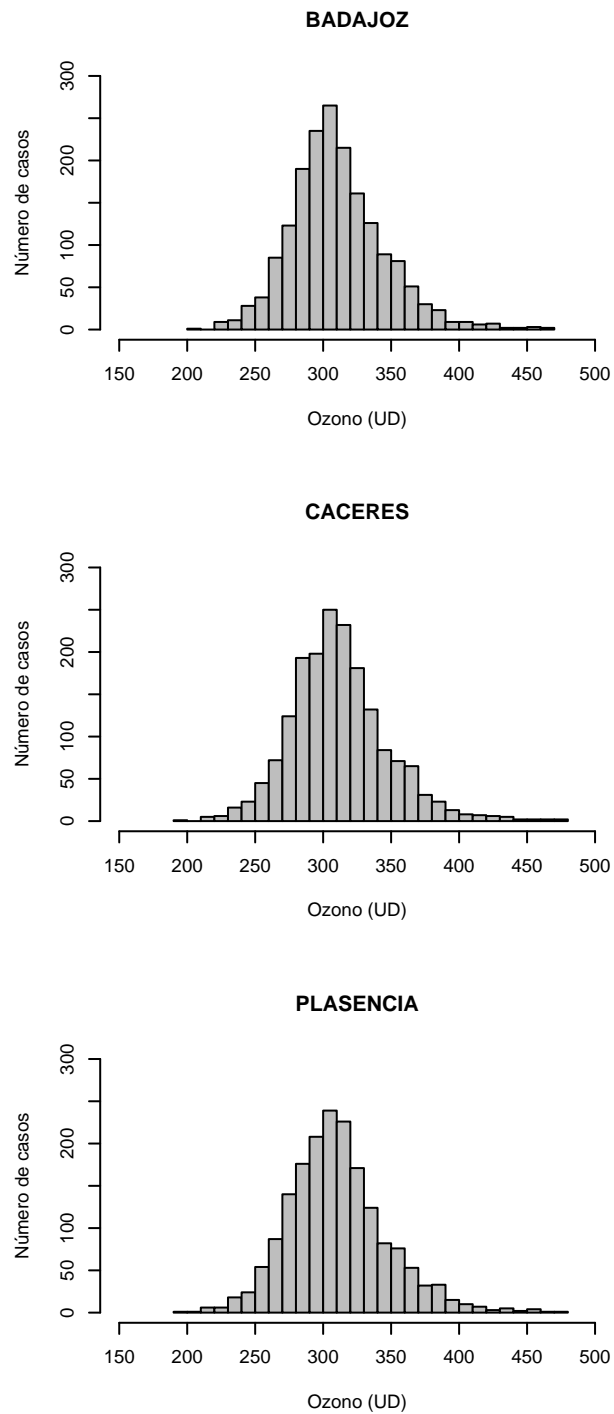


Figura 6.8: Histograma de frecuencias absolutas de la cantidad total de ozono estimada en Badajoz, Cáceres y Plasencia por el instrumento TOMS.

6.5. Altura solar

Como se explicó en el capítulo 2, la altura solar influye en la irradiancia solar medida en suelo sobre una superficie horizontal de dos formas. Por una parte, en cuanto a la disminución de radiación por unidad de área al incidir el haz de radiación oblicuamente. Esta disminución es descrita por la Ley de Lambert. Además, por otra parte, a menor altura solar, mayor camino recorrido por la radiación dentro de la atmósfera y, por tanto, mayor atenuación. Este segundo efecto es el que influye en la transmisividad.

Usualmente, la variable más extendida para relacionar las variaciones que sufre la radiación solar debidas a los cambios de la altura solar es la denominada *longitud del camino óptico relativo* o *masa óptica relativa* (m_r). Esta variable geométrica se define como el cociente entre el camino óptico recorrido por la radiación en una trayectoria cualquiera y el camino vertical recorrido en la dirección cenital. Esto es:

$$m_r = \frac{\int \rho ds}{\int \rho dz}, \quad (6.7)$$

donde ds es un elemento diferencial de la longitud del camino recorrido por la radiación en la atmósfera, ρ la densidad atmosférica existente y dz un elemento diferencial de altura.

Bajo la suposición de atmósfera plano-paralela y no refractiva, la masa óptica relativa es:

$$m_r^S = \frac{1}{\cos \theta}. \quad (6.8)$$

El error derivado del uso de esta ecuación, como consecuencia de la curvatura de la Tierra y de la refracción real en la atmósfera se estima en un 0,25 % para un ángulo cenital de 60°. Este error se incrementa rápidamente para ángulos superiores a 85° (Iqbal, 1983).

En este trabajo se han considerado válidas todas aquellas medidas registradas para ángulos cenitales inferiores a 70°. Por tanto, el error cometido al utilizar la expresión 6.8 es despreciable. No obstante, se ha realizado un análisis comparativo entre dicha expresión y otras definiciones existentes en la bibliografía, propuestas, algunas de ellas, para constituyentes específicos. Así, se compara la ecuación 6.8 con las expresiones propuestas por F. Kasten (m_r^K), C. Rodgers (m_r^{Rd}) y N. Robinson (m_r^{Rb}) (Iqbal, 1983):

$$m_r^K = \frac{1}{[\cos \theta + 0,15(93,885 - \theta)^{-1,253}]} \quad (6.9)$$

$$m_r^{Rd} = \frac{35}{\sqrt{(1224 \cos^2 \theta + 1)}} \quad (6.10)$$

$$m_r^{Rb} = \frac{1 + z/r}{\sqrt{\cos^2 \theta + 2(z/r)}}, \quad (6.11)$$

donde r es el radio de la Tierra en km y z la altitud media en km a la que se encuentra la concentración máxima de ozono en la atmósfera. En este estudio se considera $r=6370$ km y $z=22$ km.

Tabla 6.1: Valores de masa óptica relativa y diferencias relativas respecto a la expresión 6.8.

θ (°)	m_r^S	m_r^K	m_r^{Rd}	m_r^{Rb}
0	1,000	1,000 (0,00 %)	1,000 (0,00 %)	1,000 (0,00 %)
10	1,015	1,015 (0,00 %)	1,015 (0,00 %)	1,015 (0,00 %)
20	1,064	1,063 (0,07 %)	1,064 (0,00 %)	1,064 (0,00 %)
30	1,155	1,154 (0,09 %)	1,154 (0,01 %)	1,153 (0,11 %)
40	1,305	1,304 (0,13 %)	1,305 (0,03 %)	1,302 (0,24 %)
50	1,556	1,552 (0,20 %)	1,555 (0,06 %)	1,548 (0,48 %)
60	2,000	1,993 (0,36 %)	1,997 (0,12 %)	1,980 (1,01 %)
70	2,924	2,900 (0,82 %)	2,915 (0,31 %)	2,851 (2,49 %)
80	5,759	5,580 (3,10 %)	5,684 (1,29 %)	5,212 (9,49 %)
89	57,30	26,31 (54,1 %)	29,87 (47,9 %)	11,81 (79,4 %)

La tabla 6.1 muestra los valores de la masa óptica relativa utilizando las tres expresiones para ángulos cenitales solares entre 0 y 89°. Además, se muestran, entre paréntesis, las diferencias relativas respecto a la expresión 6.8 ($(m_r - m_r^S)/m_r^S$). Se observa cómo las diferencias respecto a las fórmulas de Kasten, Rodgers y Robinson son inferiores al 1 % para los ángulos cenitales solares inferiores a 70°. Sin embargo, a partir de este valor se aprecia un incremento sustancial de las diferencias relativas, debido, principalmente, a las suposiciones realizadas en la obtención de la expresión 6.8.

Por tanto, tras el estudio comparativo realizado y como en este trabajo se seleccionan ángulos cenitales inferiores a 70°, se considera apropiado utilizar, como expresión de la masa óptica relativa, la ecuación 6.8.

Capítulo 7

Modelos empíricos

7.1. Introducción

El principal objetivo de este trabajo es la estimación de los valores de irradiancia UV eritemática. Para ello, analizamos detalladamente en este capítulo varias expresiones empíricas, las cuales relacionan la transmisividad UV eritemática con cada una de las variables moduladoras propuestas: ozono, índice de claridad y masa óptica relativa.

Inicialmente, se realiza un detallado planteamiento del problema físico a estudiar. Posteriormente, se describen, seleccionan y validan las expresiones empíricas que relacionan la transmisividad UV con cada una de las tres variables moduladoras por separado (modelos de una sola variable). Una vez conocida la forma funcional de estas expresiones, se explican los distintos pasos seguidos hasta la obtención de un modelo empírico completo que relacione la variable transmisividad UV con las variables ozono, índice de claridad y masa óptica relativa.

7.2. Planteamiento físico del problema

La variable irradiancia solar espectral total, E_λ , puede expresarse como la suma de dos componentes: la irradiancia espectral directa ($E_{B\lambda}$), que llega directamente a la superficie terrestre procedente del Sol y la irradiancia espectral difusa ($E_{D\lambda}$), aquella que incide sobre la superficie después de haber sufrido procesos de scattering. Así, la expresión 6.2, introducida en el capítulo anterior, puede expresarse como:

$$E_{UV} = \int_{280}^{400} (E_{B\lambda} + E_{D\lambda}) R_\lambda d\lambda. \quad (7.1)$$

La relación entre la irradiancia espectral directa y la irradiancia espectral extra-terrestre ($E_{0\lambda}$), viene dada por la expresión siguiente:

$$E_{B\lambda} = E_{0\lambda} \cdot \tau_{\lambda}, \quad (7.2)$$

donde τ_{λ} representa la transmisividad espectral debida al conjunto de constituyentes atmosféricos.

Suponiendo aditividad en los procesos de atenuación atmosféricos, τ_{λ} puede expresarse como:

$$\tau_{\lambda} = \prod_{i=1}^{i=n} \tau_{i\lambda}, \quad (7.3)$$

siendo $\tau_{i\lambda}$ la transmisividad espectral correspondiente a cada proceso de atenuación. Esta hipótesis implica ausencia de interacción química entre los diversos constituyentes atmosféricos.

Por tanto, E_{UV} , definida mediante la expresión 7.1, puede expresarse como:

$$E_{UV} = \int_{280}^{400} \prod_{i=1}^{i=n} E_{0\lambda} \tau_{i\lambda} R_{\lambda} d\lambda + \int_{280}^{400} E_{D\lambda} R_{\lambda} d\lambda. \quad (7.4)$$

Este problema no puede resolverse de forma analítica debido a las complejas dependencias de los procesos de atenuación con la concentración y las propiedades físico-químicas de los constituyentes atmosféricos. Este hecho se une a la falta de información sobre varias de las variables involucradas en dicho cálculo. Por ello, numerosos trabajos proponen modelos, tanto físicos como empíricos, para conseguir una aproximación a la resolución numérica de este problema.

El objetivo principal de este trabajo es obtener una expresión funcional que relacione la irradiancia UV eritemática con los principales factores moduladores a través de las variables: ozono, índice de claridad y masa óptica relativa. La expresión más inmediata que podemos proponer se obtiene reescribiendo la definición de transmisividad espectral (ecuación 7.2), pero esta vez para el caso de magnitudes integradas a un cierto intervalo espectral. Esto es:

$$E_{UV} = E_{UV}^{TOA} T_{UV}, \quad (7.5)$$

donde E_{UV}^{TOA} es la irradiancia UV eritemática extraterrestre sobre una superficie horizontal y T_{UV} la transmisividad de flujo de radiación UV eritemática debida al conjunto de factores moduladores de dicha radiación.

Considerando además que los procesos de atenuación de la irradiancia UV eritemática en la atmósfera son aditivos, la transmisividad UV eritemática podría expresarse como el producto de las transmisividades debidas a ozono, índice de claridad y masa óptica relativa. Así,

$$\frac{E_{UV}}{E_{UV}^{TOA}} = T_{UV} = T_{[O_3]} T_{m_r} T_{K_t}. \quad (7.6)$$

En este trabajo esta hipótesis es generalmente válida, pues los dos constituyentes atmosféricos considerados (ozono y nubosidad) no interaccionan debido a que presentan poca interferencia entre sí y se encuentran en capas atmosféricas muy alejadas.

7.3. Aproximación con modelos de una variable

La búsqueda de expresiones que parametrizen la transmisividad UV respecto a cada una de las tres variables moduladoras consideradas consta de cinco pasos:

- En primer lugar, se formulan propuestas de expresiones apropiadas que describan la relación entre la transmisividad UV y cada variable moduladora. Esto se consigue basándose en los modelos más utilizados los cuales se han recopilado mediante un exhaustivo trabajo bibliográfico.
- A continuación, se seleccionan los datos a los que se aplicarán las expresiones propuestas. Esta selección se realiza imponiendo criterios que permitan garantizar, en cada uno de los estudios individualizados, que la variación de los valores de T_{UV} se debe a un único factor modulador, manteniendo constante la influencia de los demás factores. Los datos empleados en los ajustes son valores registrados en el periodo que se extiende desde el 1 de febrero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2004 en las estaciones de Badajoz y Cáceres, y entre el 1 de enero de 2002 y el 31 de diciembre de 2004 en la estación de Plasencia. Este periodo abarca ampliamente las variaciones, tanto diarias como estacionales, de cada una de las variables utilizadas en esta tesis. Por otra parte, aunque se han escogido sólo aquellas medidas que cumplen unos determinados criterios, el periodo seleccionado es lo suficientemente extenso como para incluir un gran número de casos en cada uno de los estudios realizados.
- Posteriormente, se realiza el ajuste de cada una de las expresiones propuestas, estimando los coeficientes de regresión que intervienen en los modelos empíricos. Para ello se utiliza el método de regresión de *mínimos cuadrados ordinarios*. Además, se calculan diversos parámetros estadísticos que permiten analizar la bondad de los ajustes, tales como el parámetro de información de Akaike (AIC), la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$) y el coeficiente de determinación (R^2). A partir del análisis de estos estadísticos se procede a elegir el ajuste más adecuado entre los propuestos para cada una de las tres variables empleadas. Las definiciones de estos tres parámetros estadísticos se recogen en el Anexo 1.
- Finalmente, con el fin de estimar el error de los modelos seleccionados, cada uno de ellos se valida con un conjunto de datos diferente al utilizado para realizar los ajustes. Estos datos se toman del periodo que se extiende entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2005, para las tres estaciones de estudio. De este

modo, se recogen tanto las variaciones diarias como estacionales que presentan las variables de estudio. Además, con el objetivo de evaluar cuantitativamente el grado de aproximación entre los valores de transmisividad UV obtenidos por cada modelo con los medidos, se emplean los estadísticos: media de las diferencias relativas (MBE) y la media del valor absoluto de las diferencias relativas ($MABE$). Estos dos parámetros se encuentran descritos en el Anexo 2.

7.3.1. Dependencia con el ozono

Propuesta de modelos

Expresión polinómica

En la mayoría de trabajos que analizan dependencias funcionales, las expresiones polinómicas son las estudiadas en primer lugar debido a que constituyen la base del espacio de funciones. En ocasiones, el fundamento físico en el que se basa el problema de estudio no indica que existan este tipo de relaciones entre las variables consideradas. No obstante, las expresiones polinómicas de grado uno, debido a su inmediatez y sencillez, han sido ampliamente utilizadas por varios autores para relacionar la radiación UV y la cantidad de ozono. Así, por ejemplo, Palancar et al. (2004) correlacionan valores medios mensuales de cantidad total de ozono proporcionados por el instrumento satelital TOMS y los valores medios mensuales de irradiancia UVB medidos en un rango de ángulo cenital solar entre 55° - 60° en la ciudad de Córdoba (Argentina). Lam et al. (2002) analizan, para días despejados, la relación entre las estimaciones diarias de $[O_3]$ dadas por el instrumento TOMS y valores diarios de irradiancia UVB registrados para un ángulo cenital fijo de 45° en la ciudad de Hong Kong (China). Guarnieri et al. (2004) realizan un estudio similar, para 57 días despejados en el Sudeste de Brasil, analizando los valores diarios de observaciones satelitales de ozono y los registros de irradiancia UVB para dos ángulos cenitales fijos, 30° y 60° , teniendo 23 y 54 pares de datos, respectivamente.

En este trabajo se proponen expresiones polinómicas de grado menor o igual a tres entre la variable T_{UV} y estimaciones de cantidad total de ozono proporcionadas por el instrumento satelital TOMS. Se ha comprobado que el incremento de términos en el polinomio no supone un aumento de la significación del modelo.

Así, la siguiente expresión:

$$T_{UV} = a + b \cdot [O_3] + c \cdot [O_3]^2 + d \cdot [O_3]^3, \quad (7.7)$$

será analizada con el objetivo de elegir el grado polinómico más adecuado. Este análisis se realiza ya que es interesante trabajar con modelos parsimoniosos, es decir, que ajusten adecuadamente los datos y además tengan un número reducido de variables independientes.

Expresión exponencial

La absorción que experimenta la radiancia UV, debida a la cantidad de ozono existente en la atmósfera, puede ser descrita utilizando la ley de Lambert-Bourger-Beer. Esta ley establece una dependencia exponencial entre la transmisividad espectral y la concentración de absorbentes. En este caso viene dada por la siguiente expresión:

$$\tau_\lambda = \exp(\sigma(\lambda) [O_3] m_r), \quad (7.8)$$

donde $\sigma(\lambda)$ es el coeficiente de absorción de la radiancia UV debido al ozono, $[O_3]$ la cantidad total de ozono y m_r la masa óptica relativa.

Si consideramos que la dependencia descrita por la ley de Lambert-Bourger-Beer es válida para la transmisividad UV eritemática y, además, asumimos constante el coeficiente de absorción y la masa óptica relativa para un cierto intervalo de longitud de onda, es posible relacionar las dos variables de estudio mediante la siguiente expresión:

$$T_{UV} = a \cdot \exp(b \cdot [O_3]). \quad (7.9)$$

Este tipo de modelo ha sido empleado por varios autores para describir la relación existente entre la transmisividad UV y el ozono (Gantner et al., 2000; García et al., 2000; Mantis et al., 2000; Guarnieri et al., 2004).

Expresión potencial

La relación potencial entre las variaciones de irradiancia UV eritemática y los cambios en la cantidad total de ozono fue introducida originalmente por McKenzie et al. (1991) y ha sido utilizado ampliamente en los últimos años por diversos autores (Bodhaine et al., 1997; Madronich et al., 1998; Dubrovsky, 2000; Zerefos, 2002). En este trabajo se analiza la siguiente expresión basada en las propuestas existentes en la literatura científica:

$$T_{UV} = a \cdot [O_3]^b, \quad (7.10)$$

donde el coeficiente b es conocido como *Factor de Amplificación de Radiación (RAF)*. Este factor proporciona información acerca de la sensibilidad que presenta la radiación UV a los cambios de contenido de ozono.

La justificación física de esta dependencia se basa en una serie de aproximaciones:

1. La respuesta espectral que presenta la piel a la radiación solar, R_λ , puede aproximarse mediante una expresión exponencial en la región espectral de mayor incidencia (290-330 nm) (Madronich, 1993). Es decir:

$$R_\lambda \simeq R_0 \exp(-\beta\lambda), \quad (7.11)$$

siendo R_0 y β constantes.

2. La irradiancia solar espectral extraterrestre, $(E_{0\lambda})$, experimenta un aumento aproximado de un factor dos cuando nos desplazamos en el espectro solar de los 290 a los 330 nm. En cambio, la irradiancia solar espectral que alcanza la superficie terrestre presenta mucha mayor dependencia con la longitud de onda por debajo de los 330 nm. Así, en superficie, la irradiancia medida en 330 nm es aproximadamente seis órdenes de magnitud mayor que la irradiancia registrada en 290 nm. Esta acusada dependencia con la longitud de onda se debe a la importante absorción de la radiación UV debida al ozono estratosférico. Por tanto, comparando ambas variaciones, se puede considerar que las producidas

en el tope de la atmósfera no influyen significativamente en los cambios de la irradiancia solar espectral medida en superficie. Así, se toma un valor promedio constante de la irradiancia UV extraterrestre ($E_{0\lambda} = E_0$).

3. Si se ignora la banda de absorción de Huggins, la función de extinción del ozono puede ser parametrizada mediante una función exponencial del tipo:

$$\sigma_\lambda \simeq \sigma_0 \exp(-\alpha\lambda), \quad (7.12)$$

donde σ_0 y α son constantes.

4. Es una aproximación válida utilizar la ecuación 7.2 en el estudio de la atenuación de la irradiancia UV espectral global cuando consideramos el ozono como el único responsable de la variación de dicha irradiancia. Esto es:

$$E_\lambda \simeq E_{0\lambda} \cdot \tau_\lambda. \quad (7.13)$$

Introduciendo la expresión 7.8 en la ecuación anterior, obtenemos la dependencia entre la irradiancia UV espectral global y la cantidad de ozono:

$$E_\lambda \simeq E_{0\lambda} \cdot \exp(-\sigma(\lambda) [O_3] m_r). \quad (7.14)$$

Utilizando las aproximaciones anteriores podemos llegar a obtener la dependencia potencial deseada. Así, si sustituimos las ecuaciones 7.11, 7.12 y 7.14 en la expresión 6.2 tenemos:

$$E_{UV} \simeq E_0 R_0 \int_{280}^{400} \exp[-\beta\lambda - \sigma_0 e^{-\alpha\lambda} [O_3] m_r] d\lambda. \quad (7.15)$$

El máximo de la función del integrando se obtiene en la siguiente longitud de onda:

$$\lambda_{max} \simeq \frac{1}{\alpha} \ln \left[\sigma_0 \frac{\alpha}{\beta} [O_3] m_r \right]. \quad (7.16)$$

Introduciendo la variable de transformación $\delta = \lambda - \lambda_{max}$ en la ecuación 7.15 obtenemos:

$$E_{UV} \simeq E_0 R_0 \left(\frac{\sigma_0 [O_3] \alpha m_r}{\beta} \right)^{-\frac{\beta}{\alpha}} \int \exp \left[-\beta\delta - \frac{\beta}{\alpha} e^{-\alpha\delta} \right] d\delta. \quad (7.17)$$

Con la aproximación adicional $e^{-\alpha\delta} \sim 1 - \alpha\delta + (\alpha\delta)^2/2$, la expresión anterior se reduce a una función Gaussiana centrada en $\delta = 0$ ($\lambda = \lambda_{max}$) de anchura $(\alpha\beta)^{-1/2}$. Así, el resultado de la integración analítica de dicha expresión es:

$$E_{UV} \simeq E_0 R_0 \left(\frac{\sigma_0 [O_3] \alpha m_r}{\beta} \right)^{-\frac{\beta}{\alpha}} \left(\frac{2\pi}{\alpha\beta} \right)^{-1/2}. \quad (7.18)$$

Como en este apartado estamos buscando la dependencia que tiene la transmisividad UV con la cantidad de ozono, llegamos a que:

$$T_{UV} = \frac{E_{UV}}{E_0} \simeq c [O_3]^{-\frac{\beta}{\alpha}}, \quad (7.19)$$

siendo c un parámetro que no depende de la cantidad de ozono. Si comparamos esta expresión potencial con la ecuación 7.10 tenemos que:

$$b = RAF \simeq -\frac{\beta}{\alpha}. \quad (7.20)$$

Es decir, una posible interpretación física del RAF podría ser la razón entre los decrecimientos respecto a la longitud de onda de la función respuesta eritemática y de la función de extinción del ozono.

Selección de datos

El análisis de la relación existente entre las variables T_{UV} y $[O_3]$ debe realizarse sin las fluctuaciones que la variación de la elevación solar y nubosidad introducen en la transmisividad UV.

El efecto debido a la variación de la elevación solar es eliminado al considerar un ángulo cenital solar fijo para todos los pares de medida transmisividad UV, ozono. En este trabajo, se han seleccionado los registros correspondientes a un ángulo cenital solar en el intervalo $54,9^\circ < \theta < 55,1^\circ$ ($55,0 \pm 0,1^\circ$). La elección de este reducido intervalo se debe, principalmente a dos razones. Por una parte, se considera un valor de ángulo cenital suficientemente elevado para tener un amplio número de medidas de ozono distribuidas durante todos los meses del año. Este objetivo se cumple ampliamente con el intervalo escogido, abarcando tanto los valores máximos como mínimos de cantidad total de ozono, registrados en primavera y otoño, respectivamente. Por otra parte, esta elección evita los posibles errores que tendrían los valores pequeños de transmisividad UV si el ángulo cenital elegido hubiera sido más elevado.

Con el objetivo de eliminar el importante efecto que la variación de la nubosidad produce en las medidas de transmisividad UV, se escogen aquellos casos correspondientes a cielo despejado. Generalmente, se consideran casos despejados aquellos con un índice de claridad mayor que 0,65 (Kudish et al., 1983; Udo, 2000). En este trabajo se ha preferido considerar un umbral de 0,75 con el fin de asegurar el carácter despejado de los casos seleccionados. Este umbral, aún siendo más restrictivo que el propuesto en la bibliografía, permite retener un número de casos suficiente para nuestro objetivo.

Las series completas de registros de Badajoz, Cáceres y Plasencia se dividen en dos periodos: entre inicio de medidas y el 31 de diciembre de 2004, y entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2005. En el primero de ellos se realiza el ajuste de los modelos, mientras que en el segundo se procede a realizar la validación del modelo

seleccionado como más apropiado. Aplicando los criterios de selección explicados en los dos párrafos anteriores, se obtienen para el ajuste de los modelos 559 casos para Badajoz, 583 para Cáceres y 263 para Plasencia. En este último emplazamiento el número de casos es sensiblemente inferior a las otras dos estaciones de medida ya que las medidas comenzaron a tomarse un año después (enero de 2002). Además, durante los años 2002, 2003 y 2004, en Plasencia existe un menor número de casos despejados comparados con los existentes en Badajoz y Cáceres durante esos mismos años. Por otra parte, aplicando los criterios de selección de datos en el segundo periodo, se obtienen para la validación del modelo más apropiado 225 casos para Badajoz, 295 para Cáceres y 240 para Plasencia.

Ajuste y selección del modelo

Para comprobar la relación existente entre la transmisividad UV eritemática y la cantidad de ozono, se representan en la figura 7.1 los pares de valores seleccionados correspondientes a casos despejados y ángulo cenital solar fijo. Se observa cómo, a pesar de las restricciones citadas, el número de pares de datos empleados es suficiente para realizar un correcto análisis de regresión entre las dos variables. Además, el rango de valores de ozono es bastante elevado (desde 250 UD hasta 470 UD). Este hecho tiene gran interés, ya que para conocer la dependencia real entre la radiación UV y la cantidad de ozono es necesario contar con una muestra de datos donde las variaciones de ozono se produzcan en el intervalo más amplio posible (Krzyscin and Jaroslowski, 1997).

Inicialmente, con el objetivo de seleccionar el grado del polinomio de ajuste más adecuado, se realiza un análisis de regresión múltiple selectivo *paso a paso hacia adelante* de la expresión polinómica de tercer grado 7.7. Mediante este procedimiento, conocido también como *stepwise forward* (Neter and Wasserman, 1974), se comienza analizando la expresión polinómica de grado uno y se van añadiendo los términos cuya presencia mejora la significación del modelo empírico. El parámetro utilizado para realizar esta selección es el estadístico *AIC* (anexo 1).

En la tabla 7.1 se muestran los valores del estadístico *AIC* obtenidos en el análisis de la ecuación 7.7 para las tres estaciones de medida. Los estadísticos *AIC* correspondientes a las expresiones polinómicas de grado dos son siempre inferiores a los estadísticos de las expresiones de grado uno. Este hecho muestra que el término de grado dos aporta información significativa a los modelos en los tres emplazamientos. En cambio, la introducción del término de grado tres, provoca que el estadístico *AIC* sea superior al obtenido en el ajuste de la expresión de grado dos en las tres estaciones. Por tanto, el término de grado tres no aporta significación al modelo polinómico, siendo la expresión polinómica de grado dos la elegida para ser comparada con las expresiones potencial y exponencial con el fin de elegir el modelo empírico más apropiado.

Tabla 7.1: Estadísticos AIC correspondientes a las expresiones polinómicas de grado uno, dos y tres. Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.

Estación	Modelo	AIC
Badajoz	Polinómica de 1° grado	-8255
	Polinómica de 2° grado	-8323
	Polinómica de 3° grado	-8305
Cáceres	Polinómica de 1° grado	-8461
	Polinómica de 2° grado	-8548
	Polinómica de 3° grado	-8536
Plasencia	Polinómica de 1° grado	-3728
	Polinómica de 2° grado	-3826
	Polinómica de 3° grado	-3820

En la figura 7.1 se han representado conjuntamente las curvas correspondientes a las tres expresiones matemáticas (polinómica, exponencial y potencial). Se observa que los tres ajustes recogen suficientemente la variación de la transmisividad UV debida a los cambios en la cantidad de ozono para todo el intervalo de datos, si bien muestran diferencias para los valores extremos de ozono. En este estudio se trabaja con valores de transmisividad UV integrados en un cierto intervalo de longitud de onda. Por tanto, el método exponencial propuesto no consigue describir completamente la variabilidad de la transmisividad UV eritemática debida a los cambios en la cantidad de ozono.

En la tabla 7.2 se encuentran los estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a cada expresión de ajuste y a cada emplazamiento de medida. Se observa cómo el polinomio de grado dos presenta un coeficiente R^2 más elevado que los obtenidos por los otros dos modelos en Badajoz y Plasencia, así como el valor del estadístico $RMSE$ más bajo en las tres estaciones. No obstante, el ajuste potencial presenta unos estadísticos muy cercanos a los obtenidos mediante la expresión polinómica. Así, en este trabajo, seleccionamos el ajuste potencial al tener un coeficiente de regresión menos que la expresión polinómica.

A continuación se muestran la expresiones potenciales obtenidas en las tres estaciones, en donde aparecen los coeficientes junto a sus errores estándar:

Para Badajoz:

$$T_{UV} = (1,06 \pm 0,10) \cdot [O_3]^{-0,78 \pm 0,02}. \quad (7.21)$$

Para Cáceres:

$$T_{UV} = (4,12 \pm 0,48) \cdot [O_3]^{-1,02 \pm 0,02}. \quad (7.22)$$

Para Plasencia:

$$T_{UV} = (0,66 \pm 0,15) \cdot [O_3]^{-0,71 \pm 0,04} . \quad (7.23)$$

Tabla 7.2: Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a la expresiones estudiadas en el análisis de las variables T_{UV} y $[O_3]$. Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.

Estación	Modelo	R^2	$RMSE$
Badajoz	Polinómica de 2° grado	0,808	0,00056
	Exponencial	0,783	0,00058
	Potencial	0,796	0,00056
Cáceres	Polinómica de 2° grado	0,809	0,00063
	Exponencial	0,800	0,00065
	Potencial	0,814	0,00063
Plasencia	Polinómica de 2° grado	0,575	0,00076
	Exponencial	0,549	0,00078
	Potencial	0,561	0,00076

Validación del modelo

Con el fin de verificar la validez de las expresiones potenciales seleccionadas, se consideran los pares de datos experimentales de transmisividad UV y cantidad de ozono que no se han utilizado en el proceso de cálculo de los coeficientes de regresión. De este modo, se seleccionan los valores de esas dos variables correspondientes a casos despejados ($K_t > 0,75$) y un ángulo cenital solar fijo de $55,0 \pm 0,1^\circ$ durante el año 2005.

A partir de los valores de ozono proporcionados por el instrumento TOMS para el periodo de validación considerado, se calculan los correspondientes valores de transmisividad UV eritemática para las tres estaciones mediante las expresiones 7.21, 7.22 y 7.23. Los valores estimados mediante el modelo potencial en cada estación se representan frente a los medidos experimentalmente en la figura 7.2. Se observa cómo los puntos se distribuyen entorno a la recta de pendiente unidad. Por tanto, las expresiones potenciales seleccionadas consiguen estimar adecuadamente valores de transmisividad UV a partir de la cantidad total de ozono.

A continuación se calculan las diferencias relativas $(100 \cdot (T_{UV}^* - T_{UV})/T_{UV})$ entre los valores medidos (T_{UV}) y estimados (T_{UV}^*) por los modelos empíricos durante el periodo de validación. Las diferencias se encuentran comprendidas entre $\pm 10\%$ en la mayoría de los casos: un 91 % para Badajoz, 96 % para Cáceres y 94 % para

Plasencia. Este resultado muestra que las diferencias entre las medidas y las estimaciones obtenidas por los modelos empíricos no son elevadas. Además, las medias de las diferencias relativas (MBE) tienen un valor de 3,91 % (Badajoz), 2,83 % (Cáceres) y 1,67 % (Plasencia). El signo positivo de este parámetro indica que el modelo potencial sobreestima en término medio los valores experimentales en las tres estaciones, produciéndose la sobreestimación más baja en la estación de Plasencia. En valor absoluto, las medias de las diferencias relativas ($MABE$) son del 4,95 % (Badajoz), 4,68 % (Cáceres) y 4,17 % (Plasencia). Por tanto, el modelo potencial consigue generar unos valores aceptables de transmisividad UV eritemática a partir de observaciones de ozono proporcionadas por el instrumento TOMS, para unas condiciones de cielo despejado y ángulo cenital fijo.

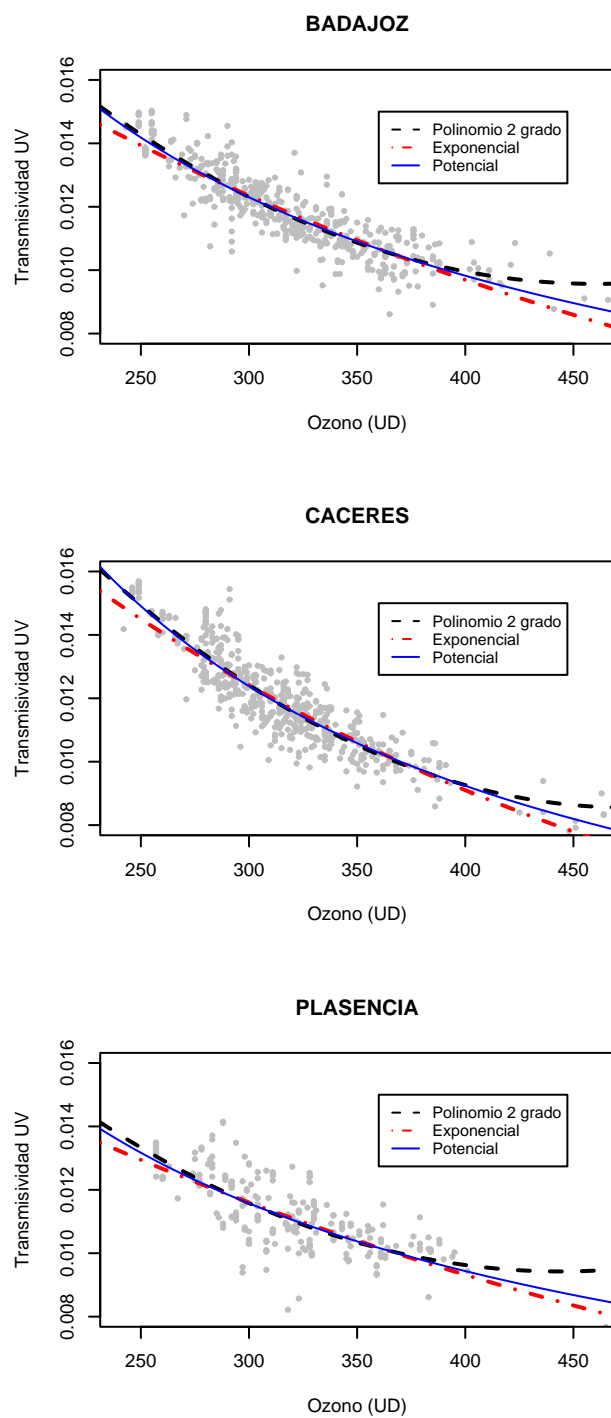


Figura 7.1: Transmisividad UV eritemática frente a la cantidad de ozono estimada por el TOMS en cada una de las tres estaciones.

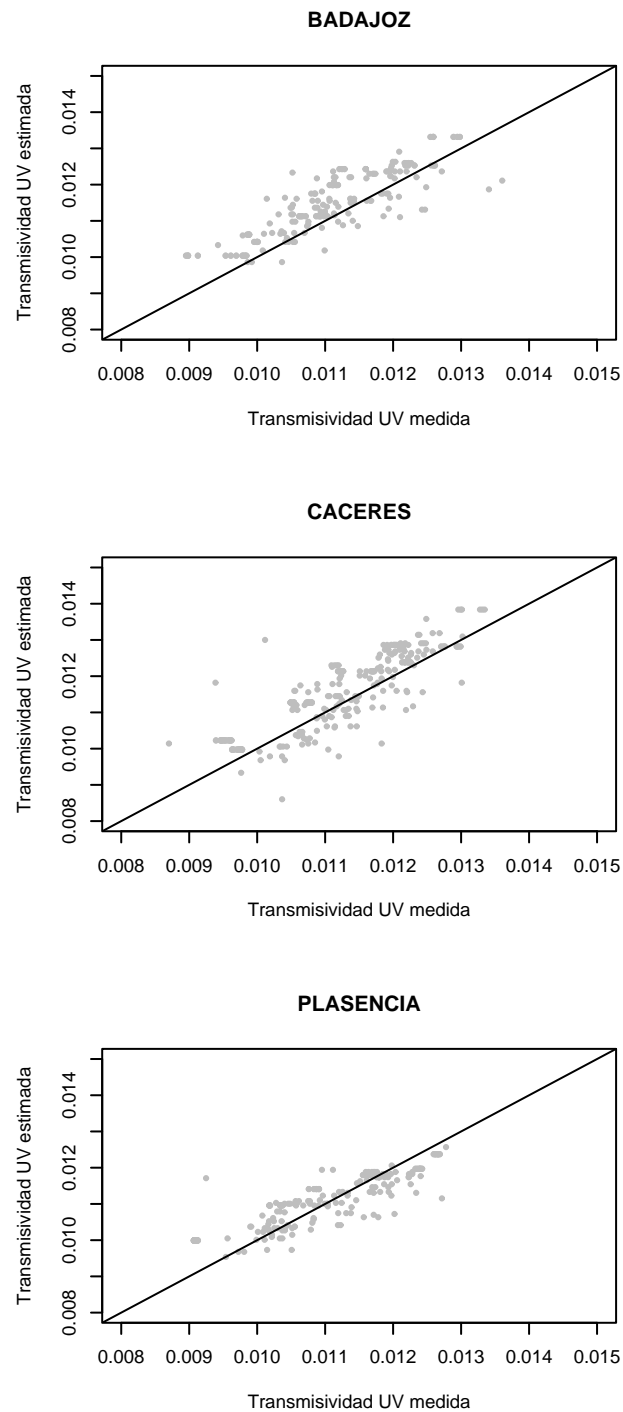


Figura 7.2: Comparación entre los valores de T_{UV} medidos y los calculados mediante el modelo potencial cuando la variable independiente es el ozono. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.

7.3.2. Dependencia con la nubosidad

Propuesta de modelos

En esta sección se describen las dos expresiones empíricas que se han considerado en este trabajo para relacionar la transmisividad UV con la nubosidad. Este importante factor de atenuación de la radiación UV se caracteriza mediante el índice de claridad, descrito en el capítulo 6.

Expresión polinómica de grado tres

Las variables transmisividad UV e índice de claridad han sido relacionados mediante funciones polinómicas de diferentes órdenes por varios autores. Así, por ejemplo, Martínez-Lozano et al. (1999) proponen funciones polinómicas de grados uno y dos, tanto con datos horarios como diarios. Los coeficientes de determinación obtenidos en ese trabajo son superiores a 0,8 mejorando considerablemente al emplear la función de segundo grado. Por otra parte, varios autores (Cañada et al., 2003; Ramírez et al., 2003; Ogunjobi and Kim, 2004) sugieren una dependencia polinómica de grado tres entre dos variables mencionadas anteriormente, obteniendo en todos los casos coeficientes de determinación superiores a 0,9.

De acuerdo con estos resultados, en este trabajo se propone la siguiente expresión polinómica de grado tres entre las variables transmisividad UV e índice de claridad:

$$T_{UV} = a + b \cdot K_t + c \cdot K_t^2 + d \cdot K_t^3. \quad (7.24)$$

Expresión potencial

La variable T_{UV} ha sido relacionada con la variable moduladora K_t mediante una expresión potencial en los trabajos de Foyo-Moreno et al. (1998) y de Murillo et al. (2003). En este trabajo se propone la siguiente expresión:

$$T_{UV} = a \cdot K_t^b. \quad (7.25)$$

Selección de datos

Para poder analizar la variación que experimenta la variable T_{UV} debida principalmente a la nubosidad y en menor medida a los aerosoles, se han considerado medidas en las que, tanto la cantidad de ozono, como la altura solar mantengan un valor fijo. Con ello, se intenta eliminar la influencia que introducen las variaciones de estas dos variables sobre la transmisividad UV.

Por una parte, se han escogido medidas correspondientes a un ángulo cenital concreto de $55,0 \pm 0,1^\circ$. La elección de este valor se debe al intento de abarcar el mayor número de situaciones atmosféricas posibles, cubriendo completamente el rango de valores que toma K_t . Además, con esta selección se obtiene una notable cantidad de datos para poder realizar el análisis y la posterior validación.

Por otra parte, los cambios en la variable T_{UV} que introducen las variaciones de ozono se minimizan tomando registros de radiación correspondientes a un estrecho rango de valores de la variable $[O_3]$. Así, se han seleccionado los casos en los que la cantidad de este gas, se encuentren dentro del intervalo $p40 \text{ UD} < [O_3] < p60 \text{ UD}$. Los valores $p40$ y $p60$ representan, respectivamente, los percentiles 40 y 60 del total de estimaciones de cantidad de ozono proporcionadas por el instrumento TOMS durante el periodo completo de estudio en cada una de las estaciones. En Badajoz los percentiles 40 y 60 corresponden a 301 UD y 315 UD, respectivamente. De la misma manera, en Cáceres estos dos percentiles tienen un valor de 302 UD y 316 UD, mientras en Plasencia corresponden a 301 UD y 316 UD. Es cierto que el método ideal sería seleccionar días con idéntica cantidad de ozono. No obstante, la pequeña variación introducida en esta variable se justifica ante la necesidad de tener un número suficiente de datos para realizar el correspondiente análisis.

Aplicando los criterios de selección detallados anteriormente, el número de pares de datos correspondientes a las variables transmisividad UV e índice de claridad utilizados en el ajuste de los modelos es 579 (Badajoz), 460 (Cáceres) y 368 (Plasencia). Así mismo, el número de casos utilizados en la validación del modelo empírico seleccionado es 166, 177 y 164, respectivamente.

Ajuste y selección del modelo

Inicialmente, se procede a elegir el grado polinómico más adecuado correspondiente a la expresión dada por la ecuación 7.24. El análisis de regresión *paso a paso hacia atrás*, mediante el criterio *AIC*, considera a la expresión polinómica de grado tres como la más significativa. Por tanto, seleccionaremos esta expresión para ser comparada junto con el modelo potencial con el objetivo de obtener el ajuste más significativo.

En la figura 7.3 se representan los valores de transmisividad UV eritemática e índice de claridad en cada uno de los tres emplazamientos. Estos pares de valores corresponden a casos en los que la cantidad de ozono se encuentra limitada en un $\pm 10\%$ en torno a su mediana y el ángulo cenital solar es fijo. Se comprueba cómo los registros seleccionados abarcan todo el intervalo de valores de K_t . En la misma figura se han representado conjuntamente las dos funciones ajustadas mediante los modelos potencial y polinómico seleccionados para el estudio. La relación entre las dos variables no es lineal debido, principalmente, a que la variable K_t se calcula a partir de la radiación solar global. Como la absorción y dispersión de radiación por parte de las nubes se produce principalmente en el visible y el infrarrojo cercano, éstas atenuarán en mayor medida la radiación solar global que la ultravioleta (Lenoble, 1993). Así, cuando el cielo está cubierto (K_t bajo), la proporción de transmisividad UV respecto a la global es mayor que para los casos despejados (Murillo et al., 2003). Por tanto, las fluctuaciones en la cubierta nubosa provocarán cambios de distinta magnitud

en las dos variables relacionadas en la figura 7.3, observándose claramente cómo la pendiente de la curva es mayor cuanto menor es el valor de K_t . Estos resultados han sido obtenidos por otros autores como: Foyo-Moreno et al. (2003), Matthijsen et al. (2000), Bodeker et al. (1996).

Tabla 7.3: Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas utilizando las variables T_{UV} y K_t . Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.

Estación	Modelo	R^2	$RMSE$
Badajoz	Polinómica de 3° grado	0,912	0,00072
	Potencial	0,932	0,00075
Cáceres	Polinómica de 3° grado	0,878	0,00080
	Potencial	0,885	0,00088
Plasencia	Polinómica de 3° grado	0,769	0,00107
	Potencial	0,838	0,00119

En la tabla 7.3 se observa que, en las tres estaciones, tanto la expresión polinómica dada por la ecuación 7.24, como la potencial, dada por la ecuación 7.25, presentan valores altos del coeficiente R^2 (superiores a 0,75), así como valores bajos del coeficiente $RMSE$ (inferiores a 0,0012). Esto es, los dos modelos analizados explican en un alto porcentaje la variación total de transmisividad UV debida a los cambios en la nubosidad y la carga de aerosoles. No obstante, mientras que la expresión polinómica tiene cuatro coeficientes de regresión, el modelo potencial tiene únicamente dos. Por tanto, utilizando el principio de parsimonia seleccionamos la expresión potencial como aquella que mejor describe la variación de la transmisividad UV debida a los cambios en el índice de claridad.

Las expresiones obtenidas al aplicar el modelo dado por la ecuación 7.25 a los pares de datos seleccionados en cada estación han sido las siguientes:

Para Badajoz:

$$T_{UV} = (0,0142 \pm 0,0001) \cdot K_t^{(0,705 \pm 0,008)}. \quad (7.26)$$

Para Cáceres:

$$T_{UV} = (0,0142 \pm 0,0001) \cdot K_t^{(0,701 \pm 0,012)}. \quad (7.27)$$

Para Plasencia:

$$T_{UV} = (0,0136 \pm 0,0001) \cdot K_t^{(0,655 \pm 0,015)}. \quad (7.28)$$

Validación del modelo

En este apartado se comprueba la validez de las expresiones potenciales seleccionadas en el punto anterior. Para ello se calculan los valores de transmisividad UV eritemática mediante dichas expresiones a partir de los registros de índice de claridad medidos en cada emplazamiento durante el año 2005. Estos valores de transmisividad UV estimados se comparan con los valores experimentales para el mismo periodo. Así, la figura 7.4 contiene tres gráficas donde se muestra la transmisividad UV eritemática estimada mediante las expresiones 7.26, 7.27 y 7.28 frente a la transmisividad UV eritemática obtenida experimentalmente en cada estación. Se puede observar cómo estas expresiones empíricas generan unos valores próximos a los experimentales, encontrándose los puntos representados alrededor de la rectas de pendiente unidad.

Las diferencias relativas entre los valores medidos y estimados utilizando el modelo potencial durante el periodo de validación indican una ligera sobrestimación por parte del modelo en Badajoz, Cáceres y Plasencia, con estadísticos *MBE* de 1,46 % y 2,46 % y 3,46 %, respectivamente. Tomando el valor absoluto de las diferencias relativas se obtienen valores de 5,88 %, 8,54 % y 7,39 %, respectivamente. Estos resultados muestran cómo es posible estimar con errores medios inferiores al 9 % la transmisividad UV eritemática mediante el índice de claridad, para unas condiciones concretas de ozono y elevación solar.

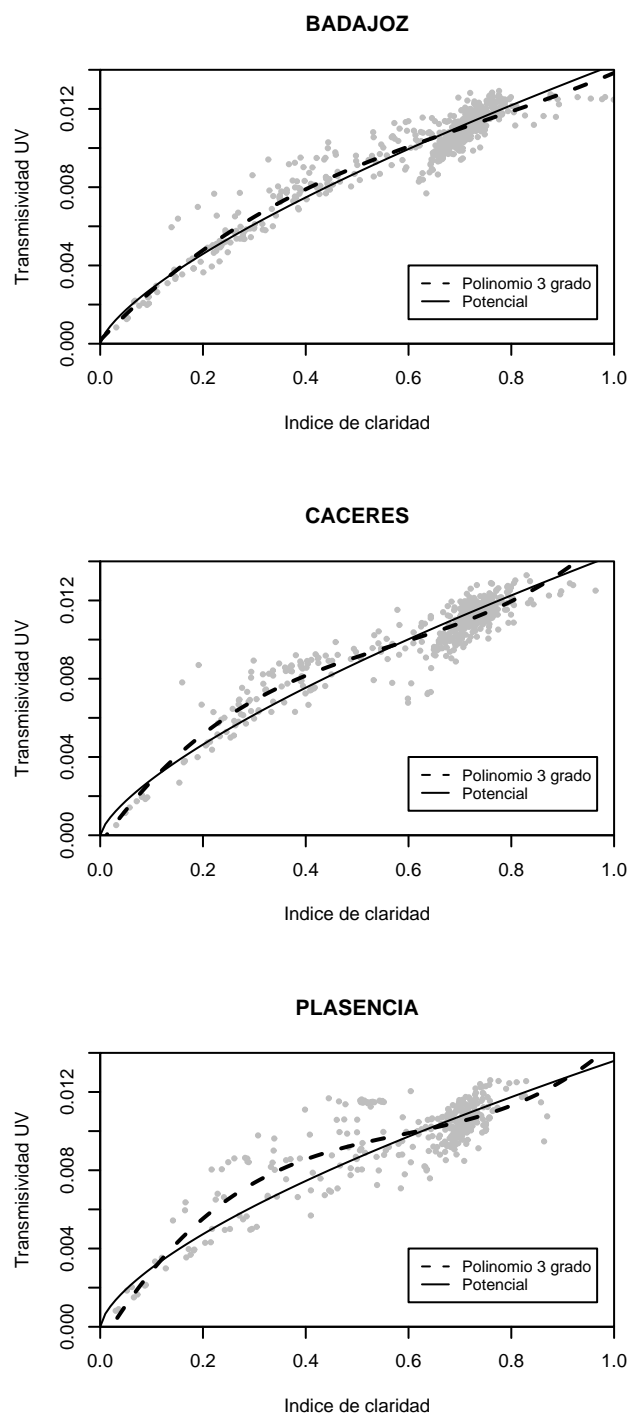


Figura 7.3: Transmisividad UV frente al índice de claridad en cada una de las tres estaciones.

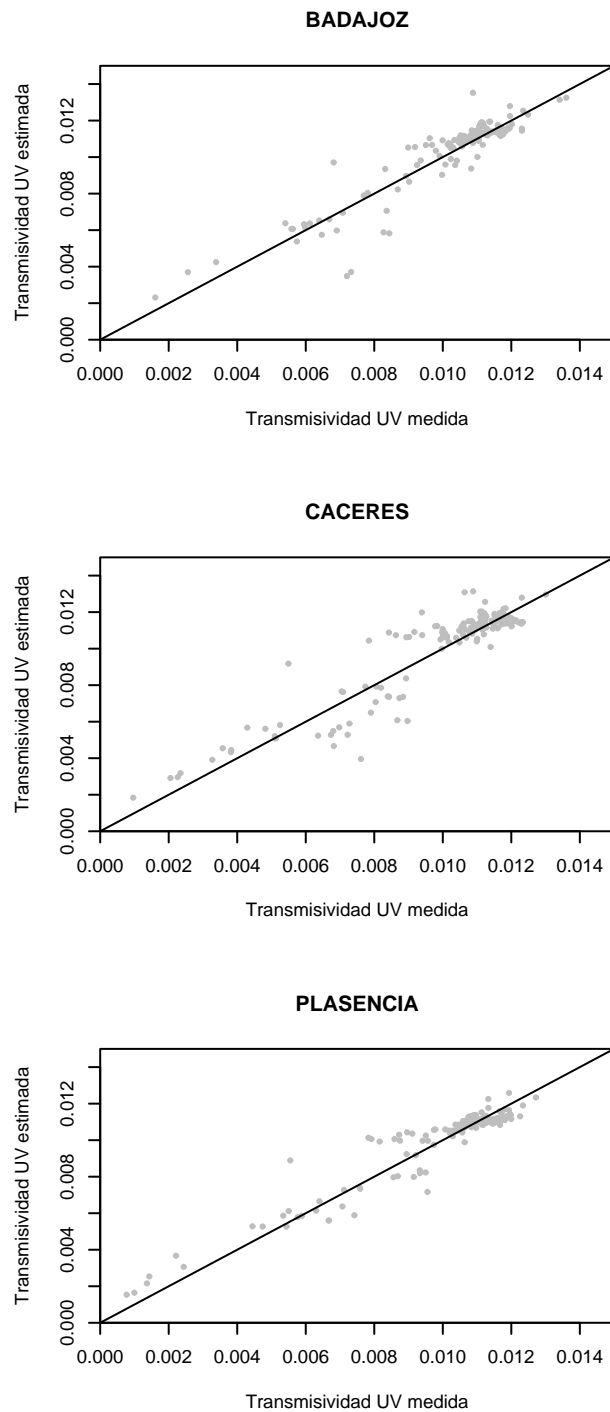


Figura 7.4: Valores de la variable T_{UV} medidos frente a los calculados mediante el modelo potencial cuando la variable independiente es el índice de claridad. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.

7.3.3. Dependencia con la altura solar

Propuesta de modelos

La variable transmisividad UV tiene una importante dependencia con la altura solar. Este hecho se debe, principalmente, a que la cantidad de atmósfera atravesada por la radiación solar es diferente para cada altura solar y, por tanto, también varía la cantidad de absorbentes y dispersores que atenúan dicha radiación. Los tres factores que provocan la variación de la transmisividad UV con la altura solar son: el espesor óptico de ozono atravesado por la radiación al recorrer la atmósfera, la dispersión Rayleigh y la atenuación por nubes y aerosoles. Además, esta dependencia aumenta debido a la importancia de la componente difusa en la irradiancia UV eritemática.

En este trabajo la altura solar se describe mediante la masa óptica relativa (m_r), definida en el capítulo 6. A continuación se presentan las dependencias funcionales que generalmente se utilizan para relacionar la variable T_{UV} con la variable m_r .

Expresión potencial

La variación del espesor óptico de ozono es el factor más influyente en los cambios que experimenta la transmisividad UV. Así, si en la expresión 7.18 se considera constante la cantidad total de ozono, podemos representar la dependencia de la transmisividad UV respecto a m_r como:

$$T_{UV} = \frac{E_{UV}}{E_0} \sim c \cdot m_r^{-\frac{\beta}{\alpha}}, \quad (7.29)$$

siendo c , en este caso, un factor que no depende de la altura solar.

Esto es, la dependencia entre la transmisividad UV y la masa óptica relativa lo marca la variación del espesor de ozono a través del camino que recorre la radiación en cada momento. No obstante, la relación propuesta entre las dos variables de estudio también englobará la dispersión Rayleigh y la atenuación por aerosoles.

Así, en este trabajo se analizará la siguiente expresión:

$$T_{UV} = a \cdot (m_r)^b. \quad (7.30)$$

Varios autores han estudiado esta dependencia potencial entre la transmisividad UV y la masa óptica relativa (Cañada et al., 2000; Murillo et al., 2003).

Expresión exponencial

La integración de la expresión diferencial propuesta por la ley de Lambert-Bourger-Beer muestra una dependencia exponencial entre la transmisividad espectral directa y la masa óptica relativa. Así, basándonos en esta ley se propone la siguiente relación entre las dos variables de estudio:

$$T_{UV} = a \cdot \exp(b \cdot m_r). \quad (7.31)$$

Dubrovsky et al. (2000) han empleado esta expresión para analizar las variaciones que experimenta la transmisividad UV eritemática debidas a los cambios en la masa óptica relativa.

Selección de datos

Con el objetivo de analizar los cambios que la altura solar produce sobre la variable transmisividad UV, se debe mantener constante la influencia que producen las variaciones de nubosidad y cantidad de ozono sobre dicha transmisividad.

Se seleccionan registros simultáneos de las variables T_{UV} y m_r correspondientes a casos despejados ($K_t > 0,75$) y que, además, se encuentren en el rango de valores de ozono que determinan el percentil 40 y el 60. Además, con el fin de eliminar las medidas más pequeñas de los radiómetros de banda ancha se consideran aquellos valores de las variables transmisividad UV y masa óptica relativa correspondientes a ángulos cenitales solares inferiores a 70° .

Considerando las restricciones anteriores, el número de casos seleccionados para el ajuste de los modelo es de 46909, 41191 y 18485 en Badajoz, Cáceres y Plasencia, respectivamente. Así mismo, con el objetivo de validar el modelo que se considere más apropiado, se seleccionan 17864, 21468 y 14173 casos en cada uno de los tres emplazamientos.

Ajuste y selección del modelo

En el capítulo 6 se describieron cuatro expresiones para calcular la masa óptica relativa a partir del ángulo cenital solar: Secante (m_r^S), Kasten (m_r^K), Rodgers (m_r^{Rd}) y Robinson (m_r^{Rb}). En este apartado analizamos la relación existente entre la transmisividad UV eritemática y la masa óptica relativa, utilizando cada una de las tres expresiones propuestas para el cálculo de la masa óptica relativa. Además, se realiza la selección del modelo de ajuste más apropiado entre las dos variables analizadas.

Los parámetros estadísticos R^2 y $RMSE$ obtenidos al aplicar el ajuste exponencial (ecuación 7.31) y potencial (ecuación 7.30) utilizando m_r^S , m_r^K , m_r^{Rd} y m_r^{Rb} se encuentran en las tablas 7.4, 7.5, 7.6 y 7.7, respectivamente. A partir de los valores de los estadísticos calculados en las tres estaciones se puede comentar que los dos métodos de ajuste analizados explican adecuadamente las variaciones de transmisividad UV debidas a los cambios en la masa óptica relativa. No obstante, se selecciona la expresión potencial como la más adecuada ya que los estadísticos R^2 y $RMSE$ presentan valores más significativos que los correspondientes al ajuste exponencial. Por otra parte, podemos observar en las tablas anteriores que el empleo de las cuatro expresiones que definen la masa óptica relativa producen estadísticos similares en las tres estaciones. Así, se decide utilizar, por su mayor sencillez, la secante del ángulo cenital como la expresión que define la masa óptica relativa en este trabajo. Por tanto, la expresiones seleccionadas para relacionar la trasmisividad UV y la masa óptica

Tabla 7.4: Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas en el análisis entre T_{UV} y m_r^S .

Estación	Modelo	R^2	$RMSE$
Badajoz	Exponencial	0,940	0,00115
	Potencial	0,963	0,00096
Cáceres	Exponencial	0,954	0,00115
	Potencial	0,968	0,00103
Plasencia	Exponencial	0,945	0,00121
	Potencial	0,962	0,00108

Tabla 7.5: Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas en el análisis entre T_{UV} y m_r^K .

Estación	Modelo	R^2	$RMSE$
Badajoz	Exponencial	0,941	0,00115
	Potencial	0,963	0,00096
Cáceres	Exponencial	0,954	0,00114
	Potencial	0,968	0,00102
Plasencia	Exponencial	0,945	0,00108
	Potencial	0,962	0,00108

relativa en cada una de las tres estaciones han sido la siguientes:

Para Badajoz:

$$T_{UV} = (0,02580 \pm 0,00001) \cdot (m_r^S)^{(-1,327 \pm 0,001)}. \quad (7.32)$$

Para Cáceres:

$$T_{UV} = (0,02595 \pm 0,00001) \cdot (m_r^S)^{(-1,407 \pm 0,001)}. \quad (7.33)$$

Para Plasencia:

$$T_{UV} = (0,02514 \pm 0,00001) \cdot (m_r^S)^{(-1,437 \pm 0,001)}. \quad (7.34)$$

La figura 7.5 representa la transmisividad UV frente a la masa óptica relativa para los casos correspondientes a un ángulo cenital inferior a 70° , $K_t > 0,75$ y cantidad de

Tabla 7.6: Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas en el análisis entre T_{UV} y m_r^{Rd} .

Estación	Modelo	R^2	$RMSE$
Badajoz	Exponencial	0,941	0,00096
	Potencial	0,963	0,00096
Cáceres	Exponencial	0,954	0,00115
	Potencial	0,968	0,00102
Plasencia	Exponencial	0,945	0,00121
	Potencial	0,962	0,00108

Tabla 7.7: Estadísticos R^2 y $RMSE$ correspondientes a las expresiones analizadas en el análisis entre T_{UV} y m_r^{Rb} .

Estación	Modelo	R^2	$RMSE$
Badajoz	Exponencial	0,943	0,00114
	Potencial	0,964	0,00096
Cáceres	Exponencial	0,955	0,00113
	Potencial	0,967	0,00102
Plasencia	Exponencial	0,947	0,00120
	Potencial	0,962	0,00108

ozono entre 306 y 320 UD en cada uno de los tres emplazamientos. En las tres gráficas se observa el gran número de datos que incluye esta selección, abarcando todo el rango de valores posibles de m_r y, por tanto, de T_{UV} . En cada gráfica se han representado los dos ajustes analizados, observando cómo ambos recogen adecuadamente la variación que experimenta la transmisividad UV debido a los cambios en la masa óptica relativa, si bien es ligeramente mejor el ajuste a la función potencial. También se aprecia una importante dispersión en torno al comportamiento medio debido, principalmente, a la gran cantidad de datos representados.

Validación del modelo

Una vez considerada la expresión potencial como la forma funcional más adecuada, se calculan los valores de transmisividad UV eritemática mediante dicha expresión a

partir de las medidas de m_r^S correspondientes al periodo de validación. Estos valores radiativos estimados se comparan con los valores medidos con el fin de comprobar la validez de la expresión potencial.

La figura 7.6 representa la transmisividad UV estimada mediante las ecuaciones 7.32, 7.33 y 7.34, frente a la transmisividad UV eritemática obtenida a partir de las medidas tomadas en superficie en Badajoz, Cáceres y Plasencia, respectivamente. Se observa cómo los pares de valores, (T_{UV}, T_{UV}^*) se aproximan a la recta con pendiente unidad, existiendo cierta dispersión en los datos. A partir de estos resultados se puede decir que la elevación solar, por sí sola, permite determinar la transmisividad UV eritemática en casos despejados y en los que, simultáneamente, el ozono apenas varía.

A continuación, se calculan las diferencias relativas entre los valores de T_{UV} medidos y estimados con el objetivo de comprobar la bondad del modelo propuesto. Se observa cómo, en las tres estaciones, en más de un 90 % de los casos, estas diferencias son inferiores al 10 %. Además, la media de las diferencias relativas está próxima a cero, mostrando una ligera sobreestimación por parte del modelo en Badajoz (1,40 %) y una pequeña subestimación en Plasencia (-0,59 %). En Cáceres la media de las diferencias está muy próxima a cero (0,01 %). Al considerar el valor absoluto de las diferencias, se obtiene un valor medio de 4,34 %, 4,07 % y 3,46 % en cada una de las tres estaciones.

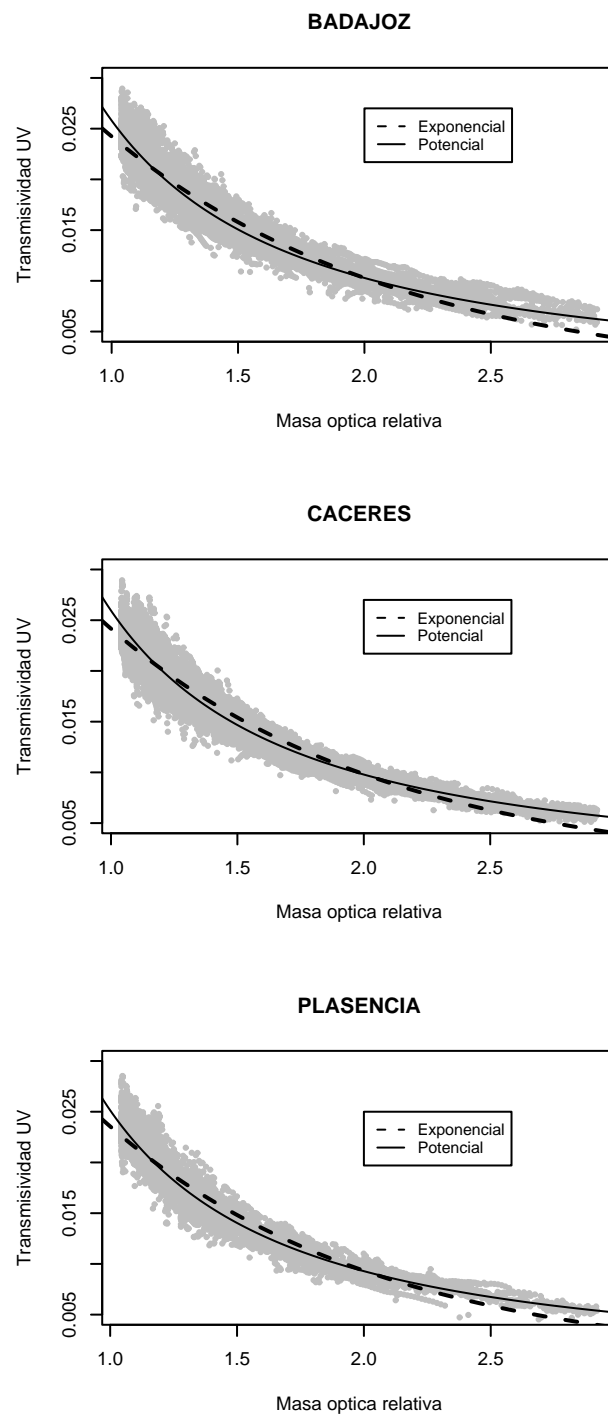


Figura 7.5: Transmisividad UV frente a la masa óptica relativa en cada una de las tres estaciones.

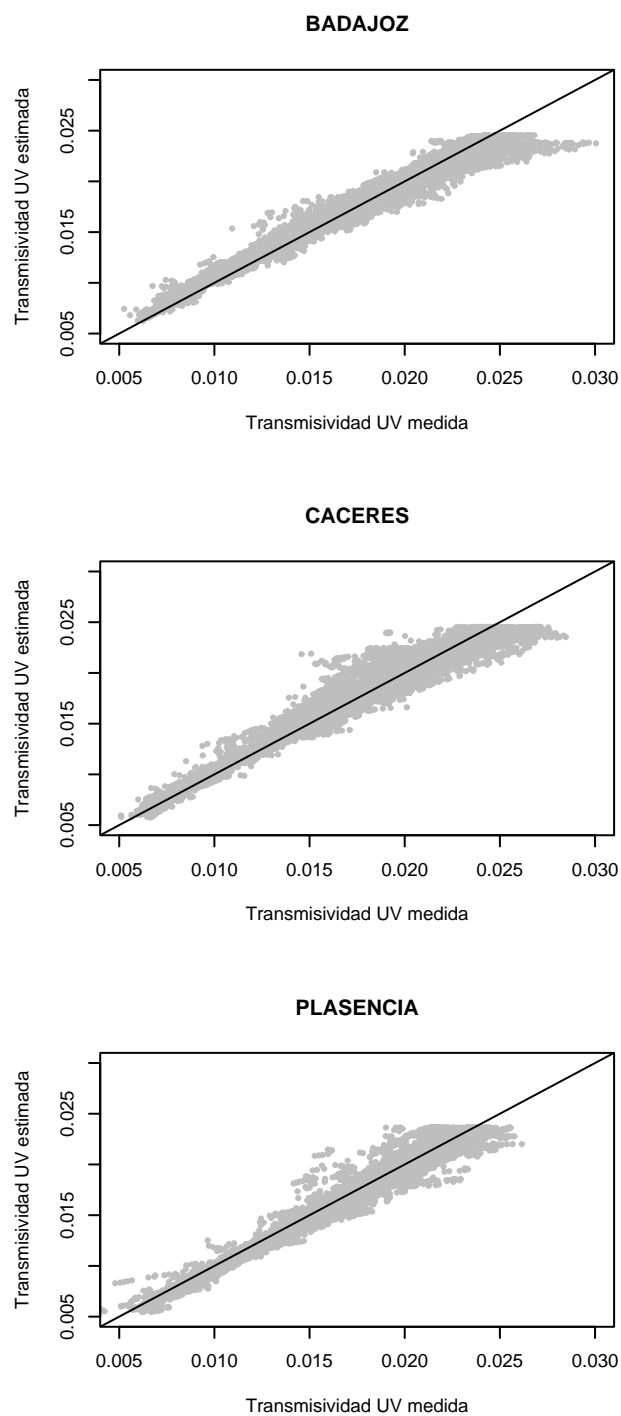


Figura 7.6: Comparación entre los valores de T_{UV} medidos y los calculados mediante el modelo potencial cuando la variable independiente es la masa óptica relativa. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.

7.4. Modelo completo

Una vez analizada, por separado, la influencia de cada uno de las variables moduladores en la variable trasmisividad UV, se pasa a proponer un modelo empírico completo en el que intervengan todas las variables consideradas en este trabajo. Este estudio se desarrollará en los siguientes pasos:

- Propuesta de un modelo completo teniendo en cuenta la forma de las tres expresiones obtenidas en cada uno de los estudios previos con una única variable.
- Selección del conjunto de datos de ajuste y de validación.
- Análisis de la bondad del modelo completo obtenido. En este estudio son especialmente importantes aquellas hipótesis que hacen referencia a los residuos. Además, es imprescindible que las variables moduladoras no se encuentren relacionadas. Para ello, se estudia la ausencia de multicolinealidad entre las variables independientes del modelo completo propuesto en este trabajo. Finalmente, se analiza la significación individual de los coeficientes de cada una de las variables independientes y la significación global del modelo.
- Validación del modelo con datos correspondientes a un periodo diferente al de ajuste.

7.4.1. Formulación del modelo completo

La expresión empírica completa se construye a partir de los tres ajustes potenciales seleccionadas. Por tanto, este modelo completo se define a partir de la expresión 7.6 como:

$$T_{UV} = a \cdot ([O_3])^b \cdot (K_t)^c \cdot (m_r)^d. \quad (7.35)$$

El coeficiente a informa acerca del valor que adquiere la variable trasmisividad UV para un valor de cantidad de ozono, índice de claridad y masa óptica relativa igual a uno. La diferencia existente en este coeficiente entre las tres estaciones puede estar relacionada con el valor medio de los factores locales que afectan a la radiación UV en cada estación.

7.4.2. Selección de datos

En la selección de datos correspondientes a los modelos de una variable se han escogido casos en los que las variaciones en la trasmisividad UV eran consecuencia solamente de la variable considerada en el modelo. Para el estudio del modelo empírico completo se trabaja con las series completas de datos correspondientes a los periodos

entre febrero de 2001 y diciembre de 2004 (para Badajoz y Cáceres), y entre enero de 2002 y diciembre de 2004 (para Plasencia). A estas tres series de datos se les aplica una única restricción con el objetivo de eliminar los datos extremadamente bajos que proporcionan los radiómetros UV en las primeras y últimas horas del día. Por ello, en este trabajo se consideran los casos correspondientes a un ángulo solar cenital inferior a 70° .

De las series completas de datos se han seleccionado al azar el 0,2% del total de casos existentes en cada emplazamiento para el ajuste del modelo empírico completo. Este porcentaje representa 1222 casos para Badajoz, 1003 para Cáceres y 773 para Plasencia. La elección de este porcentaje se debe a que el ajuste por el método de mínimos cuadrados requiere que los residuos de la expresión utilizada no estén correlacionados entre sí. En este sentido, cuando se trabaja con las series completas de datos, constituidas por medidas tomadas cada minuto, se observa una notable autocorrelación en los residuos de la regresión. Por tanto, seleccionando un 0,2% del total de casos nos aseguramos que los datos estén suficientemente espaciados (aproximadamente un dato cada 8 horas) con el fin de evitar autocorrelación, además de conseguir un número suficientemente alto para realizar el correspondiente análisis.

7.4.3. Ajuste del modelo completo

Para realizar el ajuste del modelo completo definido mediante la expresión 7.35, se procede a transformar dicha expresión. Para ello, aplicamos logaritmos a ambos lados de la igualdad. Así, la forma funcional del modelo lineal múltiple analizado en este trabajo será:

$$\ln(T_{UV}) = \ln(a) + b \cdot \ln([O_3]) + c \cdot \ln(K_t) + d \cdot \ln(m_r). \quad (7.36)$$

La estimación de los coeficientes de regresión se realizará mediante el método de ajuste por mínimos cuadrados. De este modo, las expresiones resultantes en cada emplazamiento son:

Para Badajoz:

$$\begin{aligned} \ln(T_{UV}) = & (0,55 \pm 0,15) - (0,71 \pm 0,03)\ln([O_3]) + \\ & +(0,75 \pm 0,01)\ln(K_t) - (1,24 \pm 0,01)\ln(m_r). \end{aligned} \quad (7.37)$$

Para Cáceres:

$$\begin{aligned} \ln(T_{UV}) = & (1,41 \pm 0,20) - (0,86 \pm 0,03)\ln([O_3]) + \\ & +(0,70 \pm 0,01)\ln(K_t) - (1,30 \pm 0,01)\ln(m_r). \end{aligned} \quad (7.38)$$

Para Plasencia:

$$\ln(T_{UV}) = (0,41 \pm 0,30) - (0,69 \pm 0,05)\ln([O_3]) +$$

$$+(0,72 \pm 0,01)Ln(K_t) - (1,23 \pm 0,02)Ln(m_r). \quad (7.39)$$

Los coeficientes de regresión se muestran junto con los errores estándar. El elevado coeficiente de determinación obtenido en las tres estaciones: 0,977 (Badajoz), 0,962 (Cáceres) y 0,947 (Plasencia) indica que los tres modelos consiguen explicar más del 95 % de la varianza total.

7.4.4. Análisis de los residuos del modelo

Se entiende como residuos del ajuste a las diferencias entre los valores de la variable T_{UV} obtenidos experimentalmente y los valores de dicha variable estimados a partir del modelo propuesto. Las tres hipótesis fundamentales que deben cumplir los residuos de acuerdo con el método de regresión clásico son: homocedasticidad, normalidad de la distribución y ausencia de autocorrelación. Mediante este análisis se verifica la idoneidad del modelo completo planteado.

Hipótesis de homocedasticidad

La primera hipótesis que analizaremos en los modelos de regresión lineal múltiple dados por las expresiones 7.37, 7.38 y 7.39 es la hipótesis de homocedasticidad, esto es, si los residuos de los modelos tienen varianza constante. Con este objetivo, se representan gráficamente los residuos generados por los modelos frente a los valores de la variable dependiente $Ln(T_{UV})$ estimados (figura 7.7). Se puede observar cómo los residuos no parecen mostrar ninguna dependencia, encontrándose distribuidos alrededor de la línea horizontal en cero. Este hecho indica que los residuos de los modelos correspondientes a las tres estaciones presentan varianza constante a lo largo de toda la serie de datos.

Una vez comprobado que los residuos no presentan dependencia respecto a la variable dependiente, se analiza la relación individual entre esos residuos y cada una de las variables independientes. Así, en la figura 7.8 se presentan las gráficas que relacionan los residuos del modelo correspondiente a la estación de Badajoz (expresión 7.37) con cada una de las variables independientes (cantidad de ozono, índice de claridad y masa óptica relativa). Se observa cómo en estas figuras no parece existir dependencia alguna, estando alineados los residuos en torno a una franja centrada en cero. Un comportamiento similar es obtenido en Cáceres y Plasencia. Por tanto, este hecho muestra que los residuos producidos por la expresión 7.36 tienen varianza constante.

Hipótesis de normalidad

Para verificar si los residuos se distribuyen normalmente, se presenta el histograma de los residuos estandarizados (figura 7.9). A cada una de las tres gráficas se le ha añadido la función densidad de probabilidad normal que se ajusta a la muestra.

Los gráficos de probabilidad normal constituyen otra importante herramienta gráfica para comprobar si un conjunto de datos puede considerarse procedente de una distribución normal. En la figura 7.10 se presentan tres gráficos de cuantiles donde se enfrentan los residuos estandarizados generados por el modelo frente a los valores teóricos que se obtendrían a partir de una distribución normal en cada una de las estaciones. Las gráficas indican una cierta no-normalidad en la distribución de los datos, ya que los puntos representados presentan cierta curvatura en torno a la recta de pendiente unidad. Además, la figura muestra una mayor variabilidad en los extremos de la curva debida a que la distribución de residuos presenta un conjunto reducido de observaciones atípicas.

Hipótesis de ausencia de autocorrelación

Cuando se trabaja con la serie completa de datos se observa autocorrelación positiva de primer orden en los residuos de la regresión, incluso si se toman datos espaciados 60, 120 y 180 minutos. Por tanto, con el objetivo de conseguir una serie temporal de datos no autocorrelacionados, la regresión ha sido realizada con el 0,2% del total de valores, tomados al azar, de las cuatro variables relacionados.

La ausencia de autocorrelación se comprueba mediante el test d de Durbin-Watson (anexo 3) que se emplea habitualmente para este objetivo (Meek et al., 1999; Diaz et al., 2000). En este trabajo el estadístico d obtenido al realizar la prueba de Durbin-Watson posee un valor de 1,76 (Badajoz), 1,78 (Cáceres) y 1,36 (Plasencia). Así, este estadístico se encuentra entre los valores tabulados $d_u = 1,74$ y $4 - d_u = 2,26$ en las estaciones de Badajoz y Cáceres. Por tanto, se acepta la hipótesis nula de ausencia de autocorrelación de primer orden en los residuos de la regresión del modelo completo en estos dos emplazamientos. En la estación de Plasencia aparece una ligera autocorrelación positiva de primer orden, a la que no ha sido posible encontrar explicación.

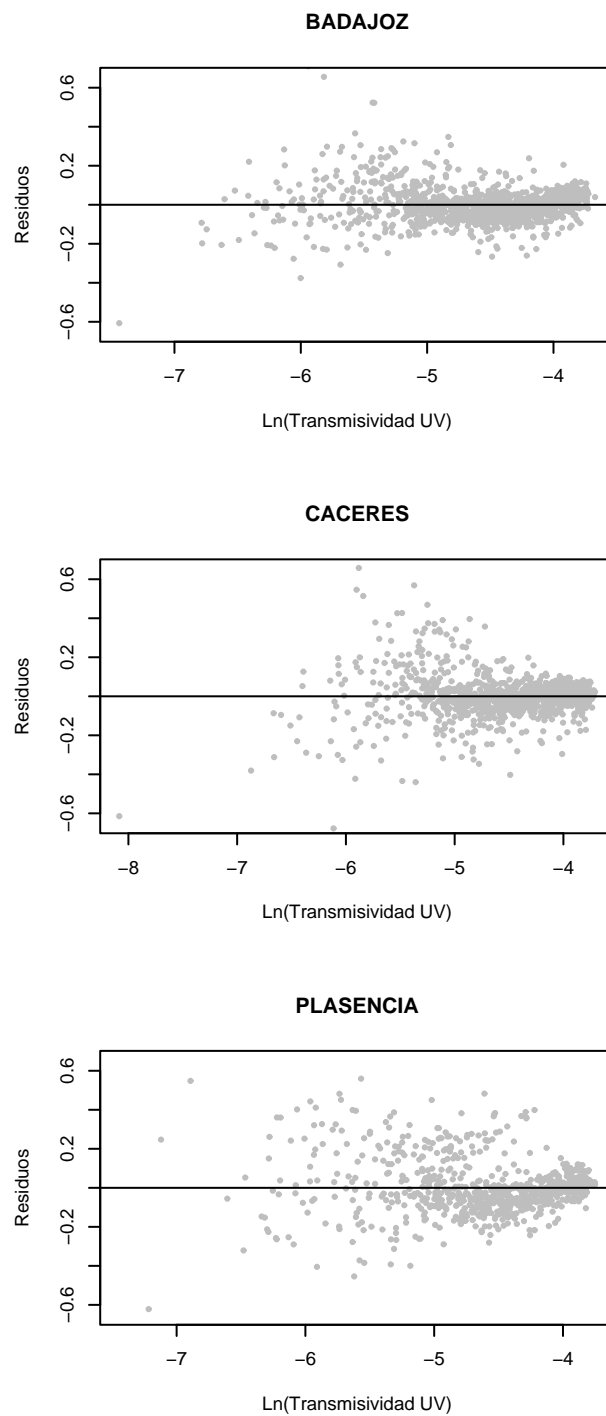


Figura 7.7: Residuos del modelo empírico completo frente a los valores estimados de la variable dependiente. Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.

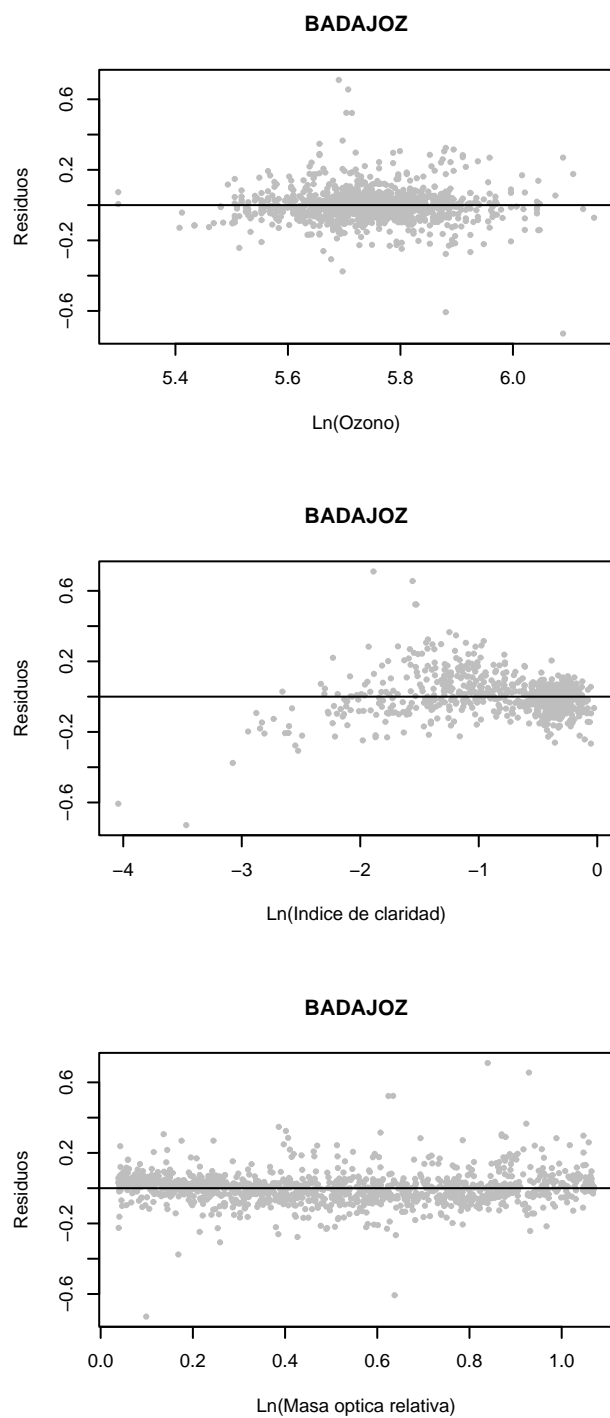


Figura 7.8: Residuos del modelo 7.37 frente a las tres variables independientes que se incluyen en dicha expresión. Estación de Badajoz

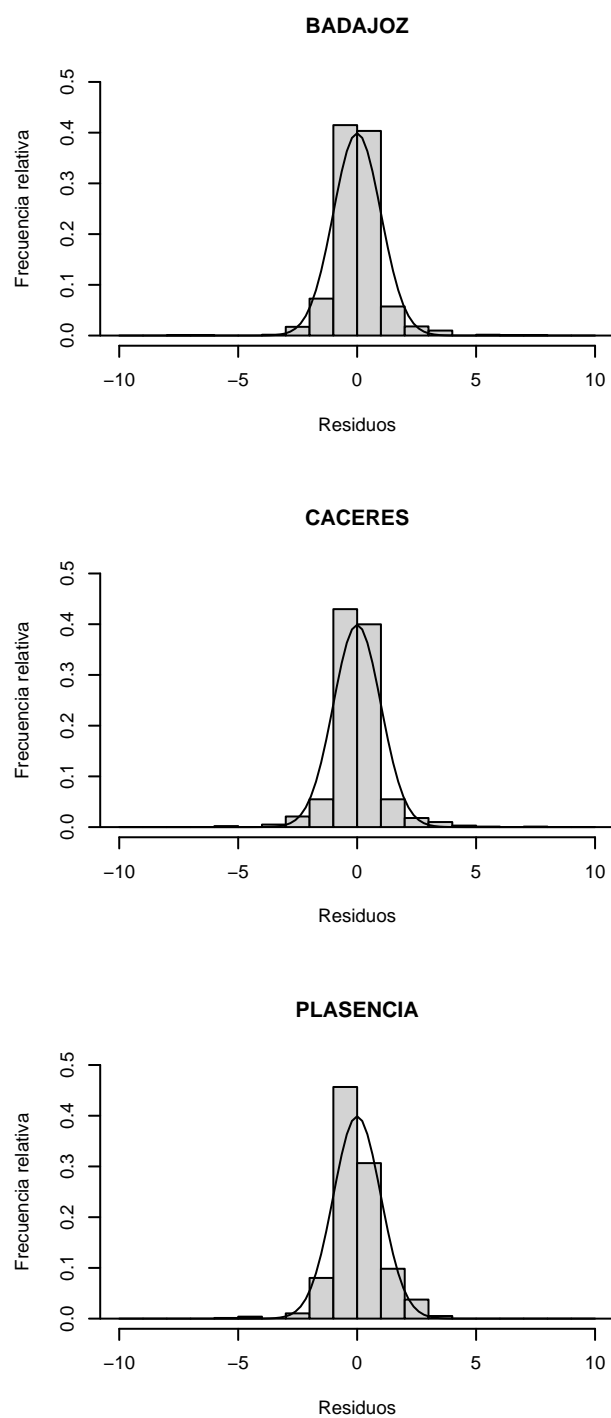


Figura 7.9: Histogramas de los residuos estandarizados de los modelo empíricos completos de Badajoz, Cáceres y Plasencia.

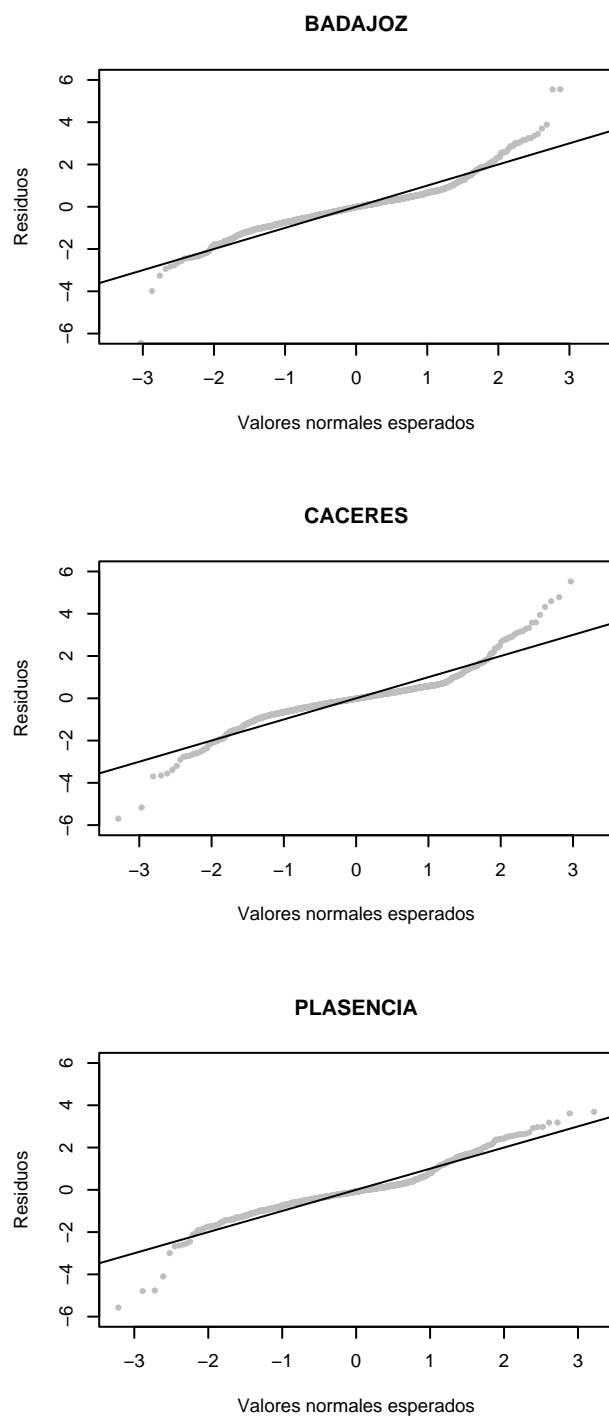


Figura 7.10: Residuos de los modelos empíricos completos 7.37 (Badajoz), 7.38 (Cáceres) y 7.39 (Plasencia) frente a los valores teóricos procedentes de una distribución normal. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.

7.4.5. Análisis de colinealidad entre las variables independientes

Se denomina colinealidad a la existencia de una elevada correlación entre dos o más variables consideradas en un modelo como independientes. La existencia de dicha colinealidad puede dar lugar a una estimación incorrecta de los coeficientes de los modelos.

La presencia de multicolinealidad afecta a la significación de ciertos coeficientes de regresión, en cambio, no afecta a la significación global del modelo ni a sus estimaciones. Este problema se resuelve eliminando las variables que han sido erróneamente consideradas independientes y que proporcionan información redundante ya contenida en otras variables incluidas en el modelo.

Para evaluar el grado de colinealidad de cada una de las variables independientes, por ejemplo, la cantidad de ozono, se realiza el análisis de regresión en el cual dicha variable se considera dependiente, y las otras dos (índice de claridad y masa óptica relativa) independientes. Un coeficiente de determinación elevado indica multicolinealidad para la variable usada como dependiente. Además, es posible obtener el factor de incremento de la varianza (*VIF*), definido como:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}, (j = 1, \dots, k), \quad (7.40)$$

donde R_j es el coeficiente de determinación de la regresión entre X_j y el resto de $(k-1)$ variables independientes del modelo inicial. Valores del parámetro *VIF* inferiores a 5, indican que la multicolinealidad puede ser considerada irrelevante. Así, la tabla 7.8 muestra que no existe multicolinealidad entre las variables cantidad de ozono, índice de claridad y masa óptica relativa, ya que todos los valores del parámetro *VIF* para las tres estaciones de estudio son inferiores a 5.

Tabla 7.8: Factor de incremento de varianza correspondiente a las variables independientes utilizadas en el modelo potencial completo. Estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.

	Badajoz	Cáceres	Plasencia
Ozono	1,113	1,092	1,137
Índice de claridad	1,164	1,168	1,175
Masa óptica relativa	1,079	1,074	1,090

7.4.6. Contraste de hipótesis de significación

Con el objetivo de comprobar la significación global del modelo empírico completo, se utiliza la *prueba de contraste de hipótesis F* (anexo 3).

El modelo propuesto genera valores del estadístico F de 13075 (Badajoz), 9386 (Cáceres) y 5673 (Plasencia) muy por encima del valor tabulado 2,60. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula, asegurando que, al menos una de las tres variables independientes, consigue explicar la variación de la variable dependiente.

Tabla 7.9: Parámetro t de Student correspondiente a los coeficientes de regresión de los modelos potenciales completos dados por las expresiones 7.37 (Badajoz), 7.38 (Cáceres) y 7.39 (Plasencia).

	Badajoz	Cáceres	Plasencia
b (O_3)	27	25	13
c (K_t)	126	96	60
d (m_r)	149	99	80

Además, se realiza una prueba de significación de los coeficientes de regresión del modelo completo dado por la expresión 7.36. El *test t* (anexo 3) determina si dichos coeficientes son estadísticamente significativos. Los valores del parámetro t para cada uno de los coeficientes del modelo en cada estación se muestran en la tabla 7.9. Considerando el tamaño de la muestra y un nivel de significación del 95 %, el valor de la t de Student es inferior a dos en todos los casos. Por tanto, se puede afirmar que los coeficientes correspondientes a las tres variables independientes introducidas en los tres modelos completos son estadísticamente significativos.

Además, es muy interesante la obtención de los intervalos de confianza (*IC*) entre los que se encuentra el coeficiente de regresión correspondiente a cada una de las tres variables independientes. Estos intervalos nos permiten, al igual que la prueba t realizada anteriormente, determinar si dichos coeficientes son significativos. Se define el intervalo de confianza al nivel de significación α para cierto coeficiente de regresión β_j como:

$$\beta_j \pm t_{n-k-1, \alpha/2} SE(\beta_j), (j = 1, 2, \dots, k), \quad (7.41)$$

donde $t_{n-k-1, \alpha/2}$ es el valor del estadístico t de Student para $(n - k - 1)$ grados de libertad y $SE(\beta_j)$ el error estándar del coeficiente β_j , siendo n el número total de datos y k el número de regresores del modelo.

El intervalo de confianza, al nivel de significación del 0,05, para cada estación, correspondiente a cada uno de los tres coeficientes b , c y d se muestra en la tabla

Tabla 7.10: Intervalos de Confianza al 5% de significación correspondientes a los coeficientes de regresión de los modelos potenciales completos correspondientes a las estaciones de Badajoz, Cáceres y Plasencia.

	Badajoz	Cáceres	Plasencia
b (O_3)	$[-0,762; -0,658]$	$[-0,927; -0,790]$	$[-0,793; -0,586]$
c (K_t)	$[0,739; 0,758]$	$[0,717; 0,689]$	$[0,703; 0,738]$
d (m_r)	$[-1,261; -1,222]$	$[-1,331; -1,278]$	$[-1,268; -1,189]$

7.10. Este análisis indica, el igual que el estudio anterior, que las tres variables son estadísticamente significativas ya que ninguno de los intervalos calculados incluye al cero. Además, los errores relativos de los coeficientes de regresión son pequeños indicando con ello la alta precisión de los mismos.

7.4.7. Validación del modelo

El modelo completo será validado con medidas en superficie para un periodo diferente al de ajuste, comprendido entre enero y diciembre de 2005. En este caso, del número total de datos disponibles una vez seleccionados aquellos correspondientes a un ángulo cenital solar inferior a 70° , se escogen 800 casos al azar en cada una de las tres estaciones.

Inicialmente, se estiman los valores de transmisividad UV mediante los modelos dados por las expresiones 7.37, 7.38 y 7.39. En la figura 7.11 estas estimaciones se representan frente a los valores obtenidos experimentalmente. A las tres gráficas incluidas en esta figura se les ha añadido la recta de pendiente unidad. Se observa claramente como los puntos se distribuyen en torno a dicha recta. Este hecho indica que el modelo completo planteado consigue estimar valores de transmisividad UV muy próximos a los valores experimentales en los tres emplazamientos estudiados.

En la figura 7.12 se representan las diferencias relativas entre los valores medidos y estimados durante el periodo de validación. Como media de estas diferencias relativas (MBE) se obtiene un valor 2,76% para Badajoz, 2,57% para Cáceres y 5,16% para Plasencia. El signo positivo de estos valores indica que el modelo empírico propuesto sobreestima en término medio los valores experimentales en las tres estaciones. Si tomamos el valor absoluto de las diferencias relativas calculadas, obtenemos un valor medio de éstas ($MABE$) de 7,39% para Badajoz, 6,90% para Cáceres y 8,17% para Plasencia.

En el cálculo de los coeficientes de regresión del modelo completo se han empleado datos tomados al azar, por tanto, es posible aplicar ese modelo a toda la serie disponible (excepto los datos registrados para ángulos cenitales solares superior a

70°). Esto se debe a que el rango de valores correspondientes a las tres variables moduladoras es suficientemente amplio como para recoger las variaciones de la transmisividad UV eritemática. De este modo, es posible estimar la variación diurna de la transmisividad UV eritemática en superficie a partir de los registros minutaros de ozono, índice de claridad y masa óptica relativa. A modo de ejemplo, en la figura 7.13 se muestra conjuntamente la evolución de la transmisividad UV eritemática medida y estimada por el modelo completo correspondiente al día 14 de marzo de 2005 en Badajoz, Cáceres y Plasencia. Es posible observar cómo, a pesar de representar un día con abundante nubosidad, la transmisividad calculada por el modelo se ajusta notablemente a los valores medidos en superficie. Además, cuando se calculan las diferencias relativas existentes entre la transmisividad estimada por el modelo y la medida en superficie, se obtiene una ligera subestimación por parte del modelo en Badajoz ($MBE = -0,17\%$) y Cáceres ($MBE = -1,41\%$), mientras que en Plasencia aparece una suave sobrestimación ($MBE = 0,96\%$). En valor absoluto, la media de estas diferencias relativas en cada emplazamiento es 4,83% (Badajoz), 6,16% (Cáceres) y 6,54% (Plasencia). Por tanto, las estimaciones realizadas mediante el modelo potencial completo reproducen las medidas en superficie con una notable exactitud en las tres estaciones.

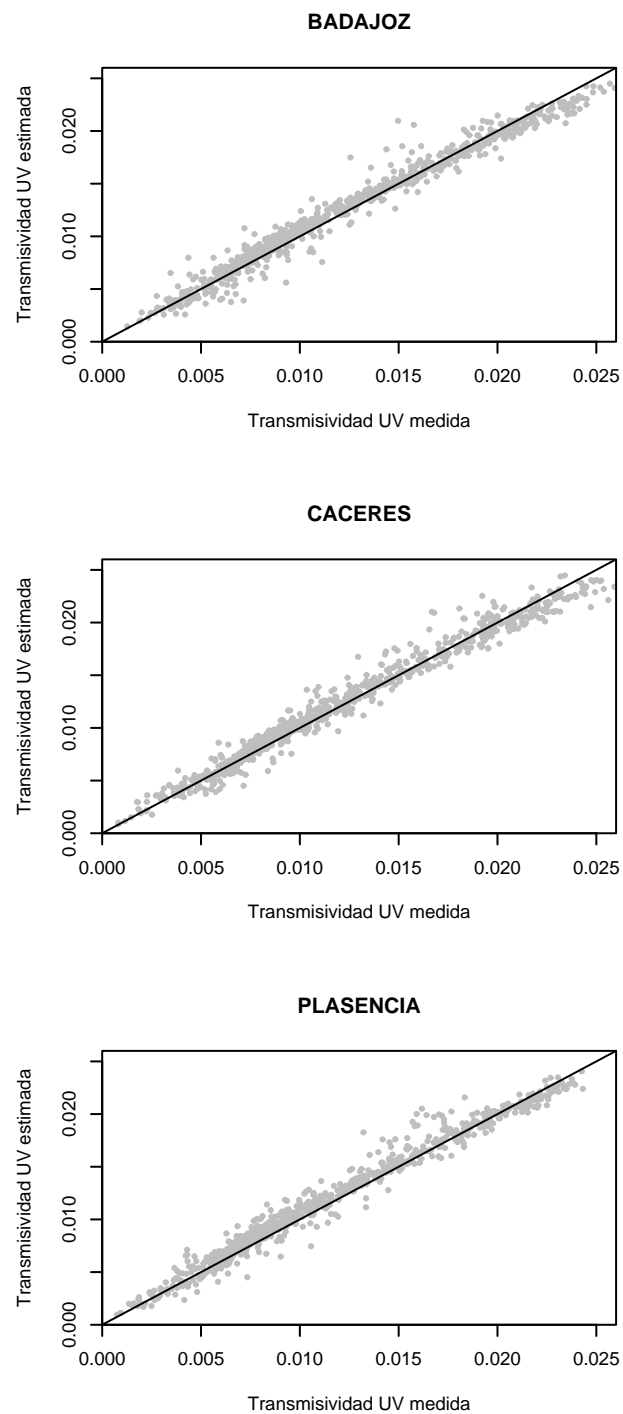


Figura 7.11: Comparación entre los valores de transmisividad UV eritemática medidos y los calculados mediante el modelo completo. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.

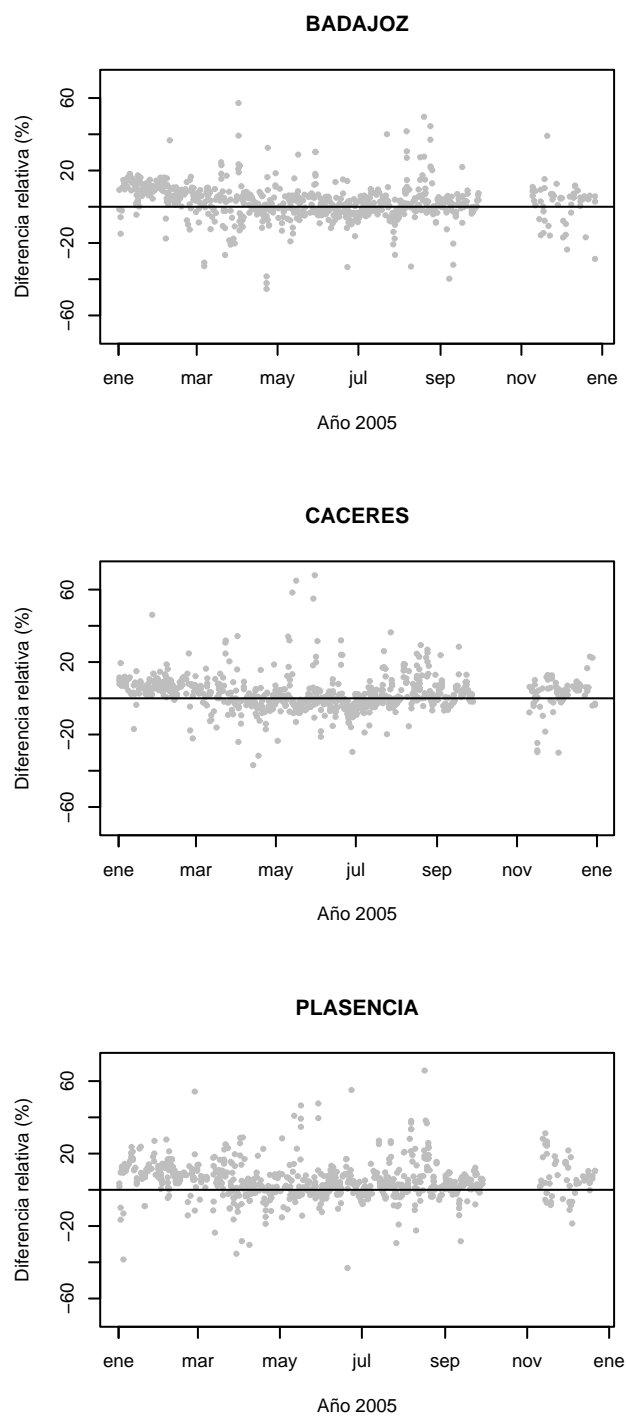


Figura 7.12: Diferencias relativas entre los valores medidos y estimados mediante el modelo potencial propuesto.

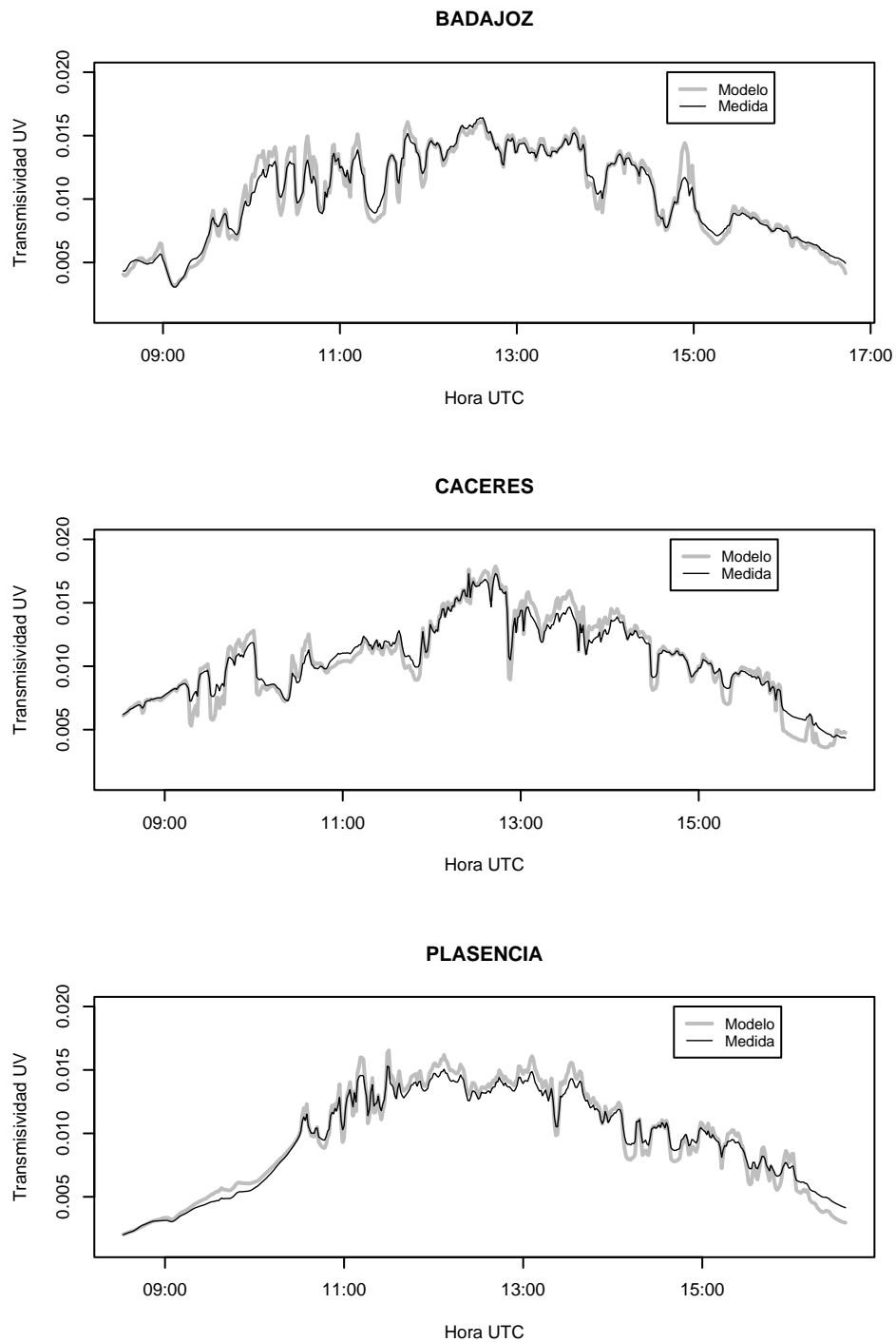


Figura 7.13: Transmisividad UV eritemática medida (línea negra) y estimada por los modelos (línea gris) 7.37 (Badajoz), 7.38 (Cáceres) y 7.39 (Plasencia). Día 14 de marzo de 2005.

Capítulo 8

Aplicaciones del modelo

8.1. Introducción

En el capítulo anterior se acaba de comprobar como los modelos empíricos propuestos consiguen reproducir adecuadamente los valores de transmisividad UV eritemática en cada uno de los tres emplazamientos de estudio. No obstante, para completar este trabajo es necesario analizar las utilidades del mismo. En este sentido, se dedica el presente capítulo a estudiar varias aplicaciones como son: la estimación y predicción del índice ultravioleta (*UVI*), el relleno de lagunas en la serie de medidas de irradiancia UV, y la reconstrucción de posibles máximos históricos.

El *UVI* se ha estandarizado como el parámetro más indicado para informar a la población sobre el riesgo de la exposición continuada a la radiación UV. El modelo empírico propuesto para el cálculo de la irradiancia UV permite, no sólo estimar el *UVI* en un momento dado, sino también su uso como modelo de predicción. El interés de esta aplicación radica en la necesidad de conocer el *UVI* con antelación suficiente para poder alertar a la población sobre los posibles riesgos que conlleva una exposición prolongada a la radiación UV.

Otra aplicación interesante del modelo consiste en la estimación de valores de irradiancia UV correspondientes a periodos en los que los radiómetros no se encontraban en funcionamiento. Esto se consigue gracias a que durante esas lagunas de datos de irradiancia UV, existen estimaciones de ozono dadas por el instrumento TOMS, así como registros del índice de claridad obtenidos a partir de medidas de irradiancia solar global.

Como última aplicación, se realiza una reconstrucción de máximos históricos correspondientes a periodos anteriores al inicio de las medidas de irradiancia UV en las tres estaciones de medida. Esta reconstrucción se efectúa asumiendo cielo despejado y es posible llevarla a cabo ya que se tienen estimaciones de ozono dadas por el instrumento TOMS desde mediados de los años 70.

8.2. Índice Ultravioleta

8.2.1. Estimación del UVI

El uso del *UVI* como parámetro destinado a informar a la población sobre los posibles efectos dañinos de la radiación UV se ha generalizado en los últimos años. Cuantitativamente el valor de este índice se calcula multiplicando la irradiancia UV eritemática (expresada en W/m^2) por 40 (WMO, 1998). Este producto proporcionará un número adimensional que suele aproximarse al entero más próximo. Así, la clasificación de este índice en diferentes categorías permite informar sobre el riesgo de padecer quemadura solar por la exposición continuada sin protección alguna a la radiación procedente del Sol. En la tabla 8.1 se presenta la clasificación realizada por la Acción Cost-713 perteneciente a la Unión Europea (Vanicek et al., 2000), observando que la exposición a la radiación solar es tanto más nociva cuanto más alto es el valor del índice. Para las latitudes correspondientes a Extremadura el UVI alcanza el valor extremo $UVI = 10$ en varias ocasiones al año.

Tabla 8.1: Categorías asignadas al índice UV en función de su grado de peligro (Acción Cost-713)

Índice UV	Riesgo
0-3	Bajo
4-6	Medio
7-9	Alto
>9	Extremo

Inicialmente se obtienen, para el año 2005, los valores experimentales diarios del *UVI* máximo en cada una de las tres estaciones de medida. Estos valores se calculan a partir del valor máximo diario de irradiancia UV eritemática medido en superficie. Por otro lado, mediante el modelo potencial completo, se estiman los valores del UVI correspondientes al año 2005 en las tres estaciones. Dicha estimación se realiza conociendo los valores de ozono, índice de claridad y masa óptica relativa correspondientes al minuto para el que se alcanza el valor máximo diario de irradiancia UV eritemática. Así, mediante las expresiones 7.37, 7.38 y 7.39, se calculan las transmisividades UV correspondientes a ese minuto en cada uno de los emplazamientos. La irradiancia UV eritemática se calcula mediante el producto entre la transmisividad UV estimada y el valor de la irradiancia UV extraterrestre. Finalmente, el *UVI* estimado por el modelo empírico se obtendrá multiplicando por 40 la irradiancia UV estimada mediante dicho modelo.

La elección del año 2005 como periodo para analizar la estimación del UVI, se

debe a que los datos de ozono, índice de claridad y masa óptica relativa no han sido empleados en el cálculo de los coeficientes de regresión de los tres modelos empíricos propuestos.

En la figura 8.1 se comprueba el buen acuerdo existente entre los valores estimados del *UVI* mediante el modelo empírico y los obtenidos a partir de las medidas experimentales. Las rectas representadas en estas figuras tienen pendiente unidad. Se observa cómo el modelo empírico analizado en este trabajo consigue estimar satisfactoriamente los valores del *UVI* máximo en las tres estaciones que, como es conocido, son los más relevantes en relación con los posibles efectos perjudiciales sobre la salud humana.

En la figura 8.2 se representan las diferencias relativas existentes entre el *UVI* estimado mediante el modelo y el obtenido experimentalmente en los tres emplazamientos. Se aprecia cómo, en la mayoría de los casos, las diferencias son inferiores al 10%. El valor medio de estas diferencias relativas es $MBE = 2,69\%$ (Badajoz), $MBE = 2,24\%$ (Cáceres) y $MBE = 3,91\%$ (Plasencia) indicando el signo positivo que el modelo, en término medio, sobreestima los valores experimentales del *UVI* máximo diario. Sin embargo, en la figura 8.2 se observa cómo el modelo subestima en los meses de verano, mientras que en invierno se aprecia una clara sobreestimación. Esta dependencia estacional observada en las tres estaciones podría atribuirse a la selección de un reducido intervalo de ángulos cenitales a lo largo de todo el año para la estimación del *UVI* máximo.

La media del valor absoluto de las diferencias relativas es del 6,90% (Badajoz), 6,20% (Cáceres) y 6,22% (Plasencia). Además, si se calculan las diferencias absolutas entre los índices medidos y estimados, se comprueba cómo estas diferencias, en más de un 97% de los casos en las tres estaciones, son inferiores a una unidad de índice UV ($0,025 \text{ W/m}^2$). Por tanto, mediante el modelo empírico propuesto en este trabajo es posible estimar índices UV con valores muy cercanos a los experimentales.

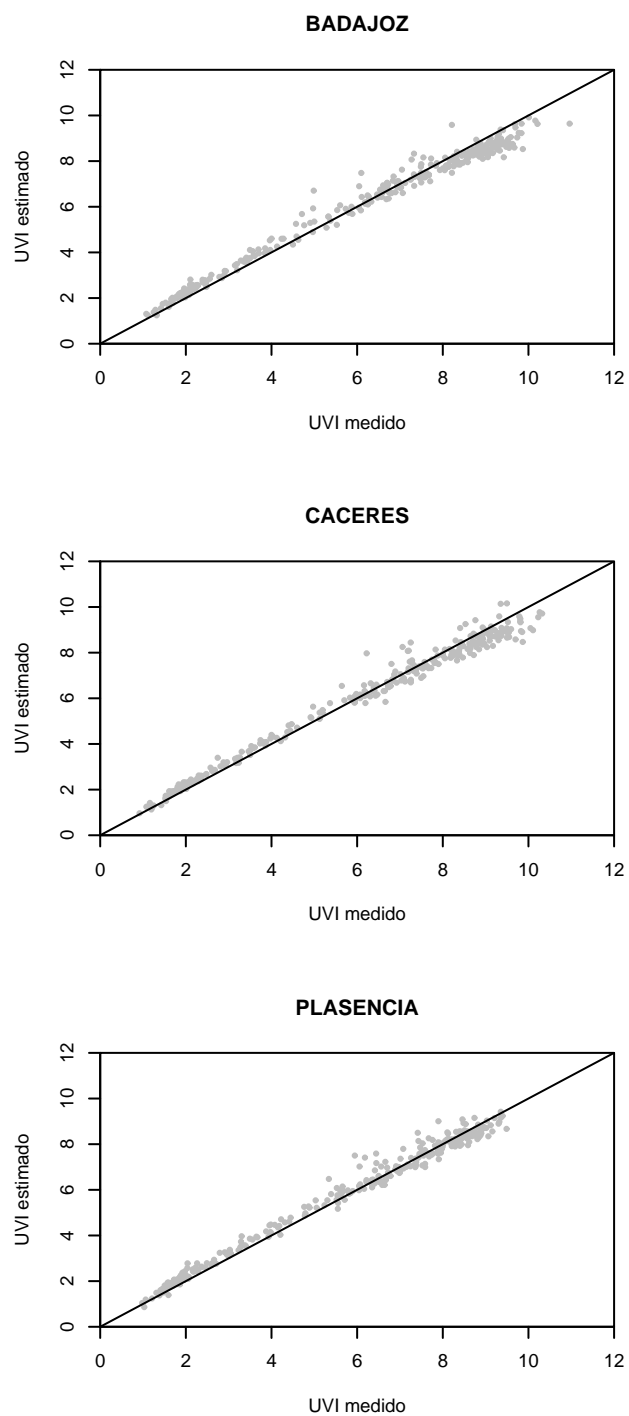


Figura 8.1: *UVI* máximo diario medido y estimado por el modelo empírico completo. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.

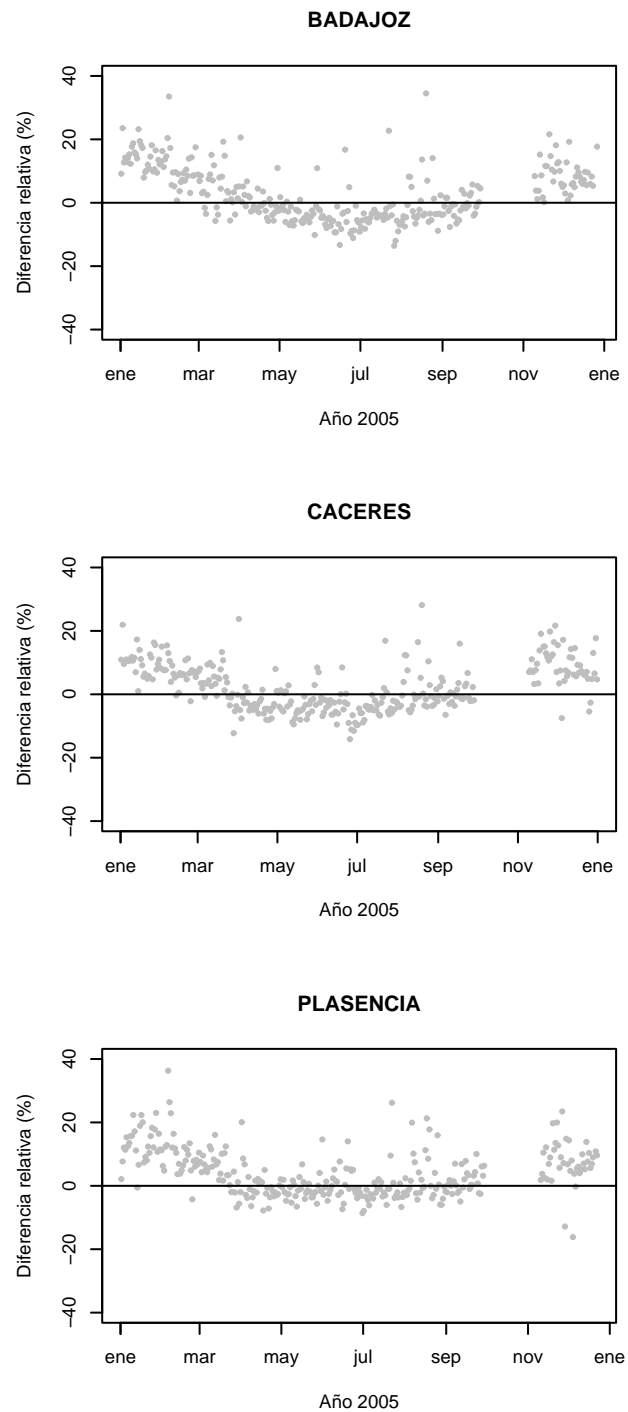


Figura 8.2: Diferencias relativas entre el *UVI* máximo diario medido y estimado por el modelo empírico completo en los tres emplazamientos de estudio.

8.2.2. Predicción del UVI

Una vez se ha verificado que el modelo empírico propuesto es un buen método para la estimación del *UVI*, nos centramos en la predicción de dicho parámetro. Este interés se debe a que la principal utilidad del *UVI* consiste en poder alertar anticipadamente a la población sobre los posibles efectos negativos de una prolongada exposición a la radiación UV. Por tanto, tiene un gran interés analizar la capacidad predictiva del modelo empírico propuesto en este trabajo.

En general, la predicción del *UVI* se realiza para cielo despejado, ya que, al definirse como un índice de alerta a la población, debe proporcionarse su valor máximo posible durante el día. En este trabajo, se predice el *UVI* considerando como índice de claridad el percentil 99 del total de valores de dicho índice registrados al mediodía solar durante el periodo 2001-2004. Así, tomamos como índice de claridad un valor constante de 0,901 para Badajoz, 0,917 para Cáceres y 0,879 para Plasencia.

Además, para la predicción de ozono se aplica la hipótesis de persistencia (Lorente et al., 2002), es decir, se emplea el dato de cantidad de ozono más reciente disponible. En nuestro caso, este valor corresponderá al dato de ozono del día anterior al de la predicción. A continuación se analiza la bondad de esta suposición. Así, se consideran las estimaciones de cantidad total de ozono dadas por el instrumento TOMS en el periodo 2001-2005, en Badajoz, Cáceres y Plasencia. Se define el valor absoluto de la diferencia relativa entre dos días consecutivos t y $t+1$ como:

$$\left| \frac{[O_3]_{t+1} - [O_3]_t}{[O_3]_t} \right|. \quad (8.1)$$

El valor medio del valor absoluto de estas diferencias, en tanto por ciento, para Badajoz, Cáceres y Plasencia es del 4,9 %, 5,2 % y 5,3 %, respectivamente. Por tanto, la hipótesis de persistencia para la cantidad total de ozono es posible asumirla como válida en este trabajo.

Finalmente, se ha optado por predecir el *UVI* al mediodía solar ya que corresponde al momento en el que se alcanza el valor máximo diario, siempre que no exista nubosidad (Martínez-Lozano et al., 2002). Por tanto, se considera la masa óptica relativa correspondiente al ángulo cenital mínimo diario.

Una vez definidas las variables de entrada en el modelo empírico, se obtienen los valores de *UVI* predichos por dicho modelo. En este estudio de predicción se ha elegido el año 2005. Así mismo, se calculan los *UVI* medidos a partir de los registros de irradiancia UV eritemática correspondientes a los máximos diarios. En total se han obtenido experimentalmente 314 (Badajoz), 322 (Cáceres) y 314 (Plasencia) valores diarios del *UVI*.

En la figura 8.3 se representa la evolución anual del *UVI* máximo diario correspondiente al valor experimental y predicho en las tres estaciones. En dicha figura puede observarse cómo los valores predichos por el modelo siguen la evolución de

los valores experimentales. No obstante, se aprecia cómo la predicción sobreestima ligeramente los valores experimentales, debido principalmente a que dicha predicción se ha realizado para cielo despejado.

Para cuantificar el grado de coincidencia se han calculado las diferencias absolutas entre el *UVI* predicho y el calculado experimentalmente. Estas diferencias han sido representadas en la figura 8.4. Es importante resaltar que diferencias menores a una unidad *UVI* se obtienen en el 86% del total de casos para Badajoz, Cáceres y Plasencia. Además, diferencias menores de dos unidades *UVI* representan el 97% (Badajoz), 98% (Cáceres) y 98% (Plasencia). Por tanto, en menos del 3% del total de casos las diferencias entre el valor experimental y el predicho son iguales o superiores a 2 unidades *UVI*. Este pequeño porcentaje de casos corresponden principalmente a casos nublados, donde la incidencia de la irradiancia es menor y, por consiguiente, resulta menos dañina para la salud humana.

En la figura 8.5 se muestra la relación existente entre los valores predichos y los experimentales. A esta figura se le ha añadido la recta de pendiente unidad. Se observa cómo la mayoría de los puntos se encuentran por encima de esta recta. Este hecho muestra nuevamente cómo los valores predichos por el modelo tienden a sobreestimar ligeramente los valores experimentales, debiéndose principalmente a la nubosidad.

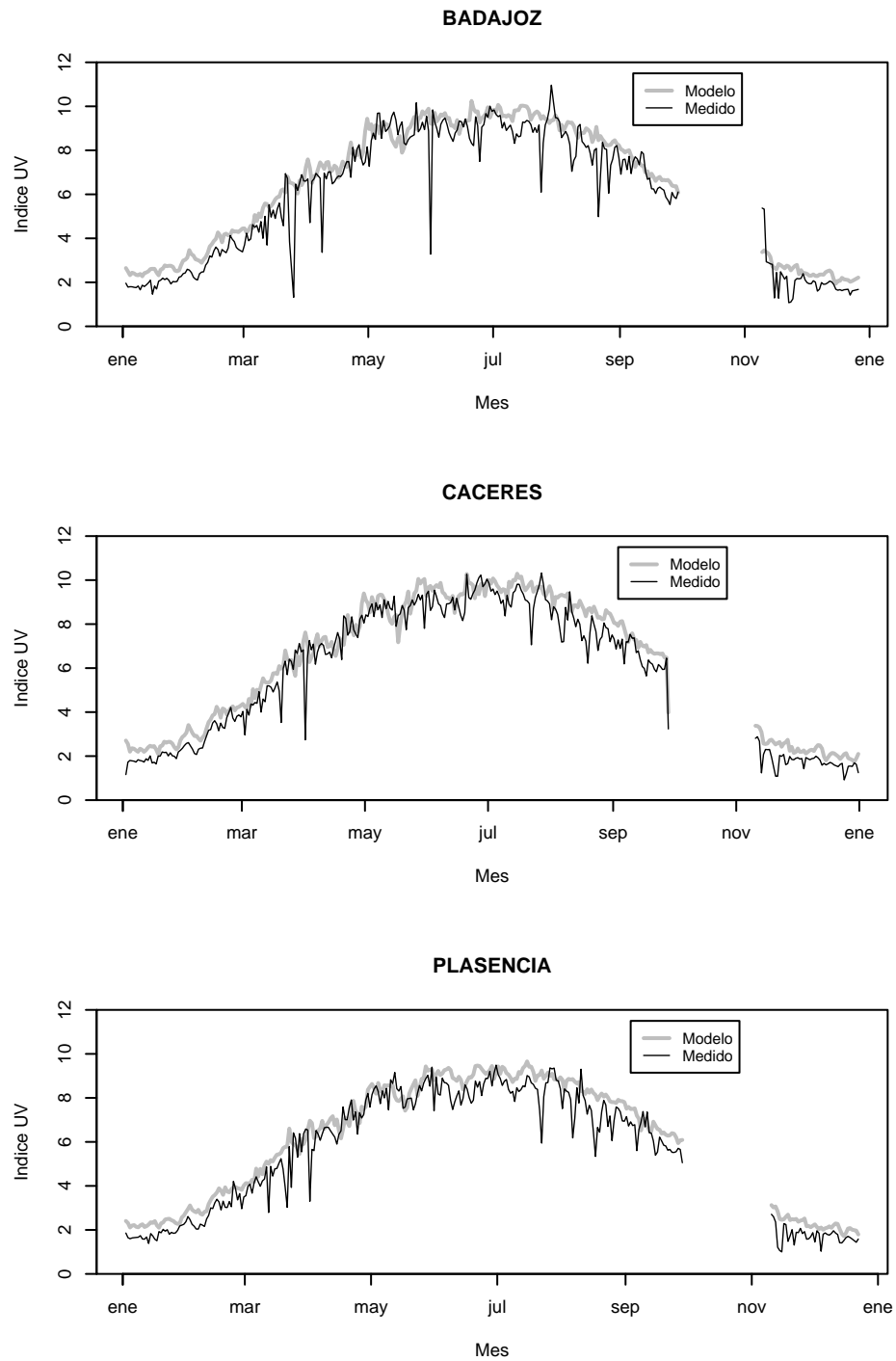


Figura 8.3: *UVI* medido (línea negra) y predicho por el modelo (línea gris).

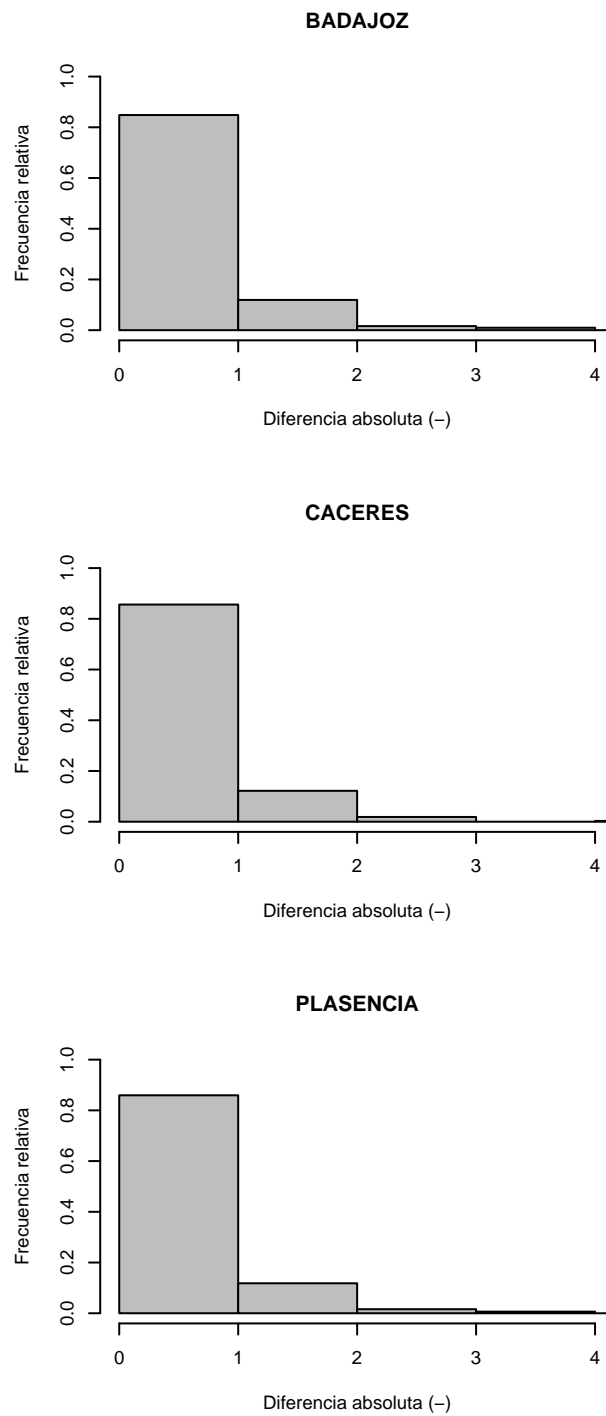


Figura 8.4: Histograma de diferencias absolutas entre el *UVI* medido y predicho.

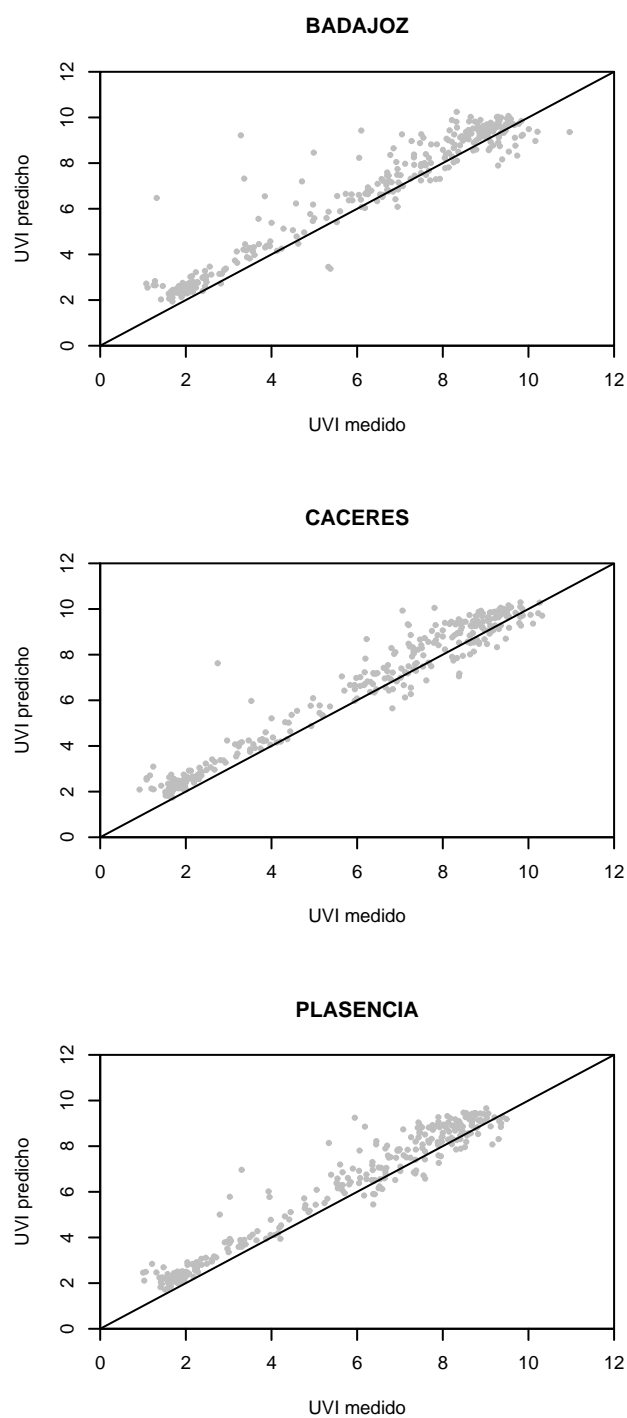


Figura 8.5: Comparación entre los valores del *UVI* predichos por el modelo y los calculados a partir de las medidas experimentales. Conjuntamente se representa la recta de pendiente unidad.

8.3. Reconstrucción de datos

8.3.1. Lagunas de datos

En el periodo de estudio existen días en los cuales no se han podido realizar mediciones de irradiancia UV eritemática debido a que los radiómetros se han trasladado a otro emplazamiento para participar en: campañas de calibrado, tareas de mantenimiento o reparación de los instrumentos, etc. A partir del modelo empírico analizado en este trabajo es posible reconstruir la serie de datos de irradiancia UV eritemática, siempre que existan medidas de las variables independientes que intervienen en el modelo. Así, por ejemplo, en la figura 8.6, se muestran 8 días correspondientes al mes de junio de 2005 para la tres estaciones. Desde el 18 al 21 de junio se representan conjuntamente los valores medidos y estimados por el modelos empírico. Los 4 días siguientes están representados únicamente por los valores estimados. Se puede observar cómo el modelo reproduce notablemente los valores experimentales, y, por tanto, las estimaciones realizadas para los días posteriores son representativas de los valores radiativos reales.

Esta interesante aplicación permite completar los huecos existentes en las series de medidas de irradiancia UV eritemática, mediante estimaciones de dicha variable obtenidas a partir del modelo empírico propuesto. Por tanto, se disponen de series completas de datos de irradiancia UV eritemática en las tres localizaciones de estudio, permitiendo un análisis preciso de la variabilidad temporal de esta variable radiativa.

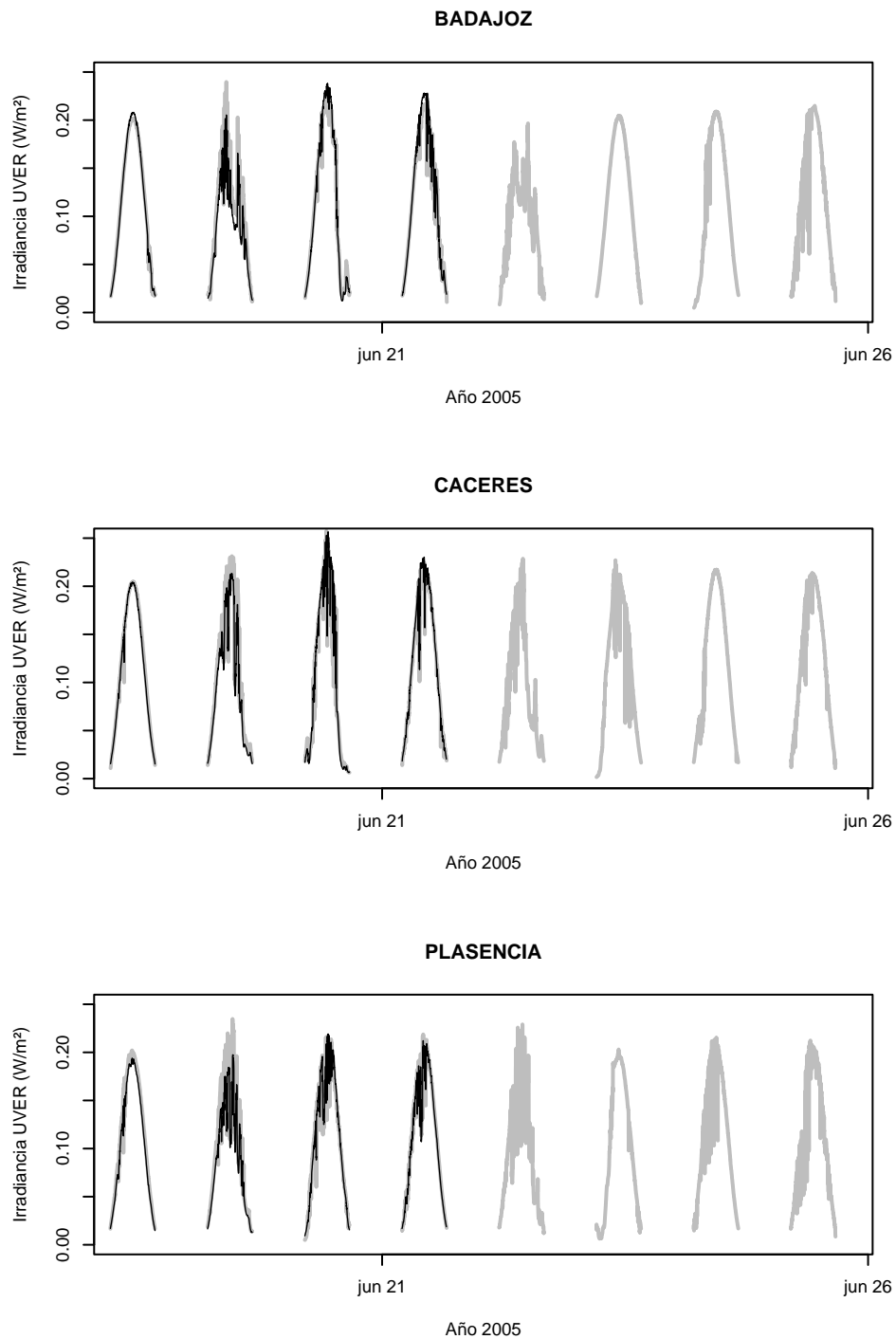


Figura 8.6: Irradiancia UV eritemática medida en superficie (línea negra) y estimada por el modelo (línea gris) correspondiente a varios días del mes de junio de 2005.

8.3.2. Máximos históricos

Una nueva aplicación del modelo empírico propuesto en este trabajo es la posibilidad de generar la serie de datos de irradiancia UV eritemática correspondiente a periodos de tiempo pasados en donde no se disponía de radiómetros UV. Como la medida de ozono proporcionada por el instrumento TOMS está disponible desde mediados de los años setenta, y la masa óptica relativa es una medida geométrica obtenida teóricamente, es posible, a partir del modelo empírico, obtener valores de irradiancia UV eritemática correspondiente a los últimos 30 años. Como no se disponen medidas del índice de claridad para ese periodo, las estimaciones de irradiancia UV se realizan para cielo despejado. Así, el valor de índice de claridad introducido en el modelo es un valor constante correspondiente al percentil 99 del total de valores registrados al mediodía solar durante el periodo 2001-2004. A modo de ejemplo se presentan en la figura 8.7 los valores de irradiancia UV eritemática estimados por el modelo correspondiente al mediodía solar para los años 1999, 2000, 2001 y 2002. En esta figura se han añadido los valores registrados en superficie, los cuales comenzaron a medirse en febrero de 2001 en Badajoz y Cáceres, y a partir de 2002 en Plasencia. Se puede observar cómo los valores correspondientes al modelo reproducen los valores máximos diarios en aquellos casos donde no existe nubosidad. Por tanto, los valores dados por el modelo para los años 1999 y 2000 pueden considerarse como una buena estimación de los posibles valores máximos diarios.

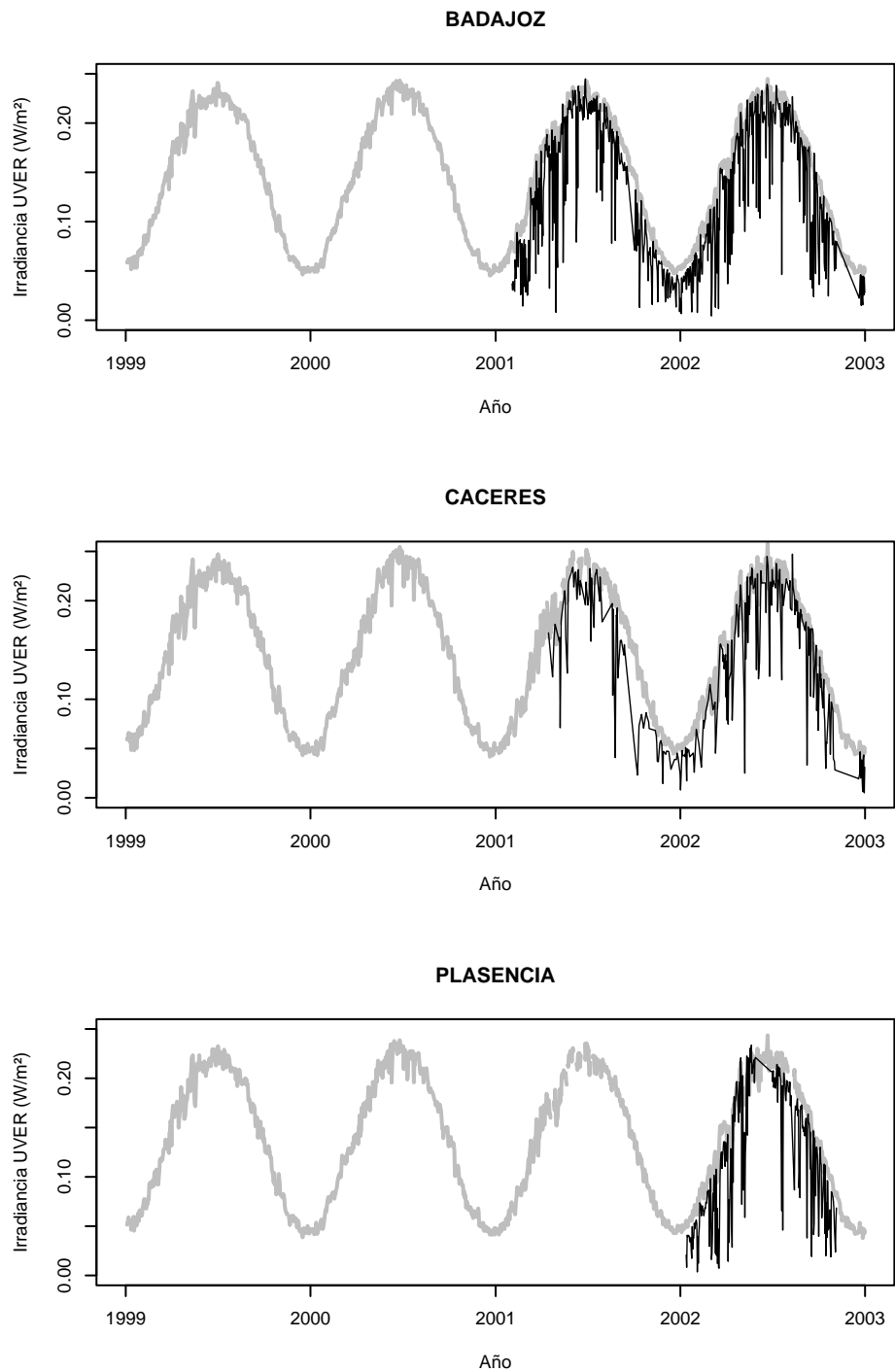


Figura 8.7: Irradiancia UV eritemática a las 12 UTC medida en superficie (línea negra) y estimada por el modelo empírico (línea gris) para cielo despejado correspondiente a los años 1999, 2000, 2001 y 2002.

Capítulo 9

Conclusiones

A continuación se resumen los principales resultados y conclusiones obtenidos en esta tesis doctoral:

Referente a la calibración de los radiómetros UV de banda ancha:

- Se ha propuesto un novedoso procedimiento de calibración que recoge adecuadamente la mayor parte de la dependencia con la altura solar mostrada por los métodos existentes en bibliografía.
- A lo largo de los cinco años de estudio se han realizado tres calibraciones exhaustivas de los radiómetros UV pertenecientes a la Red Regional de Medida de Radiación Solar en Extremadura.
- Como consecuencia de las calibraciones realizadas, se ha constatado que los factores de calibración proporcionados por el fabricante eran inexactos, siendo necesario calibrar periódicamente, al menos cada dos años, los instrumentos de medida.

Referente a la modelización:

- Se ha propuesto un modelo empírico completo que caracteriza más de un 95 % la variabilidad que presenta la radiación UV en los tres emplazamientos de estudio.
- Se ha puesto de manifiesto que la transmisividad UV eritemática en Badajoz, Cáceres y Plasencia, presenta dependencias de tipo potencial con la cantidad total de ozono, el índice de claridad y la masa óptica relativa.

Referente a la aplicación del modelo empírico:

- Se ha ensayado exitosamente la aplicación del modelo a la predicción del índice UV para cielo despejado.

- Mediante la utilización del modelo se han rellenado las lagunas de datos existentes en las series de medidas de irradiancia solar UV en Extremadura, disponiendo ahora de series completas de datos.
- Se han estimado los posibles valores máximos de irradiancia solar UV, comprobando la posibilidad de obtener series de máximos para periodos de tiempo pasados en donde no se disponía de radiómetros UV.

Anexo 1: Estadísticos utilizados en el análisis de la bondad de los modelos empíricos

Parámetro de Akaike (*AIC*)

El *Criterio de Información de Akaike* (*AIC*) está basado en la minimización de la medida de información de Kullback-Leibler entre la distribución de la variable dependiente bajo el modelo reducido y bajo el modelo completo (Akaike, 1981). En particular, para el caso de regresión lineal el parámetro de Akaike utilizado para analizar la bondad del ajuste se define como (SAS Institute, 1999):

$$AIC = N \cdot \log \left[\frac{SSE}{N} \right] + 2p,$$

donde N es el número de datos, p el número de variables independientes del ajuste y SSE es la suma de los residuos al cuadrado, obtenido en este trabajo como:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (T_{UV} - T_{UV}^*)^2,$$

donde T_{UV} es la transmisividad UV eritemática determinada a partir de las medidas de irradiancia UV eritemática, y T_{UV}^* es la transmisividad estimada por el modelo empírico correspondiente.

Raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$)

El parámetro estadístico $RMSE$ viene dado por la siguiente expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{N - p}},$$

siendo SSE la suma de los residuos al cuadrado definida anteriormente, N el número total de registros y p el número de variables que tiene el modelo de ajuste utilizado.

Cuanto más próximos estén T_{UV} y T_{UV}^* , menor será el valor del estadístico $RMSE$ y, por tanto, más apropiado será el modelo de ajuste.

Coefficiente de determinación (R^2)

Este parámetro estadístico indica la porción de variabilidad de la variable T_{UV} que explica el modelo ajustado mediante un análisis de regresión. Matemáticamente, se define como:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST},$$

siendo SSR la suma de cuadrados debida a la regresión:

$$SSR = \sum_{i=1}^N (T_{UV}^* - \overline{T_{UV}})^2,$$

y SST la suma total de los cuadrados:

$$SST = \sum_{i=1}^N (T_{UV} - \overline{T_{UV}})^2.$$

En ambas expresiones la variable $\overline{T_{UV}}$ representa el valor medio de los registros de transmisividad UV eritemática utilizados en la regresión.

Anexo 2: Estadísticos utilizados en la validación de los modelos

Parámetros MBE y $MABE$

En este trabajo, los parámetros estadísticos utilizados en la validación de los modelos de ajuste son; *media de las diferencias relativas* (MBE) y la *media del valor absoluto de las diferencias relativas* ($MABE$), los cuales vienen dados por las siguientes expresiones:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T_{UV}^* - T_{UV}}{T_{UV}},$$
$$MABE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|T_{UV}^* - T_{UV}|}{T_{UV}}$$

donde T_{UV} es la transmisividad UV eritemática determinada a partir de las medidas de irradiancia UV eritemática, y T_{UV}^* es la transmisividad estimada por el modelo de ajuste correspondiente.

Mientras que el primer parámetro estadístico indica si el modelo de ajuste sobrestima o subestima en término medio los valores de T_{UV} obtenidos a partir de medidas experimentales, el segundo parámetro informa sobre el grado de ajuste que se obtiene al emplear el método seleccionado.

Anexo 3: Contraste de hipótesis

Test t sobre significación de un coeficiente de regresión individual

El test t de significación para cada uno de los coeficientes del modelo presenta la siguiente hipótesis nula, H_0 : El coeficiente de regresión β_i es nulo, esto es, no es estadísticamente significativo, contra la alternativa $H_a: \beta_i \neq 0$, dicho coeficiente sí es significativo.

En esta prueba se emplea el parámetro estadístico t , definido por la siguiente ecuación:

$$t_{\beta_i} = \frac{\beta_i}{se(\beta_i)}, (i = 1, 2, \dots, p),$$

donde $se(\beta_i)$ es el error estándar del coeficiente β_i y p el número total de variables independientes introducidas en el modelo.

Este parámetro se distribuye como una $t(n - p - 1, 1 - \alpha)$ de Student considerando la población de la muestra n y un nivel de confianza $1 - \alpha$. Si la t calculada excede este valor tabulado, la hipótesis nula se rechaza con un nivel de significación α . Esto indica que el coeficiente β_i es estadísticamente significativo y, por tanto, la variable predictora X_i debe ser considerada en el modelo completo.

Test F acerca de la significación global de la regresión

En esta prueba la hipótesis nula es $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$, es decir, ninguna variable predictora X_i , perteneciente al modelo, explica la variación de la variable dependiente Y , frente a la hipótesis alternativa H_a : Al menos uno de los coeficientes β_i es distinto de cero, esto es, al menos una de las X_i del modelo puede ser utilizada para explicar la variación de Y .

Se puede demostrar que la hipótesis nula es cierta cuando el siguiente estadístico:

$$F = \frac{SSR/p}{SSE/(n - p - 1)} = \frac{MSR}{MSE},$$

se distribuye como una F de Snedecor con p grados de libertad en el numerador y $n - p - 1$ en el denominador, siendo n el tamaño de la muestra y p el número de variables del modelo. Además, SSR y SSE son la suma de cuadrados debidos a la regresión y residuos, respectivamente, siendo MSR y MSE las medias de los dos parámetros anteriores.

Por tanto, si el estadístico F calculado a partir del modelo es mayor que el valor tabulado, la hipótesis nula se rechaza, esto es, al menos una de las variables predictoras del modelo consigue explicar la variación de la variable dependiente.

Test d de Durbin-Watson sobre hipótesis de autocorrelación

El contraste desarrollado por Durbin y Watson en 1951 es la prueba más frecuentemente usada para detectar la presencia de autocorrelación en los modelos de regresión. Este contraste permite verificar la hipótesis nula de no autocorrelación en los residuos de la regresión frente a la alternativa de autocorrelación de primer orden bajo un esquema autorregresivo: $u_t = \rho u_{t-1} + \epsilon$.

Analíticamente el contraste se especifica del siguiente modo:

$H_0 : \rho = 0$, no existe autocorrelación de primer orden.

$H_a : 0 < |\rho| < 1$, existe autocorrelación de primer orden.

El estadístico de prueba viene dado por la siguiente expresión:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n (e_t^2)},$$

donde e_t y e_{t-1} representan los residuos de la regresión para un tiempo t y el inmediatamente anterior $t-1$.

Este estadístico es usado para comprobar la presencia de correlación positiva o negativa en los residuos empleando para ello una tabla con valores del estadístico Durbin-Watson establecidos dependiendo del tamaño de la muestra (n) y del número de regresores del modelo (k). Así,

- Si las diferencias entre residuos consecutivos es baja, el valor del estadístico d estará cercano a cero. Se considera que existe autocorrelación positiva.
- Si las diferencias son prácticamente iguales pero de signo contrario, el estadístico d estará próximo a su límite superior, establecido en 4. Entonces existe autocorrelación negativa.
- Si no existe autocorrelación, la relación entre los residuos será intermedia y, por tanto, el valor del estadístico experimental también alcanzará un valor intermedio, próximo a 2.

Bibliografía

*Bibliography

- ACS (2004). Cancer facts and figures. Technical report, American Cancer Society. Atlanta (USA).
- Akaike, H. (1981). Likelihood of a model and information criteria. *Automatic Journal of Econometrics*, 16(3-14).
- Alados-Arboledas, L., Alados, I., Foyo-Moreno, I., Olmo, F., and Alcantara, A. (2003). The influence of clouds on surface UV erythemal irradiance. *Atmospheric Research*, 66(273-290).
- Antón, M. (2004). Trabajo de investigación para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Departamento de Física. Universidad de Extremadura.
- Antón, M., Cachorro, V., Vilaplana, J., Krotkov, N., Serrano, A., Toledano, C., de la Morena, B., and Herman, J. (2006). TOMS Retrievals of noon erythemal-CIE UV irradiance compared with Brewer ground-based measurements at El Arenosillo (Southwestern Spain). *J. Geophys. Res.* (aceptado para publicación).
- Antón, M., Cancillo, M., Serrano, A., and García, J. (2005). A multiple regression analysis between UV radiation measurements at Badajoz and ozone, reflectivity and aerosols estimated by TOMS. *Physica Scripta*, T118:21–23.
- Antón, M., Navascúes, B., Serrano, A., and Cancillo, M. (2007). Análisis de la variabilidad diaria de la cantidad total de ozono en Madrid. In *5º Simposio de Meteorología y Geofísica de la APMG (Peniche, Portugal)*.
- Bais, A., Kazadzis, S., Balis, D., Zerefos, C., and Blunthaler, M. (1998). Correcting global solar ultraviolet spectra recorded by a Brewer spectroradiometer for its angular response error. *Applied Optics*, 31:6339–6344.
- Bais, A., Topaloglou, C., Kazadtzis, S., Blunthaler, M., Schreder, J., Schmalwieser, A., Henriques, D., and Janouch, M. (1999). Report of the LAP/COST/WMO intercomparison of erythemal radiometers. Technical Report TD 1051, WMO.

- Bais, A., Zerefos, C., Meleti, C., Ziomas, I., and Tourpali, K. (1993). Spectral measurements of solar UVB radiation and its relations to total ozone, SO₂, and clouds. *J. Geophys. Res.*, 98:5199–5204.
- Berger, D. (1976). The sunburning ultraviolet meter: design and performance. *Photochem. Photobiol.*, 24(6).
- Bernhard, G., Booth, C., and Ehramjian, J. (2002). The quality of data from the National Science Foundations's UV Monitoring Network for Polar Regions. In *Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment and Space*, volume 4896. SPIE.
- Blumthaler, M., Ambach, W., and Ellinger, R. (1997). Increase in solar UV radiation with altitude. *J. Photochem. Photobiol. B-Biol.*, 39:130–134.
- Bodeker, G. and McKenzie, R. (1996). An algorithm for inferring surface UV irradiance including cloud effects. *J. Appl. Meteorol.*, 35:1860–1877.
- Bodhaine, B., Dutton, E., Hofmann, D., McKenzie, R., and Johnston, P. (1997). UV measurements at Mauna Loa: July 1995 to July 1996. *J. Geophys. Res.*, 102:19265–19273.
- Bodhaine, B., Dutton, E., McKenzie, R., and Johnston, P. (1998). Calibrating broadband UV instruments: Ozone and solar zenith angle dependence. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 15:916–926.
- Brogniez, C., Cazier, L., Ramanananaherisoa, R., and Lenoble, J. (1999). Climatology of stratospheric aerosols from SAGE II and POAM II satellite measurements. evaluation of their impact on radiative forcing. In *ALPS99 Conference (Meribel, France)*, page 22.
- Burrows, W., Valle, M., Wardle, D., Kerr, J., Wison, L., and Tarasick, D. (1994). The canadian operational procedure for forecasting total ozone and UV radiation. *Meteorol. Appl.*, 1:247–265.
- Bush, B., Valero, F., Simpson, A., and Bignone, L. (2000). Characterization of thermal effects in pyranometers: A data correction algorithm for improved measurement of surface insolation. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 17:165–175.
- Cañada, J., Pedrós, G., and Boscá, J. (2003). Relationships between UV (290–385 nm) and broadband solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy*, 28:199–217.

- Cañada, J., Pedrós, G., López, A., and Boscá, J. (2000). Influences of the clearness index for the whole spectrum and of the relative optical air mass on UV solar irradiance for two locations in the Mediterranean area, Valencia and Córdoba. *J. Geophys. Res.*, 105(D4):4799–4766.
- Cachorro, V., Vergaz, R., Martín, M., de Frutos, A., Vilaplana, J., and de la Morena, B. (2001). Measurements and estimation of the tropospheric aerosol optical depth at UV spectral range. *Annales Geophysicae*, 12:1–10.
- Cancillo, M., Serrano, A., Antón, M., García, J., Vilaplana, J., and de la Morena, B. (2005). An improved outdoor calibration procedure for broadband ultraviolet radiometers. *Photochem. Photobiol.*, 81:860–865.
- Chubarova, N. and Nezval, Y. (2000). Thirty year variability of UV irradiance in Moscow. *J. Geophys. Res.*, 105:12529–12539.
- de La Casinière, A., Cachorro, V., Smolskaia, I., Lenoble, J., Sorribas, M., Houet, M., Massot, O., Antón, M., and Vilaplana, J. (2006). Comparative measurements of total ozone amount and aerosol optical depth during a campaign at El Arenosillo, Huelva, Spain. *Annales Geophysicae*, 76:3399–3406.
- de La Casinière, A., Toure, M., Masserot, D., Cabot, T., and Pinedo, J. (2002). Daily doses of biologically active UV radiation retrieved from commonly available parameters. *Photochem. Photobiol.*, 76:171–175.
- Diaz, S., Deferrari, G., Martinioni, D., and Olberto, A. (2000). Regression analysis of biologically effective integrated irradiances versus ozone, cloud and geometric factors. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 62:629–638.
- Diffey, B. (1991). Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Phys. Med. Biol.*, 36(3):299–328.
- Dubrovsky, M. (2000). Analysis of UV-B irradiances measured simultaneously at two stations in the Czech Republic. *J. Geophys. Res.*, 105:4907–4913.
- Estupiñan, J., Raman, S., Crescenti, G., and Streicher, J.J. Barnard, W. (1996). Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *J. Geophys. Res.*, 101:16807–16816.
- Feister, P., Grewe, R., and Gericke, K. (1997). A method for correction for cosine errors in measurements of spectral UV irradiance. *Solar Energy*, 60:313–332.
- Fioletov, V., Kerr, J., and Wardle, D. (1997). The relationship between total ozone and spectral UV irradiance from Brewer observations and its use for derivation of total ozone from UV measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 24:2997–3000.

- Fioletov, V., Kerr, J., Wardle, D., Krotkov, N., and Herman, J. (2002). Comparison of Brewer ultraviolet irradiance measurements with TOMS satellite retrievals. *Optical Engineering*, 41:3051–3061.
- Fioletov, V., McArthur, L., Kerr, J., and Wardle, D. (2001). Long-term variations of UV-B irradiance over Canada estimated from Brewer observations and derived from ozone and pyranometer measurements. *J. Geophys. Res.*, 106:23009–23027.
- Foyo-Moreno, I., Alados, I., Olmo, F., and Alados-Arboledas, L. (2003). The influence of cloudiness on UV global irradiance (295–385 nm). *Agric. For. Meteorol.*, 120:101–111.
- Foyo-Moreno, I., Vida, J., and Alados-Arboledas, L. (1998). Ground based ultraviolet (290–385 nm) and broadband solar radiation measurements in South-Eastern Spain. *Int. J. Climatol.*, 18(12):1389–1400.
- Foyo-Moreno, I., Vida, J., and Alados-Arboledas, L. (1999). A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290–385 nm). *J. Appl. Meteorol.*, 38(7):1020–1026.
- Gantner, L., Winkler, P., and Kohler, U. (2000). A method to derive long-term time series and trends of UV-B radiation (1968–1997) from observations at Hohenpeissenberg (Bavaria). *J. Geophys. Res.*, 27:4879–4888.
- García, R., Cisneros, J., Hernández, E., Manzano, J., and Díaz, J. (2000). Time modeling of daily UVB values in Madrid, Spain. *J. Appl. Meteorol.*, 39:117–123.
- Gomez, I. and Camacho, J. (2004). Análisis de ozonosondeos realizados en Madrid (Periodo 1992–2002). In *IV Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Figueira da Foz (Portugal)*, volume 16, pages 764–768.
- González-Frías, C., Martínez-Lozano, J., Lorente, J., Tena, F., and Utrillas M.P. Cabo De, X. (2002). La red española de medida de radiación ultravioleta B. *Revista Española de Física*, 16(4).
- Greuer, V. (2005). The origin of ozone. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 5:9641–9668.
- Gröbner, J., Blumthaler, M., and Ambach, W. (1996). Experimental investigation of spectral global irradiance measurements errors due to a non ideal cosine response. *J. Geophys. Res.*
- Gröbner, J., Blumthaler, M., Kazadzis, S., Bais, A., Webb, A., Schreder, J., G., S., and Rembges, D. (2006). Quality assurance of spectral solar UV measurements: result from 25 UV monitoring sites in Europe, 2002 to 2004. *Metrologia*, 43:S66–S71.

- Gröbner, J. and Sperfeld, P. (2005). Direct traceability of the portable QASUME irradiance scale to the primary irradiance standard of the PTB. *Metrologia*, 42:134–139.
- Gröbner, J., Vergaz, R., Cachorro, V., Henríquez, D., Lamb, K., Redondas, A., Vilaplana, J., and Renmbges, D. (2001). Intercomparison of aerosol optical depth measurements in the UVB using Brewer spectrophotometers and a Li-cor spectrophotometer. *Geophys. Res. Lett.*, 28:1691–1694.
- Guarnieri, R., Padilha, L., Guarnieri, F., Echer, E., Makita, K., Pinheiro, D., Schuch, A., Boeira, L., and Schuch, N. (2004). A study of anticorrelations between ozone and UV-B radiation using linear and exponential fits in southern Brazil. *Adv. Space Res.*
- Huber, M., Blumthaler, M., and Schreder, J. (2003). Solar UV measurements with Robertson-Berger type instruments: influence of the detector’s internal humidity status. *Agric. For. Meteorol.*, 120:39–43.
- Huber, M., Blumthaler, M., Schreder, J., Bais, A., and Topaloglou, C. (2002). Effect of ambient temperature on Robertson-Berger type erythematous dosimeters. *Applied Optics*, 41:4273–4277.
- INM (2001). *Guía resumida del clima en España 1971-2000*. Instituto Nacional de Meteorología.
- INM (2004). *The first Iberian UV-visible instrument intercomparison. Final report*. Instituto Nacional de Meteorología.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press Canada.
- Kallikosta, S., Kaurola, J., Taalas, P., Hernan, J., Calarier, E., and Krotkov, N. (2000). Comparison of daily UV doses estimated from Nimbus 7/TOMS measurements and ground-based spectroradiometric data. *J. Geophys. Res.*, 105(D4):5059–5067.
- Kimlin, M., Sabburg, J., Parisi, A., and Meltzer, R. (2003). Comparison of Brewer spectrophotometer ultraviolet data from similar latitudes in the Northern and Southern hemisphere. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 65:1401–1410.
- Krotkov, N., Bhartia, P. K., Herman, J., Slusser, J., Labow, G., Scott, G., Janson, G., Thomas, F., and Holben, B. (2005). Aerosol ultraviolet absorption experiment (2002 to 2004), part 1: ultraviolet multifilter rotating shadowband radiometer calibration and intercomparison with cimel sunphotometers. *Optical Engineering*, 44(4).

- Krzyscin, J. and Jaroslowski, J. (1997). Factor affecting solar UV radiation changes: a study of the new Robertson-Berger meter (UV-biometer model 501A) and Brewer data records taken at Belsk, Poland, 1993-1994. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 59:1133–1142.
- Kudish, A., Wolf, D., and Machalv, Y. (1983). Solar radiation data for Beer Sheva, Israel. *Solar Energy*, 30:33–37.
- Lam, K., Ding, A., Chan, L., Wang, T., and Wang, T. (2002). Ground-based measurements of total ozone and UV radiation by the Brewer spectrophotometer #115 at Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 36:2003–2012.
- Lantz, K., Disterhoft, P., DeLuisi, J., Early, E., Thompson, A., Bigelow, D., and Slusser, J. (1999). Methodology for deriving clear-sky erythemal calibration factors for UV broadband radiometers of the U.S. central UV calibration facility. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 16:1736–1752.
- Lenoble, J., editor (1993). *Atmospheric radiative transfer*, page 532. Deepak Publishing.
- Leszczynski, K., Jokela, K., Visuri, R., , and Ylianttila, L. (1995-1996). Calibration of the broadband radiometers of the Finnish solar UV monitoring network. *Metrologia*, 32:701–704.
- Leszczynsky, K., Jokela, K., Ylianttila, L., Visuri, R., and Blumthaler, M. (1998). Erythemally weighted radiometers in solar UV monitoring: results from the WMO/STUK intercomparison. *Photochem. Photobiol.*, 67(2):212–221.
- Lorente, J., de Cabo, E., and Campmany, E. (2002). Predicción diaria del índice UV a partir de la columna de ozono observada por el TOMS. In *III Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Valencia*.
- Lorente, J., Redaño, A., and de Cabo, X. (1994). Influence of urban aerosol on spectral solar irradiance. *J. Appl. Meteorol.*, 33:406–415.
- Madronich, S. (1992). Implications of recent total atmospheric ozone measurements for biologically active ultraviolet radiation reaching the earth surface. *Geophys. Res. Lett.*, 19:37–40.
- Madronich, S. (1993). *Environmental UV Photobiology*, chapter The atmosphere and UV-B radiation at ground level, pages 1–39. Plenum, New York.
- Madronich, S., McKenzie, R., Bjorn, and Caldwell, M. (1998). Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *J. Photochem. Photobiol. B-Biol.*, 46:5–19.

- Mantis, H., Repapis, C., Phylandras, C., Paliatsos, A., Zerefos, C., Bais, A., Meleti, C., and Balis, D. (2000). A 5-year climatology of the solar erythemal ultraviolet in Athens, Greece. *Int. J. Climatol.*, 20:1237–1247.
- Martínez-Lozano, J., Marín, M., Tena, F., Utrillas, M., Sánchez-Muniosguren, L., González, L., Cuevas, E., Redondas, A., Lorente, J., Cabo De, X., Cachorro, V., Vergaz, R., Frutos De, A., Díaz, J., Expósito, F., Morena De La, B., and Vilaplana, J. (2002). UV Index experimental values during the years 2000 and 2001 from the Spanish broadband UVB radiometric network. *Photochem. Photobiol.*, 76:181–187.
- Martínez-Lozano, J., Tena, F., and Utrillas, M. (1999). Ratio of UV to global broad band irradiation in Valencia, Spain. *Int. J. Climatol.*, 19:903–911.
- Masserot, D., Lenoble, J., Brogniez, C., Houet, M., Krotkov, N., and McPeters, R. (2002). Retrieval of ozone column from global irradiance measurements and comparison with TOMS data. A year of data in the Alps. *Geophys. Res. Lett.*, 29.
- Matthijssen, J., Slaper, H., Reinen, H., and Velders, G. (2000). Reduction of solar UV by clouds: A comparison between satellite derived cloud effects and ground-based radiation measurements. *J. Geophys. Res.*, 105(D4):5069–5080.
- Mayer, B. and Kylling, A. (2005). The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.*, 5(7).
- Mayer, B. and Seckmeyer, G. (1996). All-weather comparison between spectral and broadband Robertson-Berger UV measurements. *Photochem. Photobiol.*, 64(5).
- Mayer, B., Seckmeyer, G., and Kylling, A. (1997). Systematic long term comparison of spectral UV measurements and UV-SPEC modelling results. *J. Geophys. Res.*, 102(D7).
- McKenzie, R., Matthews, W., and Johnston, P. (1991). The relationship between erythemal UV and Ozone derived from spectral irradiance measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 18:2269–2272.
- McKinlay, A. and Diffey, B. (1987). A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE Journal*, 6:21–27.
- McPeters, R., Bhartia, P., Krueger, A., Herman, J., Wellemeyer, C., Seflor, C., Jaross, G., Torres, O., Moy, L., Labow, G., Byerly, W., Taylor, S., Swisler, T., and Cebula, R. (1998). Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data products User Guide. Technical Report TP-1998-206895, NASA.

- Meek, D., Prueger, J., Sauer, T., Kustas, W., Hipps, L., and Hatfield, J. (1999). A note on recognizing autocorrelation and using autoregression. *Agric. For. Meteorol.*, 96:9–17.
- Michelletti, M., Piacentini, R., and Madronich, S. (2003). Sensitivity of biologically active UV radiation to stratospheric ozone changes: Effects of action spectrum shape and wavelength range. *Photochem. Photobiol.*, 78:456–461.
- Murillo, W., Cañada, J., and Pedrós, G. (2003). Correlation between global ultraviolet (290-385 nm) and global irradiation in Valencia and Córdoba (Spain). *Renewable Energy*, 28:409–418.
- Neter, J. and Wasserman, W. (1974). *Applied Linear Statistical Models*. Inc. Illinois.
- Nuñez, M. and Sosa, J. (1999). *Climatología de Extremadura (1961/1990)*. Instituto Nacional de Meteorología.
- Nunez, M., Michael, K., Turner, D., Wall, M., and Nilsson, C. (1997). A satellite-based climatology of UV-B irradiance for antarctic coastal regions. *Int. J. Climatol.*, 17(10).
- Ogunjobi, K. and Kim, Y. (2004). Ultraviolet (0.280-0.400) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmospheric Research*, 71:193–214.
- Oppenrieder, A., Hoeppe, P., Reuder, J., Schween, J., and Schreder, J. (2003). Simplified calibration for broadband solar ultraviolet radiation measurements. *Photochem. Photobiol.*, 78(6):603–606.
- Palancar, G. and Toselli, B. (2004). Effects of meteorology of the annual and interannual cycle of the UV-B and total radiation in Cordoba City, Argentina. *Atmospheric Environment*, 38:1073–1082.
- Parisi, A., Kimlin, M., Wong, J., and Wilson, M. (2000). Diffuse component of solar ultraviolet radiation in tree shade. *J. Photochem. Photobiol. B-Biol.*, 54:116–120.
- Petzoldt, K. (1999). The role of dynamics in total ozone deviations from their long-term means over the northern hemisphere. *Annales Geophysicae*, 17:231–241.
- Ramírez, L., Polo, J., Mora, L., Sidrach, M., and Blanco, J. (2003). Fuzzy inference system applied to the daily ultraviolet radiation evaluation (295-385 nm) from daily global radiation. *Solar Energy*, 75:447–454.
- Renaud, A., Staehelin, J., Frohlich, C., Philipona, R., and Heimo, A. (2000). Influence of snow and clouds on erythral UV radiation: Analysis of Swiss measurements and comparison with models. *J. Geophys. Res.*, 105:4961–4969.

- Robertson, D. (1972). *Solar radiation in the relation to human skin burn and cancer*. PhD thesis, University of Queensland, Australia.
- Sabburg, J., Parisi, A., Wong, J., and Meldrum, L. (2001). Preliminary UV, ozone and cloud comparison between Southern and Northern Hemisphere, sub-tropical latitude sites during 1996/1997. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 63:1623–1629.
- SAS Institute (1999). SAS/SAT User's Guide. Technical Report Cary, North Carolina, USA, Statistical Analysis System (SAS) Institute.
- Scintec (2001). User's manuals. UV standard series (II). Technical report.
- Seckmeyer, G. and Bernhard, G. (1993). Cosine error correction of spectral UV irradiances. In *Atmospheric radiation*, volume 2049, pages 140–151. SPIE.
- Serrano, A., Antón, M., Cancillo, M., and Mateos, V. (2006). Daily and annual variations of erythemal ultraviolet radiation in Southwestern Spain. *Annales Geophysicae*, 24:427–441.
- Udo, S. (2000). Sky conditions at Ilorin as characterized by clearness index and relative sunshine. *Solar Energy*, (69):45–53.
- Vanicek, K., Frei, T., Lytinska, Z., and Schnalwieser, A. (2000). UV-Index for the public. In *COST-713 Action (UV-B forecasting)*. European Commission.
- vanWeele, M., Martin, T., Blumtähler, M., Brogniez, C., den Outer, P., Elgelsen, O., Lenoble, J., Mayer, B., Pfister, G., Ruggaber, A., Walravens, B., Weihs, P., Gardiner, B., Gillotay, D., Haferl, D., Kylling, A., Seckmeyer, G., and Wauben, W. (2000). From model intercomparison toward benchmark UV spectra for six real atmospheric cases. *J. Geophys. Res.*, 105:4915–4925.
- Velazquez, F. (2001). *El ozono: ¿Cuándo protege y cuándo destruye?* McWraw-Hill.
- Vergaz, R. (2001). *Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos. Caracterización del área del Golfo de Cádiz*. PhD thesis, Universidad de Valladolid.
- Vilaplana, J. (2004). *Medida y análisis de ozono y de la radiación solar ultravioleta en El Arenosillo-INTA, (Huelva)*. PhD thesis, Universidad de Valladolid.
- Vilaplana, J., Cachorro, V., Sorribas, M., Luccini, E., de Frutos, A., Berjón, A., and de la Morena, B. (2006). Modified calibration procedures for a Yankee Environmental System UVB-1 biometer based on spectral measurements with a Brewer spectrophotometer. *Photochem. Photobiol.*, 82:508–514.

- Vilaplana, J., Sorribas, M., Luccini, E., Vergaz, R., Cachorro, V., Piacentini, R., González-Frías, C., de la Morena, B., and De Frutos, A. (2002). Calibración de un biómetro Yankee UVB-1 basada en medidas espectrales de un espectrofotómetro Brewer de doble monocromador. In *III Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica (Valencia)*, volume 3, pages 1204–1208.
- Webb, A. and Holick, M. (1988). The role of sunlight in the cutaneous production of vitamin D3. *Annu. Rev. Nutr.*, 8:375–399.
- WHO (1995). Protection against exposure to ultraviolet radiation. Technical Report 17, World Health Organization.
- WMO (1996). WMO-UMAP workshop on broad-band UV radiometers. Technical Report 120, WMO/Global Atmosphere Watch.
- WMO (1998). Report of the WMO-WHO meeting of experts on standardization of UV indices and their dissemination to the public. Technical Report 127, WMO/Global Atmosphere Watch.
- WMO (1999). Report of the LAP/COST/WMO intercomparison of erythral radiometers. Technical Report 141, WMO/Global Atmosphere Watch.
- WMO (2003a). Quality assurance in monitoring solar ultraviolet radiation: the state of the art. Technical Report 146, WMO/Global Atmosphere Watch.
- WMO (2003b). Scientific assessment of ozone depletion: 2002, global ozone research and monitoring project. Technical Report 47, World Meteorological Organization.
- Xu, G. and Huang, X. (2000). Characterization and calibration of broadband ultraviolet radiometers. *Metrologia*, 37:235–242.
- Zerefos, C. (2002). Long-term ozone and UV variations at Thessalonika, Greece. *Phys. Chem. Earth*, 27:455–460.