

Intercomparación de calibración de instrumentos de medida de irradiancia eritemática en banda ancha en los laboratorios de AEMET e INTA

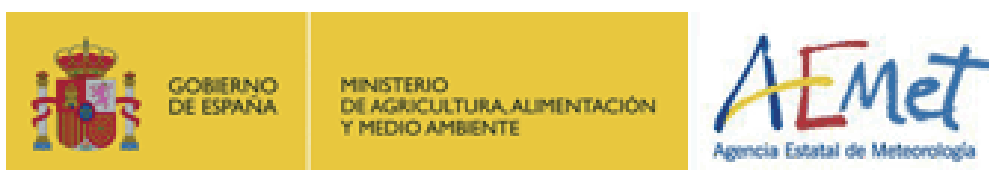
Nota técnica 7 de AEMET

Ana Díaz ⁽¹⁾, María Postigo ⁽¹⁾, María López ⁽¹⁾, José Manuel Vilaplana ⁽²⁾,
Antonio Serrano ⁽³⁾, María Luisa Cancillo ⁽³⁾, Julian Gröbner ⁽⁴⁾,
Gregor Hülsen ⁽⁴⁾

- (1) Agencia Estatal de Meteorología. Servicio de Redes Especiales y Vigilancia Atmosférica
- (2) Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo”
- (3) Universidad de Extremadura. Departamento de Física
- (4) World Radiation Center. Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos

NIPO: 281-12-008-0

Dirección de Producción e Infraestructuras
Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)



INDICE

1. Introducción	1
2. Metodología	1
3. Calibración en el laboratorio radiométrico de AEMET	3
Caracterización en el laboratorio	4
Calibración absoluta	5
4. Calibración en el laboratorio radiométrico del INTA (El Arenosillo)	6
Caracterización en el laboratorio y calibración absoluta	6
5. Resultados de la intercomparación	6
Respuesta espectral y matriz de calibración	7
Respuesta angular y corrección coseno	9
Factor de calibración absoluto	11
6. Comparación de la irradiancia eritemática y UVI	11
6.1 Comparación entre las calibraciones de los laboratorios de INTA y AEMET para cada radiómetro	11
6.2 Comparación con la irradiancia medida por el patrón QASUME	12
7. Conclusiones	15
8. Referencias	15

Intercomparación de calibración de instrumentos de medida de irradiancia eritemática en banda ancha en los laboratorios de AEMET e INTA

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es comparar el método de calibración de radiómetros de irradiancia eritemática en banda ancha utilizado por el Laboratorio Radiométrico de la Agencia Estatal de Meteorología con el método utilizado por el Laboratorio Radiométrico de la Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo” del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), tanto en lo que se refiere a las medidas como a los cálculos para la obtención de los factores de calibración.

Con este fin se realiza el proceso completo de calibración en ambos laboratorios a dos radiómetros de la marca YANKEE UVB-1, cada uno de ellos correspondiente a uno de los dos organismos implicados, en septiembre de 2009. Dicho proceso incluye la caracterización de los instrumentos en el laboratorio, con la obtención de la respuesta espectral relativa y de la respuesta angular de los mismos, y posteriormente su calibración absoluta frente a un instrumento espectral de referencia utilizando al sol como fuente.

A continuación se comparan los procedimientos, los factores de calibración obtenidos, y los datos finales (irradiancia pesada eritemáticamente) derivados de las medidas del radiómetro procesadas con ambas calibraciones. Como referencia se utiliza el documento con los resultados de la intercomparación de radiómetros UV en banda ancha llevadas a cabo por 7 laboratorios de Europa y EEUU - Hülsen et al. 2008-, con el European Ultraviolet Calibration Center (EUVC) de PMOD/WRC como laboratorio de referencia y el laboratorio del INTA uno de los participantes en dicha intercomparación.

Finalmente, con el fin de validar el procedimiento de calibración, se comparan los datos de irradiancia eritemática procedentes de los radiómetros con los del patrón europeo de ultravioleta espectral, QASUME (Quality Assurance of Spectral UV Measurements in Europe). Esta comparación se realiza aprovechando la visita de QASUME durante los períodos de calibración en AEMET y en El Arenosillo (septiembre 2009).

2. METODOLOGÍA

Los radiómetros de banda ancha están diseñados para medir la irradiancia solar pesada con la respuesta eritemática. La calibración completa de un radiómetro de UVB de banda ancha consiste en la obtención de los factores que permitan convertir la señal de salida del instrumento (en voltios), en unidades radiométricas (irradiancia eritemática efectiva).

La ecuación general de calibración viene dada por la expresión:

$$E_{CE} = (U - U_{dark}) C_{f_n}(SZA, T_{O3}) C_{oscor} \quad (1)$$

Donde,

- E_{CIE} es la irradiancia eritemática efectiva
- U_{dark} es la señal que mide el instrumento en ausencia de luz. Se calcula diariamente haciendo la media de los datos nocturnos ($SZA > 100^\circ$)
- $fn(SZA, TO_3)$ es la matriz de calibración, que indica la sensibilidad del instrumento a los cambios de ozono y de ángulo cenital solar. Los elementos de esta matriz se calculan a partir de la respuesta espectral obtenida en el laboratorio y utilizando el modelo de transferencia radiativa libradtran (Mayer y Killing 2005):

$$f(SZA, TO_3) = \frac{\int E_{rad}(SZA, TO_3, \lambda) CIE(\lambda) d\lambda}{\int E_{rad}(SZA, TO_3, \lambda) RSE(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

E_{rad} es el espectro solar calculado con el modelo de transferencia radiativa para distintos ángulos solares (SZA) y contenidos de ozono en columna (TO_3)

RSE es la respuesta espectral del instrumento obtenida en el laboratorio

CIE es el espectro de acción eritemático

Posteriormente la matriz se normaliza al valor $SZA=40^\circ$ y $TO_3=300$ DU

- $Coscor$ es la corrección coseno, y se calcula como:

$$\cos cor(\theta) = \frac{1}{f_{glo}} \quad (3)$$

siendo f_{glo} el error coseno del instrumento, que depende de la distribución de la radiación incidente en sus componentes directa y difusa

$$f_{glo} = f_{dir} \frac{E_{dir}}{E_{glo}} + f_{dif} \frac{E_{dif}}{E_{glo}}$$

f_{dir} representa el error coseno en la directa y se obtiene de la respuesta angular obtenida en el laboratorio dividida por la respuesta ideal:

$$f_{dir} = \frac{\text{angres}(SZA)}{\cos(SZA)} \quad (4)$$

f_{dif} es el error coseno en la difusa y se calcula suponiendo una distribución homogénea de la radiación e integrando en todo el hemisferio:

$$f_{dif} = 2 \int_0^{\pi/2} \text{angres}(\theta) \sin\theta d\theta \quad (5)$$

Las componentes directa y difusa de la radiación (E_{dir} y E_{dif}) se estiman a partir del mismo modelo de transferencia radiativa.

La corrección a aplicar para corregir las medidas del radiómetro por el efecto coseno dependerá de las condiciones de nubosidad durante las medidas:

- para cielos despejados se aplica la corrección global f_{glo} , que tiene en cuenta las componentes directa y difusa, y que es función del ángulo SZA
 - para cielos cubiertos o con cambios rápidos en la nubosidad, se aplica la corrección de difusa que es un valor constante independiente del ángulo
- C es el factor de calibración absoluto y se calcula utilizando la Ecuación General de la Calibración (1).

Para cada observación simultánea radiómetro-espectrorradiómetro se obtiene un valor de la constante

$$C_i = \frac{E_i}{U_i - U_{dark}} \frac{1}{Coscor} \frac{1}{f_n(40,300)} \quad (6)$$

E_i es el espectro solar obtenido con el espectrorradiómetro y pesado con la respuesta espectral del radiómetro

U_i es la media de las medidas del radiómetro durante el tiempo que dura el scan

$f_n(40,300)$ es el valor de la matriz de calibración para 40 ° y 300 DU

El factor de calibración se obtiene como el valor medio de las C_i obtenidas durante los días de calibración, que deberán ser días de cielos despejados.

3. CALIBRACIÓN EN EL LABORATORIO RADIOMÉTRICO DE AEMET

En AEMET se realiza el proceso completo de calibración de los radiómetros UVB-1, uno de ellos perteneciente a la Agencia y el otro al INTA.

El radiómetro del INTA, con nº de serie 990608, llega a la sede de AEMET el día 13 de julio de 2009 procedente de La Rábida. Se observa condensación en el interior del domo, se cambia el desecante varias veces sin que desaparezca la humedad, por lo que después de solicitar permiso al INTA se decide abrirlo para secarlo y cambiar el desecante interno. Finalmente se consigue eliminar la condensación y se comprueba que las medidas al sol están en el rango esperado.

El radiómetro de AEMET, con nº de serie 030520, pertenece al Laboratorio Radiométrico y es utilizado como patrón. Ha participado en la Campaña de Intercomparación de radiómetros de medida de UV en banda ancha del Arenosillo 2007 y fue llevado a Davos en el verano de 2008 para su calibración, por lo que se dispone de información de referencia sobre sus factores de calibración.

Durante los últimos días de agosto se caracterizan ambos radiómetros en el laboratorio y el día 1 de septiembre se instalan en la terraza del Centro Radiométrico para su calibración absoluta. Simultáneamente se toman medidas espectrales con el espectrorradiómetro Bentham DTM300 y el espectrofotómetro Brewer 186, ambos propiedad de AEMET. Además, se dispone de las observaciones de la unidad QASUME, instalada en Madrid durante estos días para calibrar el Bentham DTM300 en UV.

Caracterización en el laboratorio

Los radiómetros se caracterizan en el laboratorio, instalándose el día anterior a su caracterización para asegurar la estabilidad. Debido a un problema con el multímetro que se utiliza para monitorizar la temperatura del radiómetro durante las medidas, este dato no puede medirse. En el caso del radiómetro de AEMET se comprueba a posteriori que la temperatura interior del instrumento se mantiene entre 46.8 y 47.0 °C, pero en el caso del radiómetro del INTA no puede hacerse.

a) Respuesta Espectral:

El sistema instalado para la medida de la respuesta espectral consiste en un doble monocromador Bentham DM-150 con redes de difracción de 2400 líneas/mm. Se utiliza una rendija que produce una FWHM de aproximadamente 2 nm. La fuente de luz es una lámpara de Xenon de 150 Watios. A la salida del monocromador un partidador de haz envía una parte de la señal al radiómetro instalado dentro de la cámara oscura, y otra pequeña parte va a un fotodiodo que mide las fluctuaciones de la lámpara para corregir las medidas. La función de transmisión del sistema ha sido obtenida previamente a partir de las medidas con un fotodiodo de Silicio (Bentham DH-si 7487/4) calibrado en el PMOD/WRC.

El software BenWin+ utilizado incluye la medida previa de la señal en oscuridad, y aplica la corrección a cada uno de los valores.

Se obtiene la respuesta espectral de los radiómetros con:

- Rango: de 270 a 400 nm
- Paso de 1 nm
- Nº de medidas para cada valor: 5
- Se normaliza al valor máximo

b) Respuesta Angular:

La fuente de luz es una lámpara de Xenon de 450 Watios libre de ozono, que se encuentra a 3 metros del radiómetro. Este está instalado en la cámara sobre un goniómetro con resolución angular de 0.001°, y se va girando para obtener las medidas con distinto ángulo de incidencia. El eje de rotación pasa por el plano de recepción del radiómetro.

Se realizan dos respuestas angulares, con dos orientaciones distintas del radiómetro, para obtener las medidas en los cuatro cuadrantes N, S, E y O (tomando como referencia N la dirección del conector). Las respuestas tienen:

- Rango: de -90° a 90°
- Paso: de 1°
- N $^{\circ}$ de medidas para cada valor: 5
- Se normaliza al valor correspondiente al ángulo de incidencia normal

Calibración Absoluta

La calibración absoluta se lleva a cabo en la terraza de la sede de AEMET, comparando las medidas simultáneas de los radiómetros frente a un instrumento espectral de referencia, con el Sol como fuente. Como referencia se escoge El Brewer 186, doble monocromador, que ha funcionado durante los días de campaña con su programa de medidas habitual, similar al del resto de instrumentos de la red Brewer de AEMET. Esto supone un total de aproximadamente 30 espectros UV diarios.

Los espectros medidos por el Brewer tienen rango 286.6 a 363.0 nm y paso 0.5nm, por lo que deben ser extendidos hasta 400 nm con el fin de obtener la irradiancia pesada eritmáticamente. La extrapolación se hace utilizando el software UVBrewer desarrollado por Martin Stanek. Además, se aplica a los espectros del Brewer la calibración frente a QASUME obtenida en la intercomparación del Arenosillo 2009 para corregir sus medidas con el patrón espectral de UV.

El día 1 de septiembre se instalan los dos radiómetros en la terraza del Centro Radiométrico, cerca de los dos instrumentos espectrales.

Se toman medidas durante los días 1 a 5 de septiembre (días julianos 244–248). Las condiciones meteorológicas durante estos días son de cielos despejados en general, con algunas nubes (sobre todo cirros) a partir de la tarde los días 244 y 245 y el 248. Para el cálculo del factor de calibración absoluto se eligen las medidas correspondientes a ángulos SZA $< 75^{\circ}$ de dos días despejados, 246 y 247, un total de 44 observaciones del Brewer 186.

En el caso de los radiómetros los datos utilizados son medias minuales, obtenidas a partir de medidas cada 10 sg. Con las medidas nocturnas se calcula el offset de los instrumentos.

Mientras el Brewer hace un barrido por todo el rango de medida, teniendo el scan una duración de 4,5 minutos, los radiómetros proporcionan medidas integradas cada minuto. Para que las medidas a comparar puedan considerarse simultáneas, se eligen para cada scan las medidas del radiómetro que corresponden al momento en que el espectrorradiómetro está midiendo en la longitud de onda de máxima efectividad eritemática. Además, para la obtención del factor absoluto sólo se eligen días despejados para evitar que los cambios rápidos en las condiciones atmosféricas introduzcan errores en los cálculos.

Los valores de ozono medio diario obtenidos con el Brewer 186 y las condiciones meteorológicas en estos días, se recogen en la tabla siguiente:

fecha	dia juliano	ozono medio	condiciones meteorológicas
01/09/2009	244	291	cirros + cúmulos a partir de las 15 h
02/09/2009	245	295	cirros + cúmulos a partir de la tarde
03/09/2009	246	285.7	despejado, cirros de 8 a 9 h
04/09/2009	247	278.5	despejado
05/09/2009	248	285.6	despejado con algunas nubes

4. CALIBRACIÓN EN EL LABORATORIO RADIOMÉTRICO DEL INTA (EL ARENOSILLO)

Todo el proceso de calibración de los dos radiómetros, caracterización en el laboratorio y calibración absoluta, se lleva a cabo en las instalaciones del INTA en El Arenosillo durante los días 7 al 13 de septiembre, inmediatamente después de hacerlo en Madrid, por lo que las propiedades de los radiómetros no han experimentado cambios entre ambas calibraciones.

Caracterización en el laboratorio

Para la obtención de la respuesta espectral se utiliza como fuente de luz es una lámpara de Xenon de 450 W unida a un monocromador Gemini 180 (con FWHM 2 nm). A la salida de este una esfera de integración proporciona luz al radiómetro y a un fotodiodo de referencia calibrado en el PMOD/WRC. A partir de las medidas de ambos se obtiene la respuesta espectral relativa del radiómetro en el rango 280 a 400 nm con paso 1 nm.

En cuanto a la respuesta angular, la fuente de luz es una lámpara halógena de 1000 W montada sobre un brazo vertical y alineada con el radiómetro montado sobre un goniómetro que gira, de forma que se obtienen medidas variando el ángulo de incidencia de -90 a 90° con paso de 2°. La respuesta se realiza en una sola dirección.

Calibración absoluta

En cuanto a la calibración absoluta, se ha tomado como referencia espectral el Brewer 150, doble monocromador con sistema de corrección para el efecto coseno, instalado en la terraza de la Estación de Sondeos Atmosféricos El Arenosillo.

También durante este período, coincidiendo con la campaña de intercomparación de espectrofotómetros Brewer, se dispone de las observaciones del patrón europeo QASUME.

5. RESULTADOS DE LA INTERCOMPARACIÓN

A continuación se muestran los resultados de las calibraciones realizadas en ambos laboratorios y los factores de la ecuación de calibración obtenidos, y se comparan entre sí. Posteriormente se analizan las medidas de cada radiómetro procesadas con

la calibración de los dos laboratorios y se comparan con los datos de QASUME para comprobar la consistencia del proceso completo de calibración.

Respuesta espectral y matriz de calibración

Las respuestas espectrales obtenidas en ambos laboratorios reproducen con exactitud el rápido descenso en la respuesta de los instrumentos entre 300 y 340 nm. A partir de este valor la señal de los radiómetros es muy baja y no puede ser medida con precisión. En concreto, en el laboratorio de AEMET el alto nivel de ruido hace imposible obtener medidas válidas por encima de 336 nm.

La figura 1 muestra la respuesta espectral relativa de cada radiómetro obtenida en los dos laboratorios junto con la respuesta CIE. En la parte inferior se representa el ratio INTA/AEMET. Se observa que en el intervalo entre 280 y 335 nm aproximadamente, las diferencias entre las respuestas de los dos laboratorios no exceden del $\pm 20\%$, y podrían ser debidas a un ligero desplazamiento en longitud de onda entre los dos sistemas. Estas diferencias pueden considerarse consistentes según los resultados de la comparación de laboratorios (Hülsen et al. 2008): *"The agreement between the measurements is fairly consistent in the shorter wavelength range, up to 340 nm, with deviations not exceeding $\pm 20\%$ for most institutes"*.

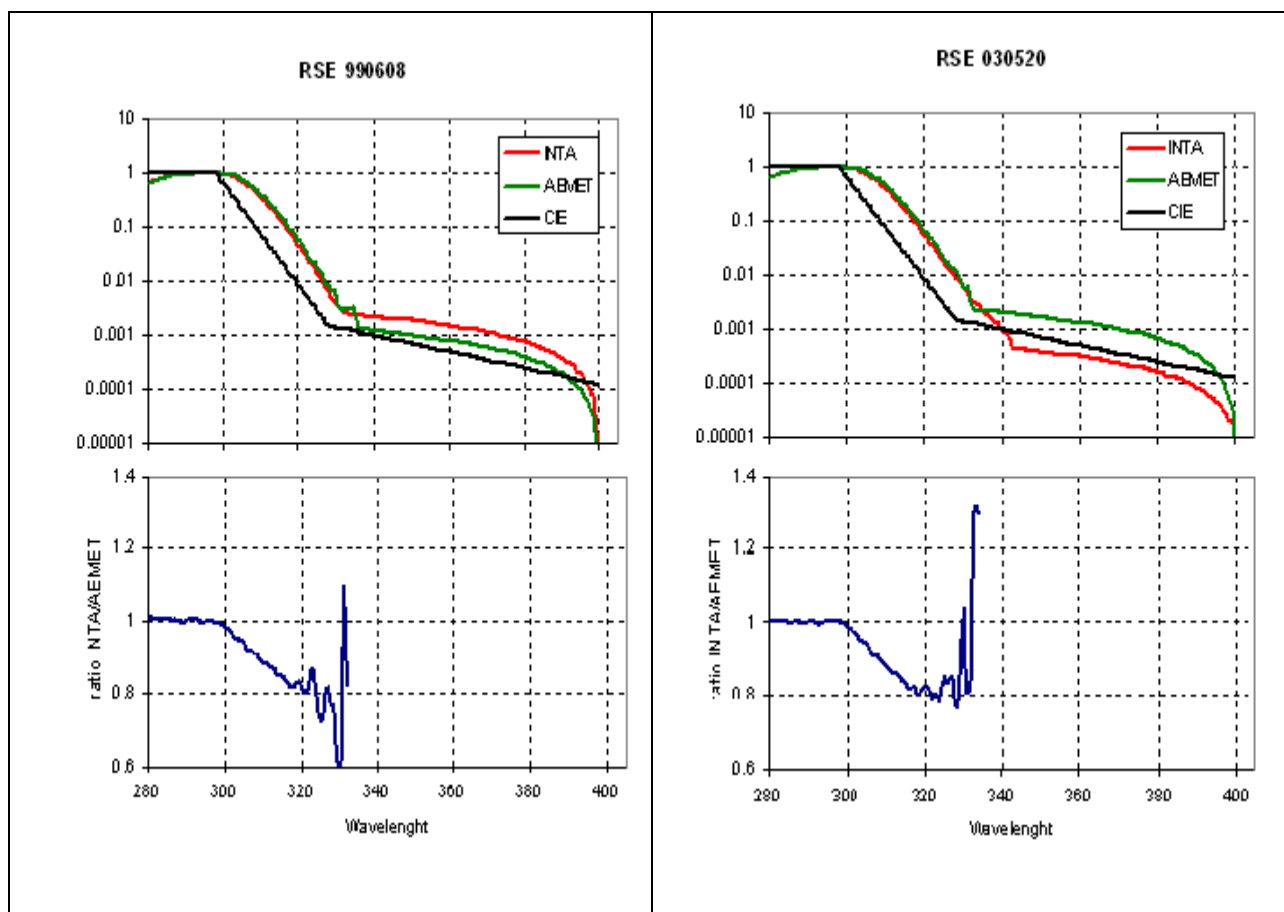


Fig. 1: Respuesta espectral relativa medida en ambos laboratorios y ratio INTA/AEMET

Por otra parte se comparan las matrices de calibración (ec. 2), que representan la sensibilidad del instrumento a los cambios en la cantidad de ozono y en el ángulo cenital solar (SZA), calculadas en cada laboratorio a partir de la respuesta espectral del instrumento y utilizando el modelo de transferencia radiativa.

La figura 2 muestra para cada radiómetro los valores de las matrices de calibración para cantidades de ozono de 200, 300 y 400 DU. Debajo se muestra el ratio INTA / AEMET para estos mismos valores de ozono. Se observa que la diferencia entre las matrices calculadas en los dos laboratorios aumenta cuando aumenta el ángulo SZA, y este aumento es más significativo cuanto mayor es la cantidad de ozono. Analizando el resultado para cada radiómetro se tiene:

- El YES990608 tiene unas diferencias que no exceden del 2% en ángulos menores de 60° y alcanza el 4% a partir de SZA=70°
- En el caso del YES030520 las diferencias son significativas, superiores al 4% y varían en más de un 4% entre los vectores correspondientes a 200 y 400 DU

Para analizar estas diferencias, y ver si son debidas a diferencias en el proceso de cálculo de la matriz o en el modelo de transferencia radiativa utilizado para estimar la irradiancia eritemática en los distintos valores de ozono, se ha calculado la matriz con el procedimiento y modelo de AEMET (LibRadtran) utilizando la respuesta espectral obtenida en el INTA. La matriz obtenida es prácticamente igual que la del INTA, lo que indica que las diferencias en las matrices de calibración están causadas por las diferencias en la respuesta espectral.

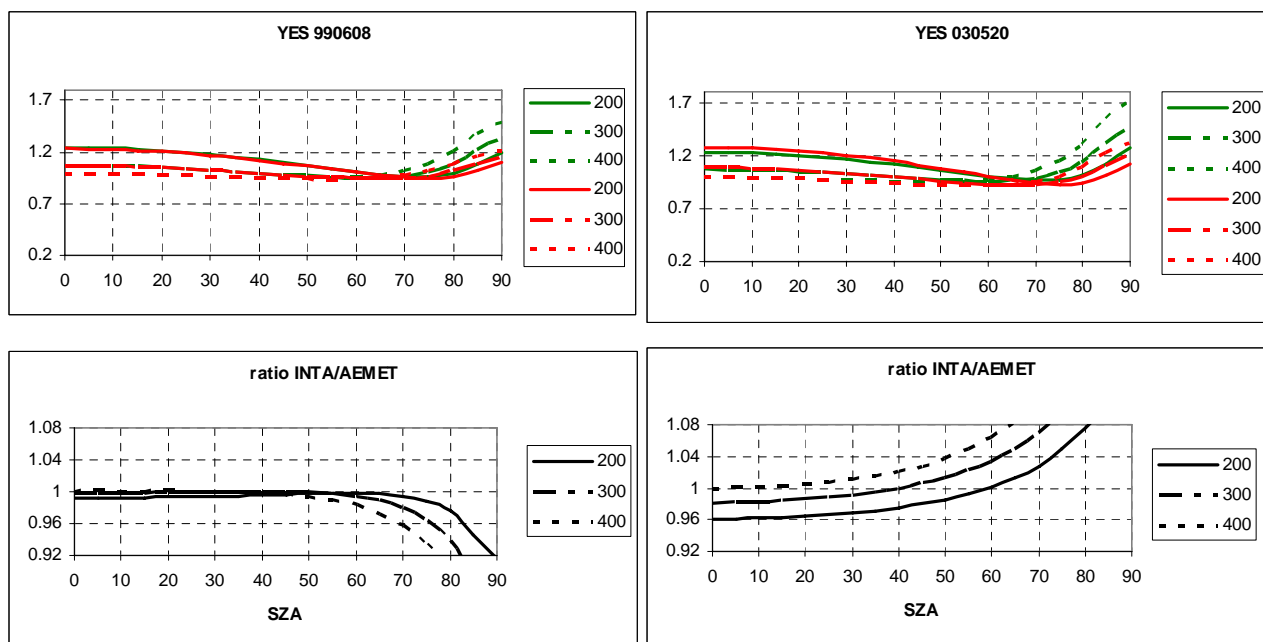


Fig. 2: Matriz de calibración para valores de ozono de 200, 300 y 400 DU calculadas a partir de la RSE en INTA (líneas verdes) y en AEMET (líneas rojas). Debajo se muestran los ratios INTA/AEMET

Respuesta angular y corrección coseno

La figura 3 muestra la respuesta angular promedio (ARF) obtenida en ambos laboratorios para cada uno de los radiómetros frente a la respuesta coseno ideal.

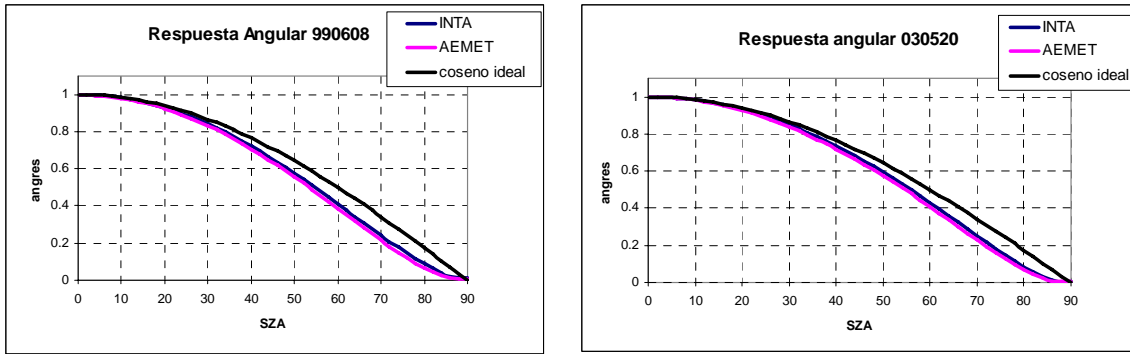


Fig. 3: Respuesta angular obtenida en INTA y AEMET frente a respuesta coseno ideal

En la figura 4 se muestra el error coseno de directa (ec. 4) obtenido a partir de la respuesta angular y la diferencia de este entre ambos laboratorios, en la parte inferior del gráfico. Como puede observarse las diferencias son menores del 5% para ángulos menores de 60°.

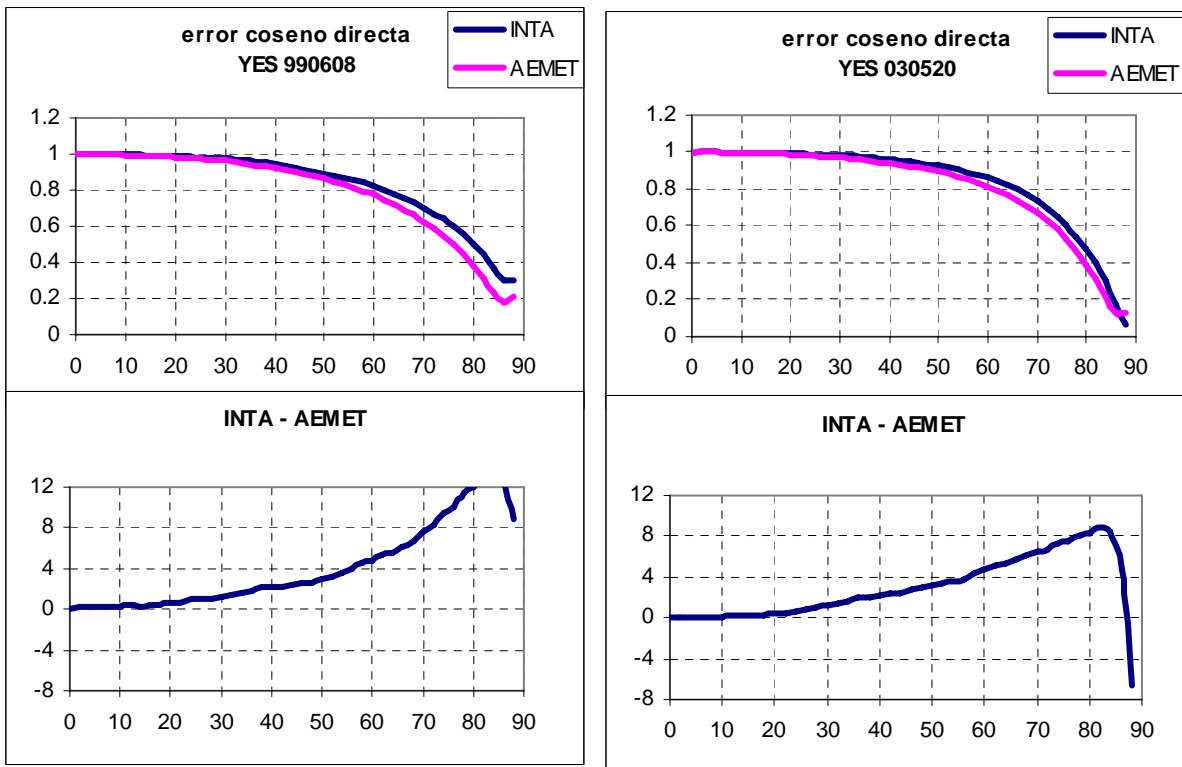


Fig. 4: Error coseno derivado de la respuesta angular y diferencia INTA – AEMET en porcentaje

En cuanto al error coseno correspondiente a la difusa (ec. 5), como se puede observar en la tabla siguiente, la diferencia entre los laboratorios es del 3.5% aproximadamente en ambos radiómetros.

Instrumento	INTA	AEMET	INTA/AEMET
990608	0.87	0.84	3.6%
030520	0.89	0.86	3.5%

Tabla 1: error coseno de difusa

Finalmente, se calcula a partir de la ec. 3 la corrección coseno a aplicar a las medidas en condiciones de cielos despejados. La corrección se representa en la figura 5 en función del ángulo zenital solar.

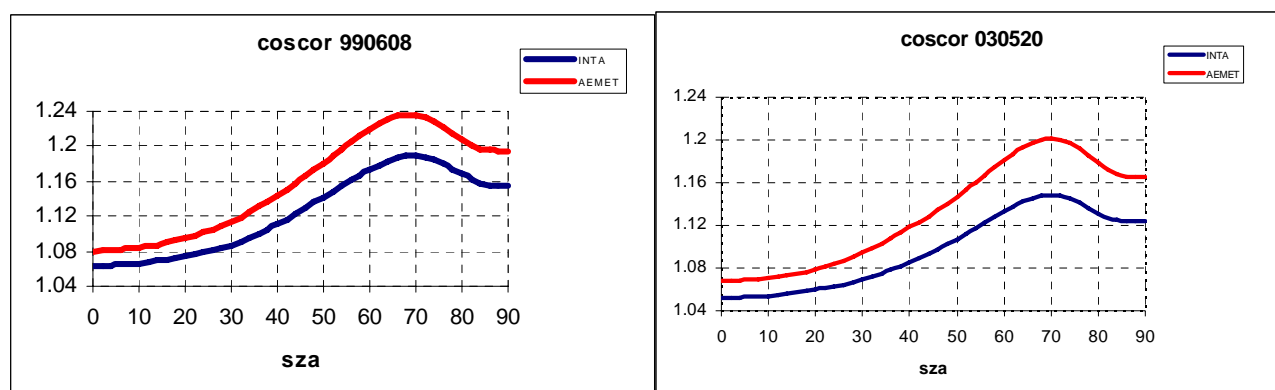


Figura 5: corrección coseno para cielos despejados

La tabla 2 muestra la corrección la corrección que correspondería aplicar para un ángulo SZA=40° según la calibración de cada laboratorio. La diferencia entre ambos laboratorios (última columna de la tabla) es aproximadamente del 3%, lo que indica que los métodos usados par obtener la corrección coseno son consistentes entre ambos laboratorios y están dentro del marco de la intercomparación de laboratorios (Hülsen et al. 2008).

Instrumento	INTA	AEMET	INTA/AEMET
990608	1.111	1.144	-2.9%
030520	1.085	1.118	-3.0%

Tabla 2: corrección coseno para SZA=40°

Calibración absoluta

En cuanto a la calibración absoluta, los resultados de los dos laboratorios se muestran en la tabla 3, junto con el ratio INTA/AEMET. Las unidades de la constante absoluta son Wm^{-2}/V . Como se observa en la tabla, las diferencias entre ambos laboratorios son menores del $\pm 2\%$.

Instrumento	INTA	AEMET	INTA/AEMET
990608	0.1233	0.1232	0.1%
030520	0.1165	0.1147	1.6%

Tabla 3: Constante global (40° y 300 DU), media y ratio INTA/AEMET

6. COMPARACIÓN DE LA IRRADIANCIA ERITEMÁTICA Y UVI

6.1. Comparación entre las calibraciones de los laboratorios de INTA Y AEMET para cada radiómetro

Puesto que todos los factores anteriores (matriz de calibración, corrección por efecto coseno, y factor de calibración absoluta) son utilizados en la Ecuación General de la Calibración (ec. 1) para convertir la señal de salida de los radiómetros (voltios) en Irradiancia Eritemática, todo el proceso de calibración realizado en ambos laboratorios puede compararse comparando la irradiancia Eritemática obtenida de los radiómetros usando ambas calibraciones.

Las figuras y tablas siguientes muestran el ratio INTA/AEMET calculado para los días de la campaña, 245-247 (en Madrid) y 255-256 (en El Arenosillo). En general, con la calibración del INTA los valores de UVI son más bajos que con la calibración de AEMET, aproximadamente un 3% para el YES990608 y un 0.3% para el YES030520.

Los saltos que se observan en las gráficas son debidos a que los factores que dependen del ángulo cenital solar se calculan para intervalos de 5°.

Radiometro	UVI (ratio INTA/AEMET)
YES 990608	0.966 ± 0.009
YES 030520	0.997 ± 0.016

Tabla 4: ratio irradiancia eritemática INTA/AEMET (media y desviación estándar)

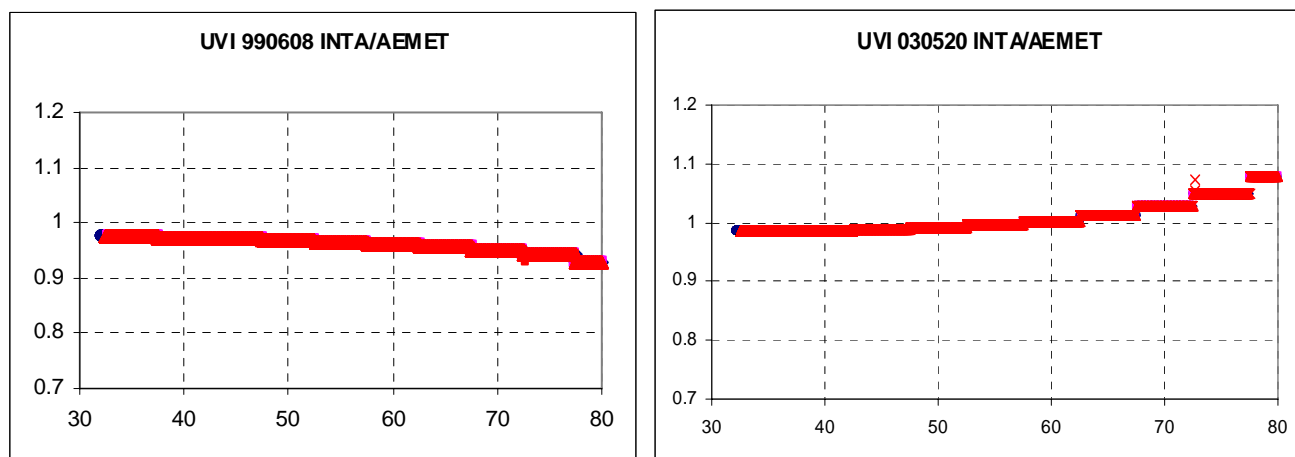


Figura 6: ratio UVI (INTA/AEMET) en función del ángulo zenital solar

6.2. Comparación con la irradiancia medida por el patrón QASUME

Para evaluar las calibraciones de los radiómetros respecto a un patrón de UV, se comparan los datos de UVI obtenidos con los instrumentos usando las calibraciones de los dos laboratorios con los datos de UVI obtenidos a partir de las observaciones de la unidad QASUME (Gröbner et al. 2005).

Se dispone de un total de 98 espectros obtenidos durante el período de estudio: los días julianos 246-247 (en Madrid), y 255-256 (en El Arenosillo).

Las observaciones QASUME abarcan un rango de 280-400 nm con paso 0.25 nm. Puesto que durante el tiempo que dura la observación espectral de QASUME (diez minutos) los radiómetros toman muchas medidas integradas (una cada minuto en AEMET y una cada diez segundos en INTA), para la comparación con el espectro de QUASUME pesado e integrado se utiliza la media de los datos de los radiómetros medidos en el intervalo correspondiente a la longitud de onda de máxima efectividad eritemática.

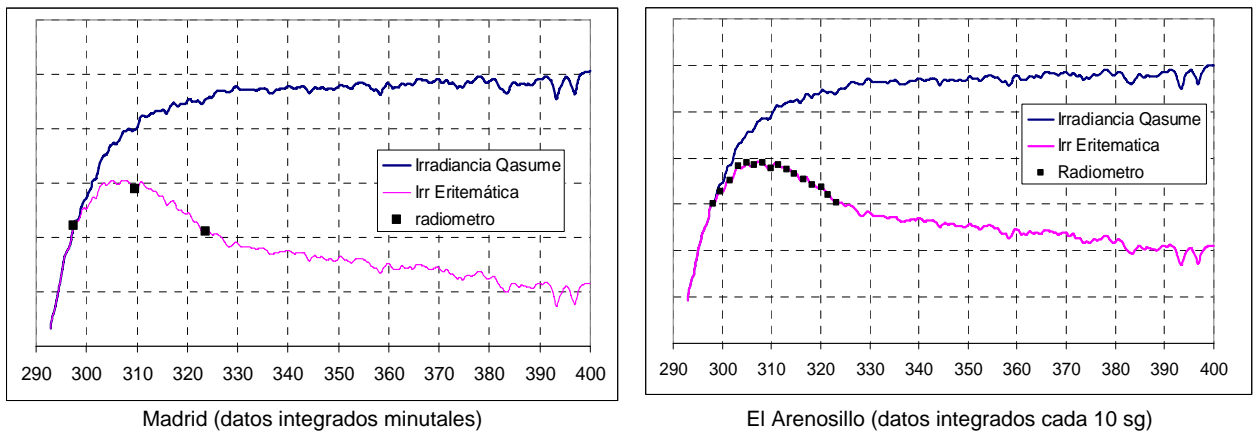


Figura 7: Elección de medidas simultáneas de los radiómetros para un scan de QASUME

La tabla 5 muestra los resultados (media y desviación típica) del ratio entre el UVI calculado con cada radiómetro usando las distintas calibraciones y el UVI obtenido con el patrón.

Instrumento	INTA/QASUME	AEMET/QASUME
990608	0.949 ± 0.073	0.98317 ± 0.069
030520	0.980 ± 0.062	0.982 ± 0.073

Tabla 5: ratio irradiancia eritemática radiómetro/QASUME (media y desviación típica)

Estos mismos resultados se muestran en las figuras siguientes en función del ángulo cenital solar. En la parte derecha de cada gráfica se incluye el histograma de frecuencia, normalizado al valor de máxima frecuencia.

Los valores que se alejan más de la media corresponden valores de SZA grandes (el error coseno de los Yankee es importante y produce variabilidad en las medidas), o a intervalos de tiempo con cambios rápidos en las condiciones meteorológicas que afectan a la medidas.

Para el radiómetro 030520, usando cualquiera de las dos calibraciones, la diferencia con el QASUME es menor del 2%. En el caso del radiómetro 990608 con la calibración de AEMET el resultado es similar, pero con la calibración del INTA la diferencia en el UVI es mayor, en torno al 6%.

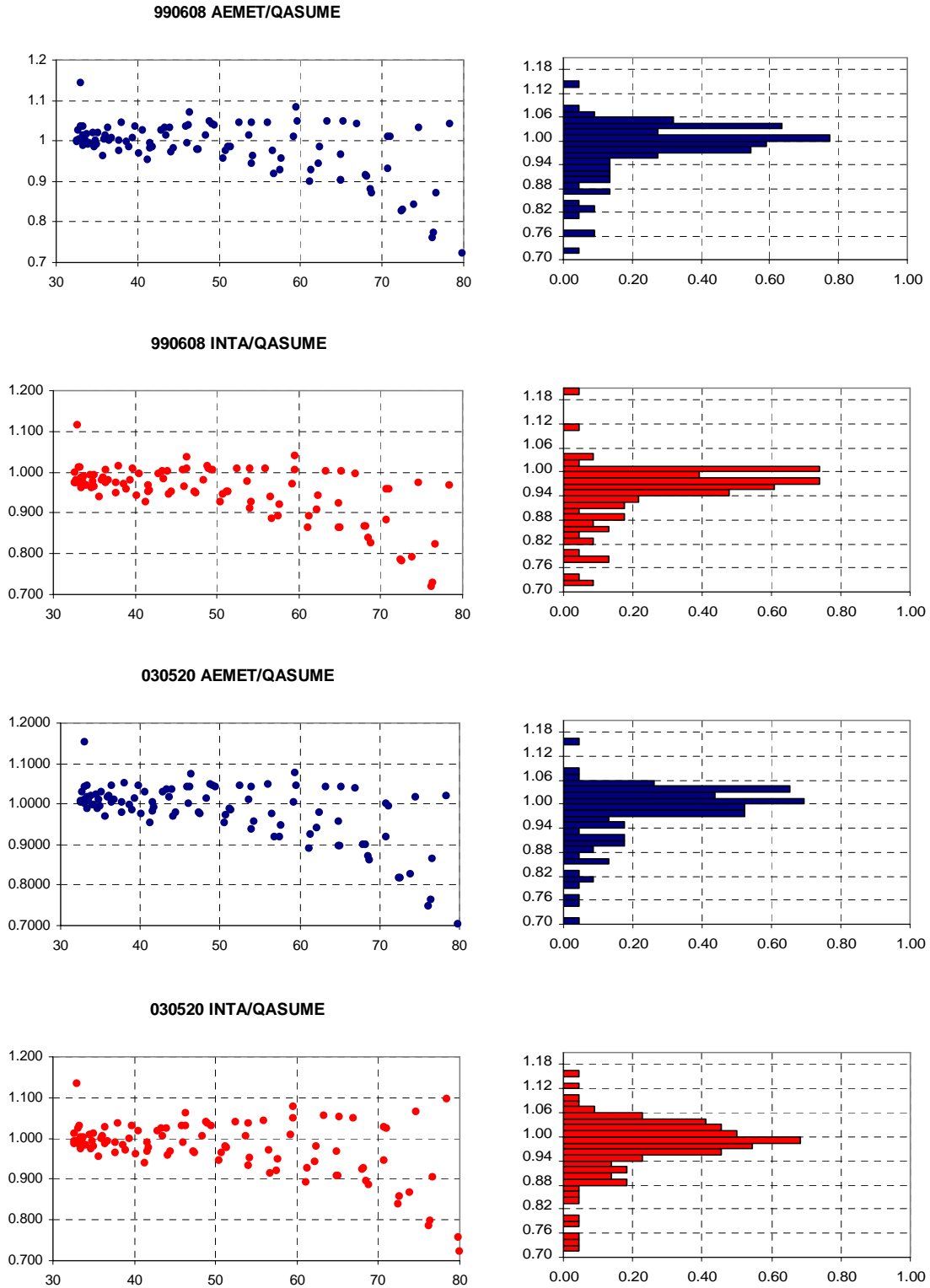


Figura 8: ratio entre la irradiancia eritemática obtenida por cada radiómetro usando las dos calibraciones y la obtenida con el QASUME, en función del ángulo SZA. Datos correspondientes a los días 246-247 (Madrid) y 255-256 (El Arenosillo). A la derecha se representa el histograma de frecuencias normalizado al valor de máxima frecuencia.

7. CONCLUSIONES

El procedimiento de intercomparación entre ambos radiómetros y laboratorios (AEMET e INTA) se ha llevado a cabo siguiendo los pasos de la campaña de intercomparación a gran escala organizada por el PMOD/WRC en agosto de 2006, dentro de las actividades del COST 726. Parte de esta campaña consistió en la comparación de las calibraciones de 6 radiómetros UV en banda ancha llevadas a cabo por 7 laboratorios de Europa y EEUU (con el European Ultraviolet Calibration Center, EUVC de PMOD/WRC, como laboratorio de referencia), uno de los cuales fue el Laboratorio Radiométrico del INTA.

El resultado de esta intercomparación (Hülsen et al. 2008) fue que las caracterizaciones de los detectores en los respectivos laboratorios eran consistentes: la determinación de las respuestas angulares tuvieron desviaciones menores de $\pm 4\%$ y la de las respuestas espectrales menores del $\pm 20\%$. Además, la intercomparación entre las irradiancias pesadas eritemáticamente derivadas de los respectivos laboratorios frente a PMOD/WRC mostró medidas consistentes dentro del $\pm 2\%$ en la mayoría de los laboratorios participantes. Las diferencias encontradas entre las diferentes calibraciones de los instrumentos estaban dentro de la incertidumbre combinada de la calibración.

En la actual intercomparación (INTA – AEMET), las diferencias entre los laboratorios se encuentran dentro de los mismos márgenes mencionados, por lo que podemos considerar que los procedimientos son consistentes. Además, el UVI obtenido usando ambas calibraciones difiere en el 0.3% y el 3% para cada uno de los radiómetros, respectivamente.

Teniendo en cuenta, además, que la comparación entre los valores de UVI obtenidos con ambos radiómetros calibrados y los obtenidos con la unidad QASUME (patrón europeo de UV operado por el PMOD/World Radiation Center en Davos, Suiza) está en el orden del 2% con la calibración de AEMET, se puede concluir que el proceso de calibración desarrollado es válido.

8. REFERENCIAS

Gröbner J., Schreder J., Kazadzis S., Bais A.F., Blumthaler M., Görts P., Tax R., Koskela T., Seckmeyer G., Webb A. R. and Rembges D.: "Travelling reference spectroradiometer for routine quality assurance of spectral solar ultraviolet irradiance measurements". Appl. Optics vol.44: 5321-5331, 2005.

Hülsen G. and Gröbner J.: "Characterization and calibration of ultraviolet broadband radiometers measuring erythemally weighted irradiance". Appl. Optics vol. 46: 5877-5886, 2007.

Hülsen G., Gröbner J., Bais A.F., Blumthaler M., Disterhoft P., Johnsen B., Lantz K.O., Meleti C., Schreder J., Vilaplana J.M. and Ylianttila L.: "Intercomparison of erythemal broadband radiometers calibrated by seven UV calibration facilities in Europe and the USA". Atmos. Chem. Phys. vol. 8: 4865-4875, 2008.

Seckmeyer G., Bais A. Bernhard G., Blumthaler M., Booth C.R., Lantz K., McKenzi, Disterhoft P. and Webb A. "Instruments to measure solar ultraviolet radiation. Part 2: Broadband instruments measuring erythemally weighted solar irradiance". WMO/GAW 164, 2007.