

# Validación de los datos de radiación solar UV del *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) a partir de medidas con base en tierra en la costa mediterránea

Marchetti, F.<sup>1,3</sup>, Esteve, A.R.\*<sup>2</sup>, Siani, A.M.<sup>1</sup>, Martínez-Lozano, J.A.<sup>3</sup>, Utrillas, M.P.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma, Piazzale Aldo Moro 2, 00185 Roma, Italia.*

<sup>2</sup> *Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, Universitat de València, Avenida Tarongers, 4, 46022 Valencia, España.*

<sup>3</sup> *Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universitat de València, C/ Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot (Valencia), España.*

---

**Resumen:** La Dosis Eritémica Diaria (EDD) y el Índice UV (UVI) al mediodía obtenidos con el *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), a bordo del satélite Aura de la NASA, han sido validados para el periodo 2005-2013 utilizando medidas con base en tierra en 5 estaciones diferentes de la costa mediterránea: Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Barcelona y Roma (donde sólo se tienen medidas del UVI al mediodía). Las medidas con base en tierra fueron realizadas con radiómetros YES UVB-1 en Murcia, Valencia, Palma de Mallorca y Barcelona, y con un espectrofotómetro Brewer MKIV en Roma. La evolución de la EDD muestra un claro comportamiento estacional en todas las localidades, tanto para los datos de suelo como para los satelitales, con valores máximos en verano (junio y julio) y valores mínimos en invierno (diciembre y enero). Los resultados de la validación muestran una buena correlación entre los datos satelitales y las medidas con base en tierra, aunque las del OMI sobreestiman las de los instrumentos de suelo. Las diferencias entre ambos conjuntos de medidas es máxima para los meses de primavera y verano y mínima en los meses de otoño e invierno. Un elevado porcentaje de casos (>80%) presenta diferencias mínimas (0 ó 1 unidades) entre el UVI obtenido con el OMI y el obtenido con los instrumentos de suelo para todas las estaciones de medida. En todas ellas se alcanzan valores del UVI altos (6-7) o muy altos (8-10) en un elevado porcentaje de los días del periodo analizado, pero apenas se alcanzan valores del UVI extremos ( $\geq 11$ ).

**Palabras clave:** radiación solar UV, Índice UV, Dosis Eritémica Diaria, *Ozone Monitoring Instrument*.

## Validation of UV solar radiation data from the *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) with ground based measurements on the Mediterranean coast

**Abstract:** The erythemal UV daily dose (EDD) and the local noon UV Index (UVI) obtained from the *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), on board NASA's Aura satellite, have been validated for the period 2005-2013 using ground based measurements at 5 different sites in the Mediterranean coast: Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Barcelona and Rome (where only measurements of the local noon UVI were available). Ground based measurements were made using YES UVB-1 radiometers in Murcia, Valencia, Palma de Mallorca and Barcelona, and a Brewer MKIV 067 spectrophotometer in Rome. The results of the validation showed good agreement between the satellite instrument and the ground based measurements, although the OMI values overestimate the ground based measurements, being the difference between both types of measurements maximum during the spring and summer, and minimum during autumn

\* Autor para la correspondencia: [anna.esteve@uv.es](mailto:anna.esteve@uv.es)

and winter. The evolution of the EDD shows a clear seasonal behavior for all measuring sites for both, ground based and satellite data, with maximum values in summer (June and July) and minimum values in winter (December and January). A high percentage of cases (>80%) showed minimum differences (0-1 UVI units) between the UVI obtained by OMI and the UVI obtained by ground based instruments for all measuring sites. In every measuring site, high (6-7) or very high (8-10) UVI values are reached for a high percentage of the days of the analyzed period, but very few extreme ( $\geq 11$ ) UVI values are reached.

**Key words:** solar UV radiation, UV Index, Erythemat UV Daily Dose, Ozone Monitoring Instrument.

## 1. Introducción

La radiación solar UV tiene efectos nocivos sobre los seres humanos, principalmente en la piel (Diffey, 1998; Gallagher y Lee, 2006), los ojos (Roberts, 2001; Lonsberry *et al.*, 2008) y el sistema inmunológico (Norval, 2001, 2006). El efecto más común de la sobreexposición a la radiación solar es la quemadura solar o eritema, que aparece 10-16 horas después de la exposición al sol (Berger y Urbach, 1982; Diffey, 1982; McKenzie *et al.*, 1991). Además, la sobreexposición crónica de la piel a la radiación UV provoca fotoenvejecimiento prematuro, caracterizado por la aparición de arrugas y la pérdida de color y elasticidad en la piel (Rabe *et al.*, 2006).

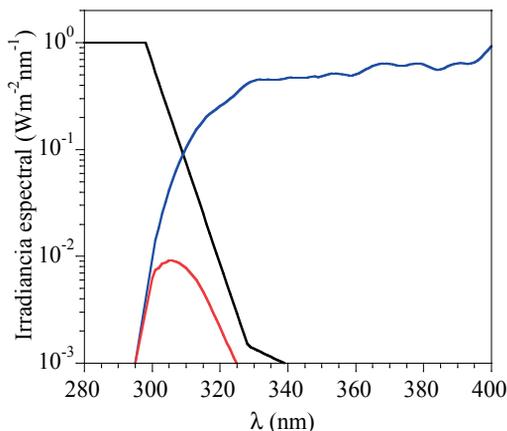
La CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) adoptó en 1987 una "curva estándar del eritema" (CIE, 1998) que es utilizada habitualmente para determinar la radiación solar UV eritemática (UVER). La UVER se calcula mediante la convolución de la curva espectral de la radiación incidente a nivel del suelo con la curva del espectro de acción eritemático propuesto por la CIE (Figura 1).

El Índice UV (UVI) es un parámetro recomendado por la Comisión Internacional sobre Protección Frente a Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) en colaboración con la Organización Mundial de la Salud (WHO), la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) para informar de manera sencilla a la opinión pública sobre los niveles de radiación UV que llegan al suelo (WHO, 2002).

Durante las últimas décadas, el número de estaciones de medida a nivel de suelo que proporcionan

datos de calidad de radiación solar UV ha ido aumentando constantemente, aunque estas estaciones proporcionan una cobertura espacial limitada. Los instrumentos que miden la radiación solar UV a bordo de satélites, como GOME y SCIAMACHY de la Agencia Espacial Europea o TOMS y OMI de la NASA, por el contrario, proporcionan una cobertura espacial mayor. Por lo tanto, es necesaria la validación de los datos satelitales a partir de medidas con base en tierra para evaluar la calidad y precisión de los mismos.

El *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), a bordo del satélite Aura de la NASA, es un espectrómetro diseñado para registrar la cantidad de ozono y otras especies químicas en la atmósfera (Levelt *et al.*, 2006). OMI es el sucesor del *Total Ozone Monitoring System* (TOMS), y continúa su registro de la concentración de ozono en columna vertical total, aerosoles y radiación solar UV. El



**Figura 1.** Curva de irradiancia solar espectral a nivel de suelo (azul), espectro de acción eritemático (negro) (CIE, 1998) y convolución de ambas curvas, UVER (rojo).

algoritmo del OMI para obtener los productos de radiación UV ha sido descrito en detalle por Tanskanen *et al.* (2007).

Desde que el satélite Aura de la NASA fue lanzado en 2004, los datos de radiación solar UV del OMI han sido validados utilizando medidas con base en tierra por distintos autores. La primera validación fue realizada por Tanskanen *et al.* (2007), que compararon los datos de radiación solar UV del OMI con medidas con base en tierra realizadas en Europa, América del Norte, Japón y la Antártida. Este estudio puso de manifiesto la necesidad de considerar los aerosoles absorbentes al obtener la radiación solar UV e hizo hincapié en la importancia de caracterizar adecuadamente el albedo de la superficie. Buchard *et al.* (2008) y Ialongo *et al.* (2008) realizaron validaciones de la concentración de ozono en columna vertical total y de la radiación solar UV obtenidas por OMI en Francia e Italia, respectivamente. Ambos estudios encontraron diferencias por encima del 17% entre los datos satelitales y las medidas con base en tierra, diferencias que atribuyeron principalmente a la carga de aerosoles en la atmósfera. Antón *et al.* (2010) y Cachorro *et al.* (2010) observaron diferencias hasta del 20% entre los datos del OMI y las medidas desde tierra obtenidas en el sur de España en función de la nubosidad, la carga de aerosoles, y el ángulo cenital solar. Mateos *et al.* (2013) compararon los datos de radiación solar UV del OMI con medidas desde tierra realizadas en Argentina, Australia, Italia, Israel y España, observando una clara dependencia con parámetros atmosféricos como las nubes, el ozono y los aerosoles.

El principal objetivo de este trabajo consiste en validar la Dosis Eritemática Diaria (EDD) y el Índice UV (UVI) al mediodía solar obtenidos con el OMI, usando medidas con base en tierra (realizadas con radiómetros YES UVB-1 y un espectrofotómetro Brewer MKIV) durante el periodo 2005-2013 en 5 estaciones de la costa mediterránea: Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Barcelona y Roma.

## 2. Instrumentación y métodos

### 2.1. Datos satelitales

OMI es un espectrómetro con visualización nadir a bordo del satélite Aura de la NASA, que describe una órbita helio-sincrónica con una hora de paso por el ecuador de  $13:45 \pm 15$  minutos. Este instrumento mide la radiación solar reflejada y la retrodispersada en el rango espectral 270-500 nm con una resolución espectral de 0,55 nm en el UV y 0,63 nm en el visible. Tiene un ancho de barrido de 2600 km que permite una cobertura global diaria con una resolución espacial de  $13 \times 24$  km en nadir. Los productos de OMI incluyen ozono, aerosoles, nubes, radiación UV y gases traza ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , HCHO, BrO, OClO) (Levelt *et al.*, 2006).

Los datos de superficie obtenidos por OMI se estiman utilizando un algoritmo desarrollado por el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA, y que se explica en detalle en Stammes y Noordhoek (2002) y Tanskanen *et al.* (2006). Este algoritmo calcula la irradiancia UV en la superficie a partir de tablas de búsqueda obtenidas mediante un modelo de transferencia radiativa que utiliza los valores obtenidos por OMI de la concentración de ozono en columna vertical total, el albedo de superficie y la información de las nubes como parámetros de entrada.

En este trabajo, las medidas de la Dosis Eritemática Diaria (EDD) y el Índice UV (UVI) al mediodía realizadas por el OMI han sido obtenidas para el periodo 2005-2013 a través de la plataforma web Giovanni (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>) para un área de  $1^\circ \times 1^\circ$  centrada en cada una de las 5 estaciones de la costa mediterránea consideradas: Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Barcelona y Roma. En la Tabla 1 se muestran las coordenadas geográficas de cada una de estas 3 estaciones de medida. En este trabajo se ha utilizado el producto *Level-3 OMI Daily Gridded Surface UV Irradiance (OMUVBd\_V003)*.

**Tabla 1.** Coordenadas geográficas de las localidades de medida.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m s.n.m.)
Murcia	37°59'10"N	1°7'49"O	62
Valencia	39°28'11"N	0°22'38"O	23
Palma de Mallorca	39°34'0"N	2°38'59"E	4
Barcelona	41°23'19"N	2°9'32"E	60
Roma	41°53'30"N	12°30'40" E	75

## 2.2. Medidas con base en tierra

La validación de los datos de radiación solar UV del OMI se ha realizado con medidas desde tierra obtenidas mediante radiómetros YES UVB-1 y un espectrofotómetro Brewer MKIV.

En Murcia, Valencia, Palma de Mallorca y Barcelona, la radiación UV eritemáticamente activa (UVER) se midió directamente con radiómetros YES UVB-1 pertenecientes a la Red Radiométrica Nacional de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (Martínez-Lozano *et al.*, 2002). Estos instrumentos, también conocidos como biómetros, miden en el rango espectral 290-315 nm, con una respuesta espectral próxima al espectro de acción eritemático y están diseñados para ser estables durante largos periodos y para trabajos de campo sin vigilancia. Los radiómetros YES UVB-1 de la Red Radiométrica Nacional se envían periódicamente al Centro Radiométrico Nacional en Madrid para su calibrado.

La Dosis Eritemática Diaria (EDD) y el Índice UV (UVI) al mediodía se estimaron a partir de las medidas de UVER.

En Roma, la irradiancia espectral UV se midió con un espectrofotómetro Brewer MKIV, ubicado en el Observatorio de Radiometría Solar de la Universidad de Roma “La Sapienza”. Este instrumento mide en el rango espectral 290-325 nm con una resolución espectral de 0,6 nm (Casale *et al.*, 2000). La calibración del espectrofotómetro Brewer MKIV es realizada periódicamente por la empresa *International Ozone Service*. Además, sus medidas se comparan cada dos años con las del espectrorradiómetro móvil de referencia de *Quality Assurance of Spectral Ultraviolet Measurements in Europe* (QASUME) (Gröbner *et al.*, 2005). Las medidas del Brewer son corregidas para efectos coseno y de temperatura. La dosis eritemática se obtiene haciendo la convolución de la irradiancia UV espectral medida por el instrumento con la curva del espectro de acción eritemático propuesto por la CIE (CIE, 1988) e integrando en el intervalo espectral 290-400 nm. Para ello, las irradiancias UV espectrales entre 325,5 y 400 nm se extrapolan de la medida del espectrofotómetro Brewer MKIV a 325 nm. Debido a la frecuencia de las medidas con base en tierra en Roma, sólo se tienen valores del UVI al mediodía para esta localidad.

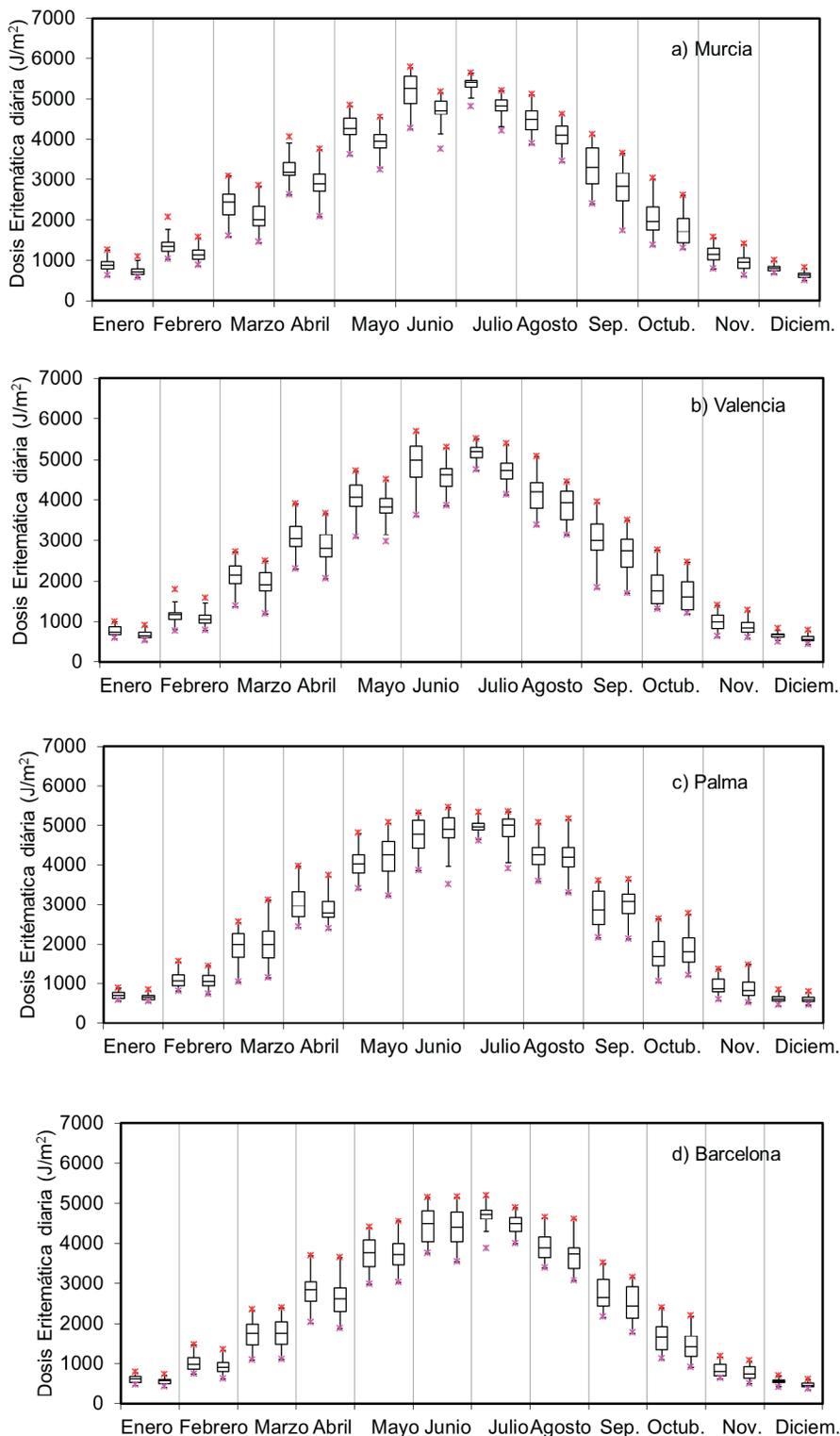
## 3. Resultados

### 3.1. Dosis Eritemática Diaria

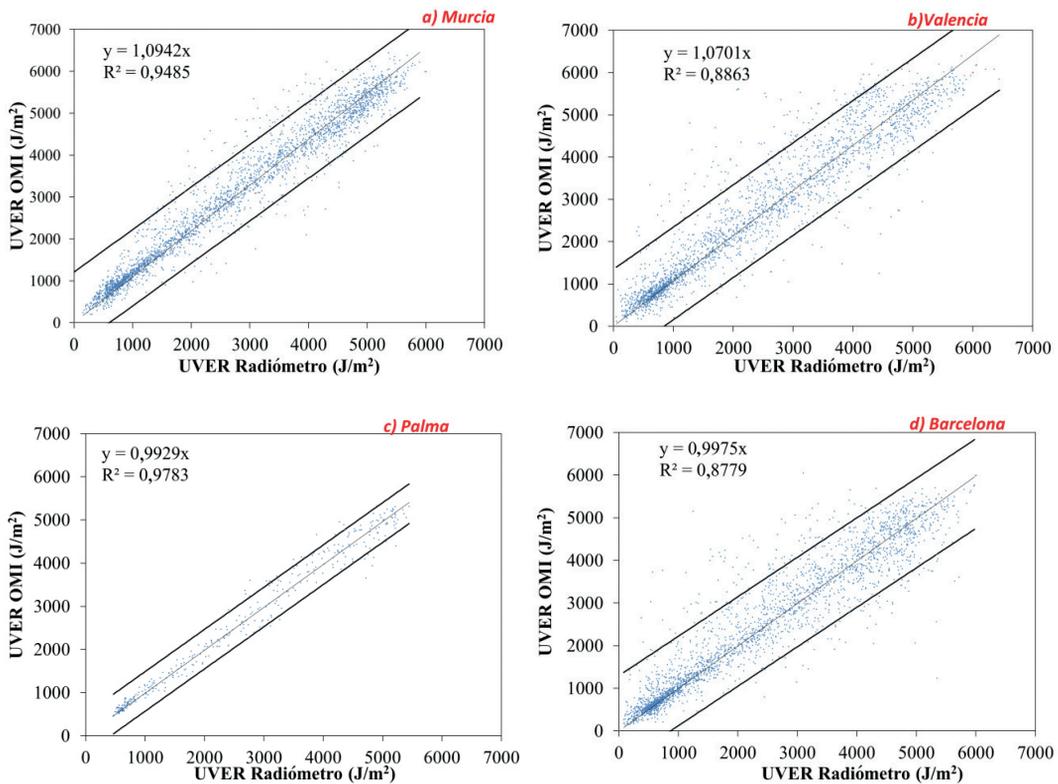
La Figura 2 muestra un análisis estadístico por meses de los valores de la Dosis Eritemática Diaria obtenidos con el OMI y con los radiómetros YES UVB-1 en Murcia, Valencia, Palma de Mallorca y Barcelona para el periodo 2005-2013. En estos diagramas de cajas, la media mensual está representada por la línea divisoria de la caja. Los límites superior e inferior de la caja representan la media mensual más y menos la desviación estándar. Las barras verticales de la caja representan los percentiles  $P_5$  y  $P_{95}$ . Los percentiles  $P_1$  y  $P_{99}$  están representados por aspas.

La evolución de la EDD muestra un claro comportamiento estacional, con valores máximos en junio y julio, que están comprendidos entre 5179 J/m<sup>2</sup> (Barcelona) y 5775 J/m<sup>2</sup> (Murcia) para el OMI y entre 5155 J/m<sup>2</sup> (Barcelona) y 5445 J/m<sup>2</sup> (Palma de Mallorca) para los YES UVB-1. Los valores mínimos se obtienen en diciembre y enero, con valores comprendidos entre 409 J/m<sup>2</sup> (Barcelona) y 619 J/m<sup>2</sup> (Murcia) para el OMI y entre 358 J/m<sup>2</sup> (Barcelona) y 502 J/m<sup>2</sup> (Murcia) para los YES UVB-1. En general, se observa que los valores medios de la EDD obtenidos con los radiómetros YES UVB-1 son menores que los obtenidos por OMI para todos los meses del año, siendo la diferencia máxima para los meses de primavera y verano, y mínima en los meses de otoño e invierno. Se observa también que los valores de la EDD, tanto los obtenidos con el OMI como con los radiómetros YES UVB-1, son mayores en las estaciones situadas más al Sur.

Para cuantificar la concordancia entre los datos satelitales y los de suelo de la Dosis Eritemática Diaria, hemos comparado la EDD obtenida por el OMI y la obtenida por los radiómetros YES UVB-1 (Figura 3). Además, hemos estimado la desviación absoluta media (MAD) relativa (%) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) relativa (%) de cada comparación (Tabla 2). En primer lugar, se observa que la mayoría de datos se encuentra dentro del límite de confianza del 95%, lo que indica que no existen diferencias significativas entre los datos de suelo y satelitales considerados. Se observa también que, aunque existe una buena correlación entre los datos satelitales y de suelo



**Figura 2.** Estadística por meses de la Dosis Eritématica Diaria obtenida con el OMI (primer diagrama de caja) y los radiómetros YES UVB-1 (segundo diagrama de caja) para el periodo 2005-2013 en (a) Murcia, (b) Valencia, (c) Palma de Mallorca y (d) Barcelona.



**Figura 3.** Comparación de la Dosis Eritémica Diaria obtenida con el OMI con la obtenida con los radiómetros YES UVB-1 para el periodo 2005-2013 en (a) Murcia, (b) Valencia, (c) Palma de Mallorca y (d) Barcelona. Las líneas gruesas de color negro indican el límite de confianza del 95%.

(con coeficientes de correlación comprendidos entre 0,91 para Barcelona y 0,96 para Palma de Mallorca), OMI sobreestima la Dosis Eritémica Diaria medida por los radiómetros YES UVB-1, con una MAD relativa comprendida entre 12,5% (Palma de Mallorca) y 17,7% (Barcelona) y una RMSE relativa comprendida entre 13,5% (Palma de Mallorca) y 19,6% (Barcelona).

Nuestros resultados son similares a los obtenidos por otros autores. Ialongo *et al.* (2008) obtuvieron una desviación media relativa de 23% para la

comparación entre datos del OMI y datos de suelo obtenidos al mediodía bajo cualquier condición de cielo en Roma. Antón *et al.* (2010) obtuvieron también un MAD relativo entre 13 y 15% para la comparación de las medidas de UVER obtenidas por OMI con las medidas desde tierra realizadas con un espectrofotómetro Brewer en El Arenosillo (Huelva, España). Mateos *et al.* (2013) obtuvieron una sobreestimación de los valores de satélite, con una diferencia máxima (RMSE relativa) entre los datos satelitales y suelo de ~25% al comparar la

**Tabla 2.** Pendiente y coeficiente de correlación ( $R^2$ ) del ajuste por mínimos cuadrados, desviación absoluta media (MAD) relativa y raíz del error cuadrático medio (RMSE) relativa de la comparación de la Dosis Eritémica Diaria obtenida con el OMI con la obtenida con los radiómetros YES UVB-1 para el periodo 2005-2013 en Murcia, Valencia, Palma de Mallorca y Barcelona.

	Pendiente	$R^2$	MAD (%)	RMSE (%)
Murcia	1,09	0,95	14,0	15,8
Valencia	1,07	0,92	15,7	17,8
Palma de Mallorca	0,99	0,96	12,5	13,5
Barcelona	1,01	0,91	17,7	19,6

**Tabla 3.** Valor medio (Md), desviación estándar ( $\sigma$ ), mediana (Mdn), valores máximo (Mx) y mínimo (Mn) por meses del Índice UV al mediodía obtenido con radiómetros YES UVB-1 en Murcia, Valencia, Palma de Mallorca y Barcelona y con el espectrofotómetro Brewer MKIV 067 en Roma durante el período 2005-2013.

	Satélite					Suelo					Diferencia
	Md	$\sigma$	Mdn	Mx	Mn	Md	$\sigma$	Mdn	Mx	Mn	
Murcia	5,6	2,7	5,7	10,1	1,6	4,8	2,5	4,8	9,0	1,2	0,8
Valencia	5,1	2,7	5,2	9,8	1,2	4,7	2,5	4,6	9,2	1,1	0,5
Palma de Mallorca	4,9	2,6	4,9	9,3	1,1	4,8	2,6	4,8	9,3	1,1	0,4
Barcelona	4,6	2,5	4,4	9,2	1,0	4,2	2,4	4,0	8,8	0,8	0,4
Roma	4,4	2,6	4,2	9,1	0,9	3,9	2,4	3,7	8,5	0,6	0,6

Dosis Eritémica Diaria obtenida por OMI con las medidas desde tierra realizadas en 14 estaciones de medida distribuidas por todo el mundo.

### 3.2. Índice UV

La Tabla 3 muestra el análisis estadístico de los valores del Índice UV al mediodía obtenidos con el OMI y con los instrumentos de suelo en Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Barcelona y Roma para el período 2005 - 2013. En general, se observa que los valores medios del UVI obtenidos con los instrumentos de suelo son menores que los obtenidos por OMI, siendo la diferencia entre los datos satelitales y los de suelo máxima (0,8) para la estación de Murcia, que es la situada más al sur, y mínima (0,4) para las estaciones de Barcelona y Palma de Mallorca.

Para cuantificar el nivel de acuerdo entre los datos satelitales y los de suelo del Índice UV, hemos comparado el UVI obtenido por el OMI y el obtenido por los instrumentos de suelo. La Tabla 4 muestra los resultados del ajuste por mínimos cuadrados realizado para cada una de estas

**Tabla 4.** Pendiente y coeficiente de correlación ( $R^2$ ) del ajuste por mínimos cuadrados, desviación absoluta media (MAD) relativa (%) y raíz del error cuadrático medio (RMSE) relativo (%) de la comparación del Índice UV obtenido con el OMI con el obtenido con los instrumentos de suelo para el período 2005-2013 en Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Barcelona y Roma.

	Pendiente	$R^2$	MAD (%)	RMSE (%)
Murcia	1,14	0,98	5,2	6,5
Valencia	1,08	0,98	5,5	7,8
Palma de Mallorca	1,01	0,96	7,9	10,1
Barcelona	1,07	0,98	6,5	8,3
Roma	1,11	0,95	11,1	12,8

comparaciones, así como la desviación absoluta media (MAD) en valores relativos (%) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) relativa (%) de cada una de ellas. Se observa que, aunque existe una buena correlación entre los datos satelitales y de suelo (con coeficientes de correlación comprendidos entre 0,95 para Roma y 0,98 para Murcia, Valencia y Barcelona), OMI sobreestima el UVI medido por los instrumentos de suelo, con una MAD comprendida entre 5,2% (Murcia) y 11,1% (Roma) y una RMSE comprendida entre 6,5% (Murcia) y 12,8% (Roma).

En la Tabla 5 se muestra el porcentaje de casos que presentan diferencias de 0, 1, 2 e iguales o superiores a 3 unidades de UVI entre el Índice UV obtenido con el OMI y el obtenido con los instrumentos de suelo. Se observa que la diferencia entre el UVI de satélite y de suelo es mínima (0-1 unidades UVI) en todas las estaciones de medida para un alto porcentaje de los casos, comprendido entre el 81,3% (Roma) y el 90,8% (Palma de Mallorca).

**Tabla 5.** Diferencia (en %) entre el Índice UV obtenido con medidas de satélite y el obtenido a partir de medidas con base en tierra para el período 2005-2013 en Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Barcelona y Roma.

	Diferencia en unidades de UVI			
	0	1	2	$\geq 3$
Murcia	39,5	46,2	9,6	4,7
Valencia	46,1	37,5	11,5	4,9
Palma de Mallorca	55,8	35,0	5,8	3,3
Barcelona	52,0	32,8	7,1	4,2
Roma	44,3	37,0	10,1	8,7

Por último, la Tabla 6 muestra los valores del Índice UV obtenidos con medidas de satélite, clasificados según las categorías de exposición a la radiación

**Tabla 6.** Valores del Índice UV obtenidos con medidas de satélite (en %) para el periodo 2005-2013 en Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Barcelona, Roma, clasificados según las categorías de exposición a la radiación UV.

UVI	≤2 baja	3-5 moderada	6-7 alta	8-10 muy alta	≥11 extrema
Murcia	10,3	34,6	16,1	35,1	3,9
Valencia	18,1	32,4	17,6	29,7	2,2
Palma de Mallorca	30,4	25,2	16,4	28,0	0,0
Barcelona	23,4	31,2	18,1	27,3	0,0
Roma	28,8	32,2	16,8	22,2	0,0

UV propuestas por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2002). En todas las estaciones de medida se alcanzan valores del UVI correspondientes a exposiciones altas (6-7) o muy altas (8-10) a la radiación UV en un elevado porcentaje de los días del periodo analizado, comprendido entre el 38,9% (Roma) y el 51,2% (Murcia). Sin embargo, apenas se alcanzan valores del UVI correspondientes a exposiciones extremas ( $\geq 11$ ) a la radiación UV, con porcentajes comprendidos entre 0% (Palma de Mallorca) y 3,9% (Murcia). Estos resultados son similares a los obtenidos por Utrillas *et al.* (2013) a nivel de suelo para las estaciones de la Red Radiométrica Nacional de la AEMET durante 10 años de medidas. En todas las estaciones consideradas como costeras por Utrillas *et al.* (2013) se alcanzaron valores del UVI correspondientes a exposiciones altas (6-7) o muy altas (8-10) a la radiación UV en porcentajes similares a los obtenidos aquí (34-46%), mientras que valores del UVI correspondientes a exposiciones extremas ( $\geq 11$ ) a la radiación UV se alcanzaron también en muy pocas ocasiones (<0,1%).

#### 4. Conclusiones

En este trabajo, se han validado la Dosis Eritémica Diaria (EDD) y el Índice UV (UVI) al mediodía obtenidos con el OMI para el periodo 2005-2013 utilizando medidas con base en tierra en 5 estaciones de la costa mediterránea: Murcia, Valencia, Palma de Mallorca, Barcelona y Roma (donde sólo se tienen medidas con base en tierra del UVI al mediodía). Las medidas con base en tierra fueron realizadas con radiómetros YES UVB-1 en Murcia, Valencia, Palma de Mallorca y Barcelona, y con un espectrofotómetro Brewer MKIV en Roma.

La evolución de la EDD muestra un claro comportamiento estacional en todas las localidades de

estudio, tanto para los datos de suelo como para los satelitales, con valores máximos en verano (junio y julio), y valores mínimos en invierno (diciembre y enero). En general, aunque existe una buena correlación entre los datos satelitales y de suelo, se observa que las medidas de satélite sobreestiman las medidas con base en tierra, siendo la diferencia entre los datos satelitales y los de suelo máxima para los meses de primavera y verano, y mínima en los meses de otoño e invierno. Se observa también que los valores de la EDD, tanto para los datos de suelo como para los satelitales, son mayores en las estaciones situadas más al Sur.

El porcentaje de casos que presentan diferencias mínimas (0-1 unidades de UVI) entre el UVI obtenido con el OMI y el obtenido con los instrumentos de suelo es muy elevado (>80%) para todas las estaciones de medida. Además, en todas ellas se alcanzan valores del UVI correspondientes a exposiciones altas (6-7) o muy altas (8-10) a la radiación UV en un elevado porcentaje de los días del periodo analizado (38,9-51,2%), pero apenas se alcanzan valores del UVI correspondientes a exposiciones extremas ( $\geq 11$ ) a la radiación UV (0-3,9%).

Las diferencias observadas en este trabajo entre los datos satelitales y las medidas con base en tierra pueden deberse a la influencia de parámetros atmosféricos como los aerosoles, las nubes y el ozono, así como a las diferentes condiciones atmosféricas entre el mediodía solar y la hora de paso del satélite. Aunque en este trabajo no se han analizado estas posibles causas de error en los resultados obtenidos, es de especial importancia investigar la influencia de estos factores sobre los productos de radiación UV de OMI para así mejorar la calidad de estos. Una mayor calidad de los datos satelitales de radiación UV supondría una mejora en la información que se proporciona al público sobre los niveles de radiación UV que

llegan al suelo y sus posibles efectos nocivos en regiones donde no se tengan medidas con base en tierra, como por ejemplo en muchos puntos de la costa del mar Mediterráneo, donde están situadas las estaciones de medida utilizadas en este estudio.

## 5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través de los proyectos CGL2015-64785R y CGL2015-70432R, y por la Generalitat Valenciana a través del proyecto PROMETEUII/2014/058. La colaboración de F. Marchetti fue posible gracias a una beca Erasmus de la Unión Europea. También queremos agradecer a los científicos de la misión OMI y al personal de la NASA por la obtención de los datos utilizados en este trabajo.

## Referencias

- Antón, M., Cachorro, V.E., Vilaplana, J.M., Toledano, C., Krotkov, N.A., Arola, A., Serrano, A., de la Morena, B. 2010. Comparison of UV irradiances from Aura/Ozone Monitoring Instrument (OMI) with Brewer measurements at El Arenosillo (Spain) — Part I: Analysis of parameter influence. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 5979-5989. <https://doi.org/10.5194/acp-10-5979-2010>
- Berger, D.S., Urbach, F. 1982. A climatology of sunburning ultraviolet radiation. *Photochemistry and Photobiology*, 35, 187-192. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1982.tb03830.x>
- Buchard, V., Brogniez, C., Auriol, F., Bonnel, B., Lenoble, J., Tanskanen, A., Bojkov, B., Veefkind, P. 2008. Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 4517-4528. <https://doi.org/10.5194/acp-8-4517-2008>
- Cachorro, V.E., Toledano, C., Antón, M., Berjón, A., de Frutos, A., Vilaplana, J.M., Arola, A., Krotkov, N.A. 2010. Comparison of UV irradiances from Aura/Ozone Monitoring Instrument (OMI) with Brewer measurements at El Arenosillo (Spain) — Part 2: Analysis of site aerosol influence. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11867-11880. <https://doi.org/10.5194/acp-10-11867-2010>
- Casale, G.R., Meloni, D., Miano, S., Palmieri, S., Siani, A.M., Cappellani, F. 2000. Solar UV-B irradiance and total ozone in Italy: Fluctuations and trends. *Journal of Geophysical Research*, 105(D4), 4895-4901. <https://doi.org/10.1029/1999JD900303>
- Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). 1998. Erythema Reference Action Spectrum and Standard Erythema Dose, CIE S007E-1998, Austria.
- Diffey, B.L. 1982. The consistency of studies of ultraviolet erythema in normal human skin. *Physics in Medicine and Biology*, 27(5), 715-720. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/27/5/006>
- Diffey, B.L. 1998. Ultraviolet radiation and human health. *Clinics in Dermatology*, 16(9), 83-89. [https://doi.org/10.1016/S0738-081X\(97\)00172-7](https://doi.org/10.1016/S0738-081X(97)00172-7)
- Gallagher, R.P., Lee, T.K. 2006. Adverse effects of ultraviolet radiation: a brief review. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 92(1), 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.011>
- Gröbner, J., Schreder, J., Kazadzis, S., Bais, A.F., Blumthaler, M., Görtts, P., Tax, R., Koskela, T., Seckmeyer, G., Webb, A.R., Rembges, D. 2005. Traveling reference spectroradiometer for routine quality assurance of spectral solar ultraviolet irradiance measurements. *Applied Optics*, 44(25), 5321-5331. <https://doi.org/10.1364/AO.44.005321>
- Ialongo, I., Casale, G.R., Siani, A.M. 2008. Comparison of total ozone and erythemal UV data from OMI with ground-based measurements at Rome station. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 3283-3289. <https://doi.org/10.5194/acp-8-3283-2008>
- Levelt, P.F., van den Oord, G.H.J., Dobber, M.R., Mälkki, A., Visser, H., de Vries, J., Stammes, P., Lundell, J.O.V., Saari, H. 2006. The Ozone Monitoring Instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1093-1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>
- Lonsberry, B.B., Wyles, E., Goodwin, D., Casser, L., Lingel, N. 2008. Diseases of the cornea. In Bartlett, J, Jaanus, S (eds.). *Clinical Ocular Pharmacology*, 5<sup>th</sup> ed., Butterworth-Heinemann: St. Louis, MO, 483-547. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7576-5.50031-8>
- Martínez-Lozano, J.A., Marín, M.J., Tena, F., Utrillas, M.P., Sánchez-Muniosguren, L., Vergaz, R., de Frutos, A., Díaz, J.P., Exposito, F.J., Morena, B., Vilaplana, J.M. 2002. UV index experimental values during the years 2000 and 2001 from the Spanish broadband UV-B Radiometric Network. *Photochemistry and Photobiology*, 76(2), 181-187. [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2002\)0760181UIEVD2.0.CO2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2002)0760181UIEVD2.0.CO2)
- Mateos, D., Bilbao, J., Kudish, A.I., Parisi, A.V., Carbajal, G., di Sarra, A., Román, R., de Miguel, A. 2013. Validation of OMI satellite erythemal daily dose retrievals using ground-based measurements from fourteen stations. *Remote Sensing of Environment*, 128, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.015>

- McKenzie, R.L., Matthews, W.A., Johnston, P.V. 1991. The relationship between erythemal UV and ozone, derived from spectral irradiance measurements. *Geophysical Research Letters*, 18(12), 2269-2272. <https://doi.org/10.1029/91GL02786>
- Norval, M. 2001. Effects of solar radiation on the human immune system. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 63(1-3), 28-40. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(01\)00200-7](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(01)00200-7)
- Norval, M. 2006. The mechanisms and consequences of ultraviolet-induced immunosuppression. *Progress in Biophysics & Molecular Biology*, 92(1), 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.009>
- Rabe, J.H., Mamelak, A.J., McElgunn, P.J.S., Morison, W.L., Sauder, D.N. 2006. Photoaging: mechanisms and repair. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 55(1), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2005.05.010>
- Roberts, J.E. 2001. Ocular phototoxicity. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 64(2-3), 136-143. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(01\)00196-8](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(01)00196-8)
- Stammes, P., Noordhoek, R. 2002. OMI Algorithm Theoretical Basis Document Volume III: Clouds, Aerosols, and Surface UV Irradiance, Tech. Rep. ATBD-OMI-03, Version 2.0.
- Tanskanen, A., Krotkov, N., Herman, J., Arola, A. 2006. Surface ultraviolet irradiance from OMI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1267-1271. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.862203>
- Tanskanen, A., Lindfors, A., Määttä, A., Krotkov, N., Herman, J., Kaurola, J., Koskela, T., Lakkala, K., Fioletov, V., Bernhard, G., McKenzie, R., Kondo, Y., O'Neill, M., Slaper, H., den Outer, P., Bais, A.F., Tamminen, J. 2007. Validation of daily erythemal doses from Ozone Monitoring Instrument with ground-based UV measurement data. *Journal of Geophysical Research*, 112, D24S44. <https://doi.org/10.1029/2007JD008830>
- Utrillas, M.P., Marín, M.J., Esteve, A.R., Estellés, V., Gandía, S., Núñez, J.A., Martínez-Lozano, J.A. 2013. Ten years of measured UV Index from the Spanish UVB Radiometric Network. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 125, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.04.005>
- World Health Organization (WHO), World Meteorological Organization (WMO), United Nations Environment Programme (UNEP), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), 2002. Global Solar UV Index: A practical guide, Watch no 95, WMO/TD No. 625, Geneva, Switzerland.