

ZUBÍA

REVISTA DE CIENCIAS

MONOGRÁFICO

23

ier

Instituto de Estudios Riojanos

ZUBÍA. MONOGRÁFICO
REVISTA DE CIENCIAS,
Nº 23 (2011). Logroño (España).
P. 1-258, ISSN: 1131-5423



DIRECTORA

Purificación Ruiz Flaño

CONSEJO DE REDACCIÓN

Luis Español González

Rafael Francia Verde

Juana Hernández Hernández

Luis Miguel Medrano Moreno

Enrique Requeta Loza

Rafael Tomás Las Heras

CONSEJO CIENTÍFICO

José Antonio Arizaleta Urarte

(Instituto de Estudios Riojanos)

José Arnáez Vadillo

(Universidad de La Rioja)

Susana Caro Calatayud

(Fundación Patrimonio Paleontológico de Enciso)

Eduardo Fernández Garbayo

(Universidad de La Rioja)

Rosario García Gómez

(Universidad de La Rioja)

José M^a García Ruiz

(Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC)

Javier Guallar Otazua

(Universidad de La Rioja)

Teodoro Lasanta Martínez

(Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC)

Joaquín Lasierra Cirujeda

(Hospital San Pedro, Logroño)

Luis Lopo Carramiñana

(Dirección General de Medio Natural del Gobierno de La Rioja)

Fernando Martínez de Toda

(Universidad de La Rioja)

Juan Pablo Martínez Rica

(Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC)

José Luis Nieto Amado

(Universidad de Zaragoza)

José Luis Peña Monné

(Universidad de Zaragoza)

Félix Pérez-Lorente

(Universidad de La Rioja)

Eduardo Viladés Juan

(Complejo Hospitalario San Millán-San Pedro de Logroño)

Carlos Zaldívar Ezquerro

(Dirección General de Medio Natural del Gobierno de La Rioja)

DIRECCIÓN Y ADMINISTRACIÓN

Instituto de Estudios Riojanos

C/ Portales, 2

26071 Logroño

publicaciones.ier@larioja.org

Suscripción anual España (1 número y monográfico): 15 €

Suscripción anual extranjero (1 número y monográfico): 20 €

Número suelto: 9 €

Número monográfico: 9 €

INSTITUTO DE ESTUDIOS RIOJANOS

ZUBIA

REVISTA DE CIENCIAS

Monográfico Núm. 23

EL CAMBIO GLOBAL: ESTUDIOS EN LA RIOJA

Coordinador

TEODORO LASANTA MARTÍNEZ



Gobierno de La Rioja
Instituto de Estudios Riojanos

LOGROÑO

2011

El cambio global: estudios en La Rioja/ coordinador, Teodoro Lasanta Martínez. – Logroño : Instituto de Estudios Riojanos, 2011
258 p. : gráf. ; 24 cm – (Zubía. Monográfico, ISSN 1131-5423; 23). – D.L. BI 428-1991
1. La Rioja-Clima. I. Lasanta Martínez, Teodoro. II. Instituto de Estudios Riojanos.
III. Serie
551.58(460.21)
556.5

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse ni transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito de los titulares del copyright.

© Logroño, 2011
Instituto de Estudios Riojanos
C/ Portales, 2
26001-Logroño, La Rioja (España)

© Diseño de cubierta e interior: ICE Comunicación

© Imagen de la cubierta: Revegetación en el Alto Oja.
(Fotografía de Teodoro Lasanta)

Imprime: INO Reproducciones, S.A.

ISSN 1131-5423
Depósito Legal BI-428-1991

Impreso en España - Printed in Spain

ÍNDICE

TEODORO LASANTA

El cambio global: estudios en La Rioja
Global change studies in La Rioja 7-16

ANA PÉREZ SANZ, PENÉLOPE GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, BLAS L. VALERO-GARCÉS, ANA MORENO, MARIO MORELLÓN, CARLOS SANCHO, ANCHEL BELMONTE, GRACIELA GIL-ROMERA, MIGUEL SEVILLA, ANA NAVAS

Clima y actividades humanas en la dinámica de la vegetación durante los últimos 2000 años en el Pirineo Central: el registro palinológico de la Basa de la Mora (Macizo de Cotiella)
Climatic and human activity in the vegetation dynamics of Central Pyrenees during the last 2000 years: the Basa de la Mora record (Cotiella Massif) 17-38

RAFAEL FERNÁNDEZ ALDANA

La presencia de robles entre los siglos XVIII y XX en el valle del Ebro (La Rioja)
Presence of deciduous oaks in the Ebro Valley (La Rioja) during XVIII, XIX and XX centuries 39-54

TEODORO LASANTA, MARÍA PAZ ERREA ABAD, SERGIO M. VICENTE-SERRANO, JOSÉ ARNÁEZ

La diversidad de la cubierta vegetal en campos abandonados del Leza y Jubera (Sistema Ibérico, La Rioja) a partir del SIOSE
Land cover diversity in abandoned fields in the Leza and Jubera valleys (Iberian System, La Rioja) from SIOSE 55-78

FERNANDO PÉREZ-CABELLO

Actividad vegetal de las cuencas de los ríos Cidacos y Alhama (La Rioja): análisis diacrónico mediante imágenes Landsat
Vegetation activity of the Cidacos and Alhama Rivers Basins (La Rioja): diachronic analysis using Landsat imagery 79-102

JESÚS JULIO CAMARERO MARTÍNEZ

Dinámica post-incendio de la vegetación en un valle del Alto Najerilla
Post-fire vegetation dynamics in the High Najerilla Valley 103-124

JAVIER MARTÍNEZ-ABAIGAR, RAFAEL TOMÁS LAS HERAS, GABRIEL FABÓN, LAURA MONFORTE, ENCARNACIÓN NÚÑEZ-OLIVERA

Bioindicadores del cambio global: los briófitos ante la degradación de ozono estratosférico y el aumento de radiación ultravioleta en la Biosfera
Global Change bioindicators; impacts of stratospheric ozone degradation and increased ultraviolet radiation in bryophytes 125-162

**ENCARNACIÓN NÚÑEZ-OLIVERA, RAFAEL TOMÁS LAS HERAS,
MARÍA DE LOS ÁNGELES DEL CASTILLO, GABRIEL FABÓN, LAURA MONFORTE,
JAVIER MARTÍNEZ-ABAIGAR**

Radiación ultravioleta y fotosintética en dos observatorios de montaña

(Valdezcaray, La Rioja)

Ultraviolet and photosynthetic radiations in two mountain observatories

(Valdezcaray, La Rioja) 163-186

ALFREDO OLLERO OJEDA

Los cauces fluviales como indicadores de cambio global: propuesta metodológica

Rivers channels as geoindicators of global change: methodological approach 187-200

BELINDA GALLARDO, CECILIA ESPAÑOL

El mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*, Pallas 1971) en La Rioja: situación actual
y evolución potencial

The zebra mussel (Dreissena polymorpha, Pallas 1971) in La Rioja (NE Spain):

current situation and potential evolution 201-220

RUBÉN ESTEBAN PÉREZ

Estudio de las medidas tomadas para la remediación del impacto medioambiental
en las cuevas visitables de Ortigosa de Cameros (Gruta de La Viña y Gruta
de La Paz), La Rioja

Study of the steps taken to the environmental remediation on the tourist caves of

Ortigosa de Cameros (Cave of La Viña and Cave of La Paz), La Rioja (Spain) 221-250

RADIACIÓN ULTRAVIOLETA Y FOTOSINTÉTICA EN DOS OBSERVATORIOS DE MONTAÑA (VALDEZCARAY, LA RIOJA)

ENCARNACIÓN NÚÑEZ-OLIVERA¹

RAFAEL TOMÁS LAS HERAS¹

MARÍA DE LOS ÁNGELES DEL CASTILLO¹

GABRIEL FABÓN¹

LAURA MONFORTE¹

JAVIER MARTÍNEZ-ABAIGAR¹

RESUMEN

Tomando como base los datos generados por dos observatorios situados en Valdezaray (La Rioja) a distinta altitud (1640 y 2140 m) desde el 1 de septiembre de 2007 hasta el 31 de agosto de 2011, se estudian: 1) las variaciones anuales e interanuales de las irradiancias y las dosis de radiación fotosintética (PAR), ultravioleta-A (UV-A) y ultravioleta-B (UV-B); 2) las variaciones anuales e interanuales de los cocientes entre las dosis de estas tres bandas de longitudes de onda; y 3) las variaciones diarias de las irradiancias horarias de las mismas bandas. Todas las variables (irradiancia y dosis de PAR, UV-A y UV-B) se correlacionaban significativamente entre sí, independientemente del observatorio, la banda espectral y el tipo de variable (irradiancia o dosis). Los factores que determinaban los cambios en las variables estudiadas fueron la elevación solar, el fotoperiodo, la nubosidad y la columna de ozono. Los datos estudiados sugieren que los organismos, incluido el ser humano, están expuestos a mayores picos de irradiancia UV en zonas de montaña, pero eso no implica necesariamente que soporten una mayor dosis anual de UV que en localidades de menor altitud, debido a la mayor nubosidad asociada a las zonas de montaña. Estos datos son los primeros que se suministran en observatorios de alta montaña de La Rioja, y pueden ser importantes para evaluar los efectos de la radiación sobre los organismos y mejorar la fotoprotección de las personas involucradas en actividades laborales o de ocio en zonas de montaña.

Palabras clave: radiación ultravioleta, UV-A, UV-B, radiación fotosintética, zonas de montaña.

1. Universidad de La Rioja, Edificio Científico-Tecnológico, Avda. Madre de Dios 51, 26006 Logroño (La Rioja).

On the basis of the data provided by two observatories located at Valdezcaray (La Rioja) at different altitudes (1640 and 2140 m) from 1 September 2007 to 31 August 2011, we studied: 1) annual and interannual variations in irradiances and doses of photosynthetic (PAR), ultraviolet-A (UV-A) and ultraviolet-B (UV-B) radiations; 2) annual and interannual variations in the quotients between the doses of those three wavelength bands; and 3) daily variations in hourly irradiances of the same bands. All the variables (irradiances and doses of PAR, UV-A and UV-B) were significantly correlated between them, independently on the observatory, the wavelength band and the type of variable (irradiance or dose). The factors determining the changes in the variables studied were solar elevation, photoperiod, cloudiness and ozone column. Our data suggest that the organisms, including the human being, are exposed to higher peak UV irradiances in mountain zones, but this does not necessarily imply that they withstand a higher annual UV dose than in low-altitude localities, because of the higher cloudiness associated to mountain zones. The UV data presented here are the first recorded in high mountain observatories in La Rioja, and can be important to evaluate the effects of radiation on organisms and to improve the photoprotection of people involved in work or leisure activities in mountain areas.

Key words: *ultraviolet radiation, UV-A, UV-B, photosynthetic radiation, mountain zones.*

1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar se distribuye fundamentalmente en longitudes de onda infrarrojas (>700 nm), visibles (400-700 nm, límites que coinciden con los de la radiación fotosintética), y ultravioletas (desde 400 nm hasta un límite inferior controvertido que se establece entre 5 y 100 nm: Calow, 1998). La medida de estas radiaciones tiene un gran interés por razones diversas, desde sus aplicaciones tecnológicas (energía solar, degradación de materiales, purificación de aguas) hasta los riesgos que pueden conllevar para el ser humano y los ecosistemas (efectos nocivos de la radiación ultravioleta). En particular, la radiación ultravioleta (UV) se divide en tres fracciones: UV-C (<280 nm), que es letal para la vida pero resulta completamente absorbida por el oxígeno y el ozono de la estratosfera, y por lo tanto no alcanza la Biosfera; UV-B (280-315 nm), con efectos nocivos para muchos organismos y que es absorbida parcialmente por el ozono estratosférico; y UV-A (315-400 nm), que no resulta absorbida por el ozono y produce numerosos efectos biológicos, algunos de ellos nocivos. La cantidad de radiación UV (UV-A y UV-B) recibida en la superficie terrestre depende de la elevación solar (dependiente a su vez de la latitud, la hora del día y la estación del año), la altitud, la presencia de nubes y aerosoles, y el albedo (Vanicek *et al.*, 1999). Además, la cantidad de UV-B depende de la concentración de ozono estratosférico, dado que este gas la absorbe específicamente.

La degradación antropogénica del ozono estratosférico (el conocido “agujero de ozono”) es uno de los procesos asociados al cambio climático o cambio global, junto con el calentamiento de la atmósfera y otros fenómenos (Ennis y Marcus, 1996; Aucamp, 2007). En la década de los 70 del siglo pasado, los científicos alertaron de que ciertos gases producidos por el ser humano, principalmente halocarburos, podían destruir el ozono estratosférico (Molina y Rowland, 1974). Su fabricación y utilización fue regulada por el Protocolo de Montreal (1987), lo que no ha podido contrarrestar todavía la degradación de ozono en la Antártida y la zona ártica (McKenzie *et al.*, 2007). Sí ha contribuido a detener dicha degradación en latitudes medias del hemisferio norte, donde se estima una reducción de ozono del 6% en los últimos 30 años (McKenzie *et al.*, 2003). La degradación de ozono provoca un aumento de la radiación UV-B recibida por los seres vivos en la Biosfera, y se estima que un 1% de reducción causa un aumento de UV-B cifrado entre el 1% y el 2% (Ennis y Marcus, 1996). Los modelos predicen que el retorno a niveles de ozono anteriores a 1980 se conseguirá alrededor de la mitad del siglo XXI, y una década o dos más tarde en las regiones polares, aunque persiste todavía una gran incertidumbre sobre esta recuperación por la interacción de otros factores de cambio climático (McKenzie *et al.*, 2007; Hegglin y Shepherd, 2009). Además, los miniagujeros de ozono que se producen ocasionalmente en latitudes medias pueden causar descensos de este gas de hasta un 33%, provocando aumentos transitorios de UV-B entre el 43% y el 75% (Antón *et al.*, 2007).

Una exposición excesiva a la radiación UV-B puede tener consecuencias perjudiciales para los seres vivos y los ecosistemas (Caldwell *et al.*, 2007; Häder *et al.*, 2007a; Norval *et al.*, 2007). En el ser humano, estas consecuencias negativas afectan especialmente a órganos muy expuestos como la piel (eritema, quemaduras, fotoenvejecimiento, varios tipos de cáncer) y los ojos (fotoqueratitis, fotoconjuntivitis, cataratas, cáncer de conjuntiva), pero también al sistema inmunológico (disminución general de su funcionamiento, aumento de la fotosensibilidad, mayor riesgo de infecciones y alergias, reducción de la efectividad de las vacunas). Algunos de estos efectos se han relacionado también con la exposición a UV-A, radiación que hasta hace unos años se consideraba inocua para el ser humano (Sivamani *et al.*, 2009). En la actualidad existe cierto consenso científico en que el aumento de los efectos negativos de la radiación UV se debe principalmente a un cambio en los hábitos de la población, que muchas veces conduce a exposiciones excesivas, pero la degradación de ozono también es un factor importante en algunas zonas, como las periantárticas. La radiación UV, tanto la UV-A como la UV-B, también ejercen algunos efectos positivos, como la colaboración en la síntesis de vitamina D, el efecto antidepresivo o el tratamiento terapéutico de diversas enfermedades de la piel (Norval *et al.*, 2007).

Para evaluar los efectos de la radiación UV y, en lo posible, contrarrestar los negativos, resulta imprescindible una medida real en las distintas zonas geográficas. En España, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) suministra datos de radiación solar de banda ancha (global, difusa, directa, infrarroja y UV-B) en 35 observatorios, entre ellos el riojano de Logroño-Agon-

cillo (http://www.aemet.es/es/servidor-datos/acceso-datos/listado-contenidos/detalles/radiacion_solar), datos de índice ultravioleta (UVI) tanto en observación como en predicción (<http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/radiacion/ultravioleta?datos=mapa>), así como medidas espectrales derivadas de una red de espectrofotómetros Brewer compuesta por siete instrumentos: A Coruña, El Arenosillo (Huelva), Izaña (Tenerife), Madrid, Murcia, Santa Cruz de Tenerife y Zaragoza (González-Frías *et al.*, 2002). También se han realizado medidas de radiación UV (a veces acompañada por otras radiaciones) en varias localidades de España, como Valencia (Martínez-Lozano *et al.*, 1996; Cañada *et al.*, 2008), Granada (Foyo-Moreno *et al.*, 1998), Málaga (Aguilera *et al.*, 2004), Madrid (Gutiérrez-Marco *et al.*, 2007) o Valladolid (Bilbao *et al.*, 2008; Bilbao y De Miguel, 2010), tomando como base los datos suministrados por instrumentos radicados en Universidades o Centros de Investigación. Tanto la red de medida de la AEMET como los mencionados estudios puntuales suministran relativamente poca información sobre radiación en observatorios de montaña, salvo en zonas concretas como Sierra Nevada (Lorente *et al.*, 2006; Sola *et al.*, 2008).

En La Rioja, además de los datos mencionados anteriormente del observatorio Logroño-Agoncillo de la AEMET, se dispone de medidas de libre acceso de radiación solar global suministradas por el Gobierno de La Rioja en 16 estaciones establecidas progresivamente desde 1999 hasta 2010 (<http://www.larioja.org/npRioja/default/defaultpage.jsp?idtab=442821>). Estos observatorios no facilitan medidas de las distintas longitudes de onda. Por otra parte, nuestro grupo de investigación colaboró en la red mundial de medida ELDONET (*European Light Dosimeter Network*), que inicialmente fue concebida dentro de un proyecto de la Unión Europea pero que se extendió finalmente a más de 40 estaciones en 24 países de cinco continentes (Häder *et al.*, 2007b). Dentro de esta red, se instaló en Logroño un medidor de radiación fotosintética (conocida como PAR por las siglas inglesas de *Photosynthetically Active Radiation*), UV-A y UV-B que suministró datos de irradiancias y dosis en el periodo 2001-2004 (Häder *et al.*, 2007b). Dado que las únicas medidas de este tipo que se han realizado en La Rioja se hicieron en Logroño, no existen datos publicados de PAR, UV-A y UV-B de localidades riojanas de montaña.

El objetivo de este trabajo es facilitar, por primera vez en La Rioja, datos de irradiancias y dosis de PAR, UV-A y UV-B en zonas de montaña. En concreto, se suministran datos de dos observatorios situados a altitudes diferentes (1640 y 2140 m) en la estación de esquí de Valdezcaray, y se analizan sus variaciones diarias, anuales e interanuales, con una dedicación especial a la radiación UV-B. Estos datos podrían contribuir a mejorar la información sobre los riesgos derivados de la exposición a la radiación UV en áreas de montaña, donde se desarrollan en la actualidad numerosas actividades laborales y de ocio. A su vez, una mejor información redundaría en una fotoprotección más adecuada de los ciudadanos relacionados con dichas actividades.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante cuatro años consecutivos, desde el 1 de septiembre de 2007 hasta el 31 de agosto de 2011, se midieron las irradiancias fotosintética (PAR: 400-700 nm), UV-A (315-400 nm según el criterio de la CIE, *Commission Internationale d'Eclairage*), y UV-B (280-315 nm según el mismo criterio) en dos localidades de montaña de La Rioja. Las dos localidades se encuentran situadas en la estación de esquí de Valdezaray y se han denominado Rioja 1 y Rioja 2. Rioja 1 está localizada a 1640 m de altitud y sus coordenadas son 42° 15' 18" de latitud N y 2° 58' 05" de longitud W. Por su parte, Rioja 2 está a 2140 m de altitud y sus coordenadas son 42° 14' 37" de latitud N y 2° 58' 04" de longitud W. Las irradiancias PAR, UV-A y UV-B, todas ellas en $W\ m^{-2}$, se midieron respectivamente con sensores Skye Quantum SKP 215, SKU 420 y SKU 430, conectados a una unidad automática remota de adquisición y transmisión de datos Meteodata 3000 (Geonica, Madrid). Las medidas se tomaban cada segundo y se integran cada 5 minutos. A partir de los valores de irradiancia, se calcularon las dosis de PAR, UV-A y UV-B en $kJ\ m^{-2}\ día^{-1}$, y se analizaron las variaciones interanuales, anuales y diarias de las irradiancias y las dosis, así como las proporciones entre las tres bandas del espectro. También se calcularon las correlaciones existentes (coeficientes de Pearson) entre las variables medidas en ambos observatorios. Los sensores se calibraban periódicamente con un espectrorradiómetro Macam SR9910 (Macam Photometrics Ltd., Livingstone, Escocia).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las seis variables estudiadas (irradiancia máxima diaria y dosis diaria de PAR, UV-A y UV-B) se correlacionaban estrechamente y significativamente ($P < 0.001$), con independencia del observatorio, la banda espectral y el tipo de variable utilizada (irradiancia o dosis) (Tabla 1). Esto resulta lógico si se tiene en cuenta que el único contraste entre los dos observatorios radicaba en una diferencia de 500 m de altitud, por lo que el principal factor determinante de los patrones de variación, la elevación solar, influiría de manera similar en ambos observatorios, en las tres bandas espectrales y en ambos tipos de variables (irradiancia o dosis). Las correlaciones que se establecían entre las dosis diarias eran mayores, aunque igualmente significativas, que las mostradas por las irradiancias máximas, dado que las primeras son medidas integradas en el tiempo mientras que las segundas son instantáneas. Se han obtenido correlaciones similares, por ejemplo entre la radiación global y la UV-B, en otros observatorios (Bilbao *et al.*, 2008). De acuerdo con las correlaciones obtenidas, los patrones temporales de las distintas variables de ambos observatorios fueron similares, por lo que en algunas ocasiones se ha representado una sola variable de un único observatorio para mostrar los cambios temporales típicos, y evitar así redundancias.

Las irradiancias máximas diarias de PAR, UV-A y UV-B en el periodo estudiado se representan en la Figura 1. Los valores más altos se registraban en

TABLA 1.
Correlaciones entre todas las variables (irradiancia máxima diaria de PAR, UV-A y UV-B, en W m⁻², y dosis diaria de PAR, UV-A y UV-B, en kJ m⁻² día⁻¹) de los dos observatorios utilizados (Rioja 1, 1640 m de altitud; Rioja 2, 2140 m) a lo largo del periodo de estudio (n = 1461). ***, P<0.001

	PAR max (W m ⁻²)		UV-A max (W m ⁻²)		UV-B max (W m ⁻²)		PAR (kJ m ⁻² día ⁻¹)		UV-A (kJ m ⁻² día ⁻¹)		UV-B (kJ m ⁻² día ⁻¹)	
	Rioja 1	Rioja 2	Rioja 1	Rioja 2	Rioja 1	Rioja 2	Rioja 1	Rioja 2	Rioja 1	Rioja 2	Rioja 1	Rioja 2
PAR max (W m ⁻²)	Rioja 1	1.000										
	Rioja 2	0.864 ***	1.000									
UV-A max (W m ⁻²)	Rioja 1	0.960 ***	0.843 ***	1.000								
	Rioja 2	0.898 ***	0.898 ***	0.929 ***	1.000							
UV-B max (W m ⁻²)	Rioja 1	0.938 ***	0.850 ***	0.981 ***	0.931 ***	1.000						
	Rioja 2	0.835 ***	0.927 ***	0.869 ***	0.926 ***	0.911 ***	1.000					
PAR (kJ m ⁻² día ⁻¹)	Rioja 1	0.855 ***	0.774 ***	0.855 ***	0.811 ***	0.888 ***	1.000					
	Rioja 2	0.793 ***	0.865 ***	0.794 ***	0.819 ***	0.837 ***	0.881 ***	0.920 ***	1.000			
UV-A (kJ m ⁻² día ⁻¹)	Rioja 1	0.864 ***	0.784 ***	0.894 ***	0.842 ***	0.919 ***	0.835 ***	0.988 ***	0.913 ***	1.000		
	Rioja 2	0.828 ***	0.821 ***	0.848 ***	0.895 ***	0.887 ***	0.879 ***	0.940 ***	0.941 ***	0.945 ***	1.000	
UV-B (kJ m ⁻² día ⁻¹)	Rioja 1	0.849 ***	0.784 ***	0.880 ***	0.840 ***	0.926 ***	0.855 ***	0.982 ***	0.916 ***	0.991 ***	1.000	
	Rioja 2	0.781 ***	0.849 ***	0.816 ***	0.852 ***	0.875 ***	0.937 ***	0.899 ***	0.969 ***	0.908 ***	0.947 ***	1.000

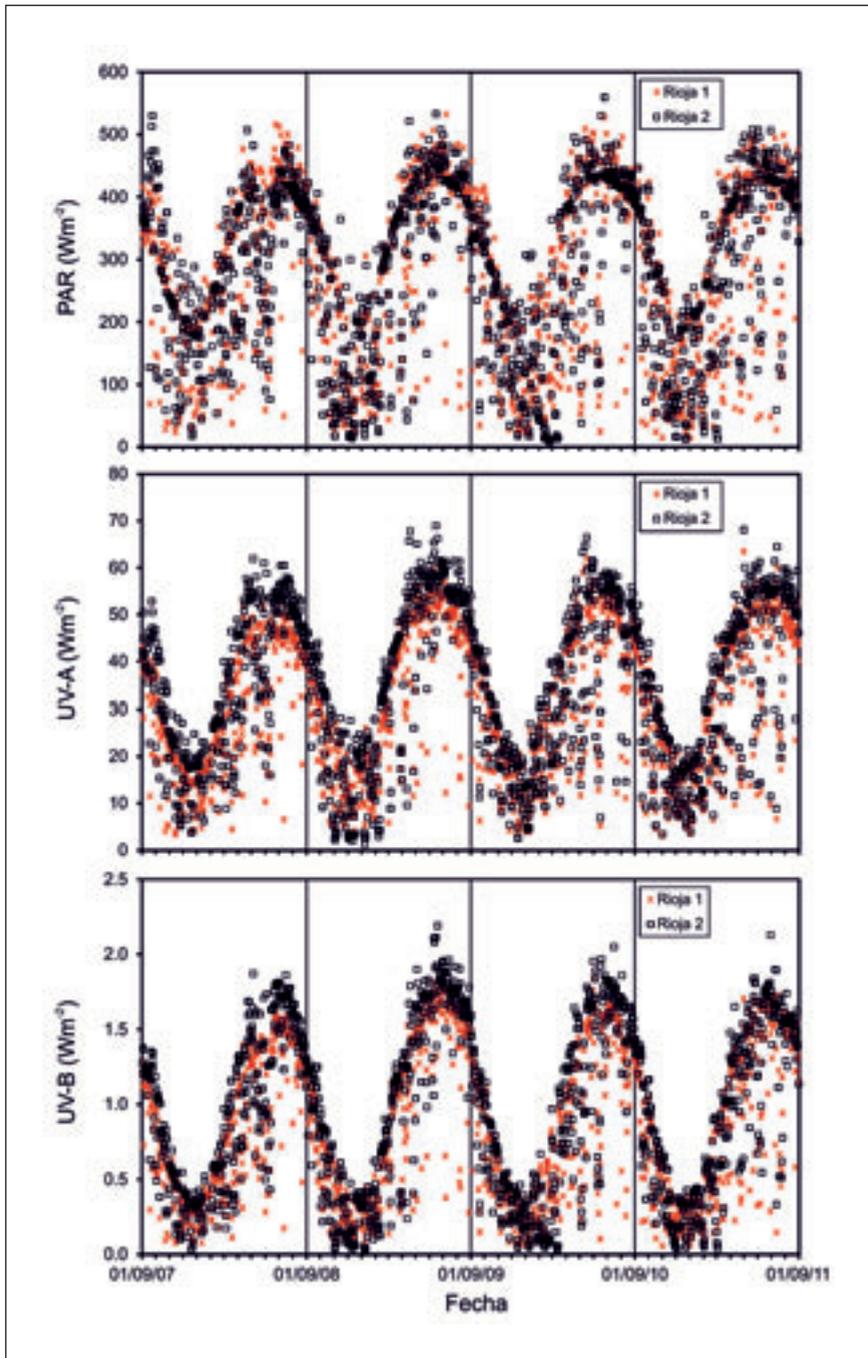


Fig. 1. Variaciones de la irradiancia máxima diaria ($W m^{-2}$) de PAR, UV-A y UV-B en los dos observatorios utilizados (Rioja 1, 1640 m de altitud; Rioja 2, 2140 m) en el periodo estudiado.

torno al solsticio de verano, cuando la elevación solar es mayor y, por tanto, el camino de la radiación es menor, por lo que aumenta la irradiancia. Los valores más bajos se daban en torno al solsticio de invierno, por la menor elevación solar. Estos cambios anuales se han descrito repetidas veces en otros observatorios (Aguilera *et al.*, 2004; Häder *et al.*, 2007b; Seckmeyer *et al.*, 2008; Bilbao *et al.*, 2008, 2010). Las variaciones interanuales eran poco importantes, como ocurre en otras localidades (Häder *et al.*, 2007b; Bilbao *et al.*, 2010).

Los valores máximos, medios y mínimos de irradiancia máxima diaria para cada banda del espectro en el periodo estudiado se muestran en la Tabla 2. Los valores máximos y medios en el observatorio de mayor altitud (Rioja 2) fueron mayores que los de Rioja 1, más marcadamente en el caso de las bandas UV-A y UV-B que en PAR, como también se deduce de la aplicación de modelos de radiación (Engelsen y Kylling, 2005). En particular, las irradiancias máximas UV-A y UV-B a lo largo del periodo de estudio fueron claramente mayores en Rioja 2 en los meses de verano (Figura 1), cuando la escasez de nubosidad hacía manifestarse más visiblemente el gradiente de radiación UV con la altitud (Björn *et al.*, 1998). Sin embargo, en el resto del año, especialmente en invierno, había menos diferencias entre ambos observatorios, dado que habría más días nubosos y la nubosidad cubriría ambos observatorios simultáneamente, amortiguando sus diferencias de irradiancia máxima. De hecho, la nubosidad es el principal factor atmosférico, no astronómico, que controla la radiación UV recibida en la superficie terrestre, dado que una cubierta densa de nubes puede atenuar la radiación UV hasta un 99% (Seckmeyer *et al.*, 2008).

Las variaciones de las dosis totales diarias de PAR, UV-A y UV-B en el periodo estudiado se muestran en la Figura 2. El patrón de variación resultaba similar al descrito para las irradiancias máximas diarias, puesto que nuevamente es la elevación solar el factor que controla la variación anual de las dosis. A este patrón temporal contribuye así mismo el fotoperiodo (numero diario de horas de sol), que también es mayor alrededor del solsticio de verano y menor en torno al solsticio de invierno. No obstante, aparece una mayor densidad de puntos bajo las curvas sinusoidales de las dosis totales diarias (Figura 2) que en el caso de las irradiancias máximas (Figura 1), porque los cambios de nubosidad introducen mayor variabilidad a corto plazo (de día a día) en una medida integrada en el tiempo, como la dosis, que en una medida instantánea como la irradiancia (Antón *et al.*, 2009).

Las dosis máximas, medias y mínimas de cada banda del espectro en el periodo estudiado aparecen en la Tabla 2. Como en el caso de las irradiancias máximas diarias, los valores máximos y medios en el observatorio de mayor altitud (Rioja 2) fueron mayores que los de Rioja 1, más marcadamente en el caso de las bandas UV-A y UV-B que en PAR. Así mismo, las dosis diarias de UV-A y UV-B fueron mayores en Rioja 2 en los meses de verano, mientras que en el resto del año las diferencias entre ambos observatorios eran menos marcadas.

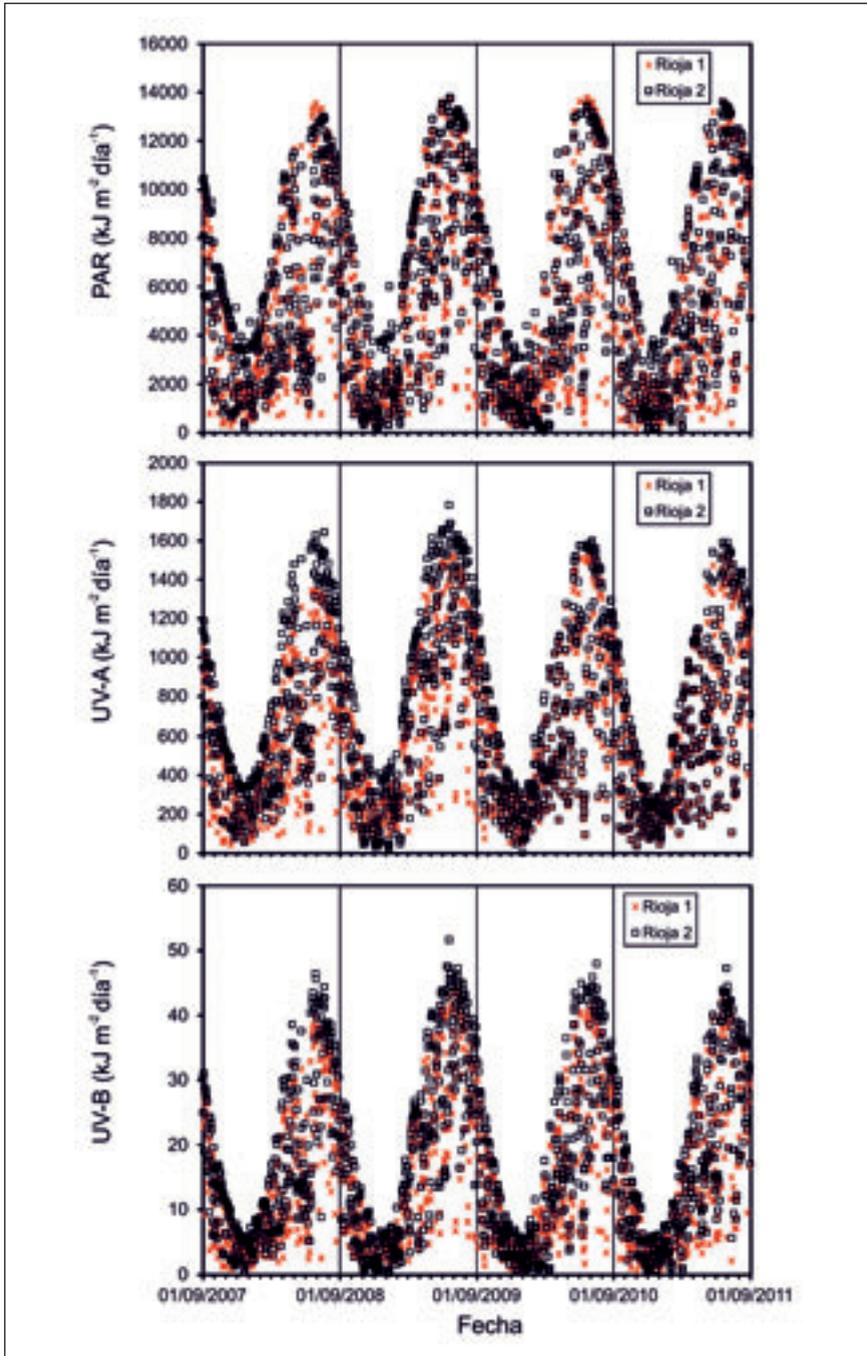


Fig. 2. Variaciones de la dosis diaria ($\text{kJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$) de PAR, UV-A y UV-B en los dos observatorios utilizados (Rioja 1, 1640 m de altitud; Rioja 2, 2140 m) en el periodo estudiado.

TABLA 2.

Valores máximos absolutos, medios y mínimos absolutos de la irradiancia máxima diaria ($W m^{-2}$) y la dosis diaria ($kJ m^{-2} día^{-1}$) de PAR, UV-A y UV-B de los dos observatorios utilizados (Rioja 1, 1640 m de altitud; Rioja 2, 2140 m) a lo largo del periodo de estudio. También se indica el cociente entre los valores de ambos observatorios

	Rioja 1	Rioja 2	Rioja 2 / Rioja 1
PAR ($W m^{-2}$)			
Máx	531.8	559.1	1.05
Med	278.6	283.0	1.02
Mín	14.5	7.8	0.54
UV-A ($W m^{-2}$)			
Máx	63.5	68.9	1.09
Med	30.8	34.7	1.13
Mín	3.1	1.3	0.42
UV-B ($W m^{-2}$)			
Máx	1.88	2.19	1.16
Med	0.83	0.93	1.12
Mín	0.06	0.01	0.17
PAR ($kJ m^{-2} día^{-1}$)			
Máx	13776	13790	1.00
Med	5075	5600	1.10
Mín	131	55	0.42
UV-A ($kJ m^{-2} día^{-1}$)			
Máx	1534	1783	1.16
Med	594	683	1.15
Mín	34.8	0.0	0.00
UV-B ($kJ m^{-2} día^{-1}$)			
Máx	43.8	51.6	1.18
Med	14.6	17.2	1.18
Mín	0.48	0.14	0.29

Tanto las irradiancias máximas diarias como las dosis máximas diarias de PAR encontradas en Valdezcaray (Tabla 2) son similares a las de Málaga (Aguilera *et al.*, 2004), mientras que las de UV-A y UV-B son mayores en Valdezcaray. Esto es congruente con el hecho de que la altitud hace incrementarse más la radiación de longitud de onda más corta (Sola *et al.*, 2008). Sin embargo, las dosis diarias máximas de UV-B en Valladolid ($47 kJ m^{-2} d^{-1}$; Bilbao *et al.*, 2010) son comparables a las de nuestros observatorios, a pesar de éstos se encuentran a una altitud considerablemente mayor (800 m y 1300 m más elevados). Esto se puede deber, por una parte, a las diferencias en los instrumentos de medida y en los periodos estudiados, por lo que sería interesante disponer de más medidas homogeneizadas en estos sentidos. Por otra parte, las dosis de radiación pueden estar influidas por otros factores además de la altitud.

Los gradientes de radiación UV con respecto a la altitud encontrados en nuestro trabajo (Tabla 2) son mayores que los señalados por Sola *et al.* (2008) en el sur de España (6-8% km⁻¹ para UV-A y 7-11% km⁻¹ para UV-B), pero es preciso tener en cuenta que estos gradientes pueden ser muy variables en función de la longitud de onda, la elevación solar, los aerosoles, la columna de ozono y el crecimiento de la capa de mezcla a lo largo del día. Además, se han descrito gradientes mayores que en el sur de España en otras zonas, hasta un 30% km⁻¹ a 300 nm en los Alpes (Tarasick *et al.*, 2003). No obstante, no se puede descartar que los gradientes encontrados entre Rioja 2 y Rioja 1 se vean potenciados por situaciones de inversión térmica en las cuales las nubes cubrirían el observatorio de menor altitud pero no el de mayor altitud. Esto explicaría los gradientes tan elevados obtenidos en tan sólo 500 m de diferencia de altitud. En general, estos gradientes asociados a la altitud se deben a que en altitudes elevadas los rayos solares atraviesan menos atmósfera, y por lo tanto es menor su atenuación (Lorente *et al.*, 2006). Con respecto a las irradiancias PAR máximas diarias, tomadas en su conjunto, había menos diferencias entre los dos observatorios en las distintas épocas del año, debido al menor gradiente que muestra la PAR con respecto a la altitud. Esto era esperable, ya que, como se ha dicho antes, el efecto de la altitud se atenúa a medida que aumenta la longitud de onda, y por lo tanto los gradientes altitudinales son mayores para la radiación UV-B que para la UV-A, y para ésta que para la PAR (Sola *et al.*, 2008). Los cocientes de los valores mínimos de irradiancia máxima diaria entre ambos observatorios (Tabla 2) son poco representativos (Bilbao *et al.*, 2008; Cañada *et al.*, 2008). En comparación con los datos del observatorio de Logroño (Häder *et al.*, 2007b), se observan mayores irradiancias máximas en Valdezaray (Rioja 1 y Rioja 2) en las tres bandas del espectro, en consonancia con su mayor altitud.

Las dosis diarias máximas, medias y mínimas de PAR, UV-A y UV-B para cada mes, obtenidas como medias de los cuatro años muestreados, aparecen en la Tabla 3 para el observatorio Rioja 2. La Tabla 3 puede utilizarse como el umbral máximo de dosis UV-B que se puede recibir en La Rioja, dado que la altitud del observatorio Rioja 2 está próxima a la de la mayor cumbre riojana (San Lorenzo, 2262 m), lo cual puede ser relevante para establecer los efectos biológicos de la radiación UV-B. Existen datos comparables a los de nuestra Tabla 3 para la radiación UV-B en el observatorio de Valladolid (Bilbao *et al.*, 2008), donde 1) las dosis medias mensuales eran mayores que las de Rioja 2 en marzo y de mayo a septiembre, con una diferencia especialmente acentuada en mayo y junio (31.20 y 38.82 kJ m⁻² d⁻¹ en Valladolid por 24.11 y 29.22 en Rioja 2); 2) las dosis máximas eran iguales o ligeramente mayores en primavera y verano pero algo menores en invierno; y 3) las dosis mínimas eran iguales o ligeramente mayores en todos los meses. La mayor nubosidad de Rioja 2 podría explicar estas diferencias.

La Figura 3 muestra el ciclo anual de las dosis diarias medias de UV-B en el observatorio Rioja 2, junto con la dispersión encontrada cada día y una curva de ajuste. Esta gráfica resulta muy sintética y permite analizar los factores que influyen sobre la dosis UV-B. La elevación solar y el fotoperiodo, en ausencia de cualquier otro factor, determinarían un ciclo anual representado por la

TABLA 3.
Dosis diarias máximas, medias y mínimas (kJ m⁻² d⁻¹) de PAR, UV-A y UV-B para cada mes del año, obtenidas como medias de los cuatro años muestreados, en el observatorio Rioja 2 (2140 m de altitud)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PAR												
Máx	4907,98	6799,47	9795,14	11462,16	12699,35	13348,37	13237,33	12039,19	9897,47	7452,10	5286,27	3782,94
Med	2116,54	3216,59	4916,71	6739,94	7097,77	8247,31	10470,94	9084,42	6343,98	4152,78	2426,45	1950,86
Min	456,84	469,56	931,73	1905,94	1689,70	2033,95	3243,26	3961,56	1575,50	716,96	489,95	235,45
UV-A												
Máx	424,97	784,47	1064,04	1338,36	1555,69	1645,98	1617,62	1442,26	1154,06	803,23	522,00	369,63
Med	244,52	453,13	612,58	831,36	931,22	1019,36	1253,31	1087,80	743,13	473,88	281,56	219,73
Min	59,95	128,55	182,73	244,44	299,88	296,31	362,32	455,23	221,74	117,99	63,15	39,10
UV-B												
Máx	8,76	16,68	26,04	36,47	41,25	47,57	46,04	39,83	30,42	19,25	11,20	6,63
Med	4,24	7,57	13,33	21,20	24,11	29,22	35,57	30,02	19,14	10,80	5,31	3,82
Min	1,04	1,62	1,83	7,37	6,97	8,69	12,22	14,98	5,79	2,58	1,10	0,52

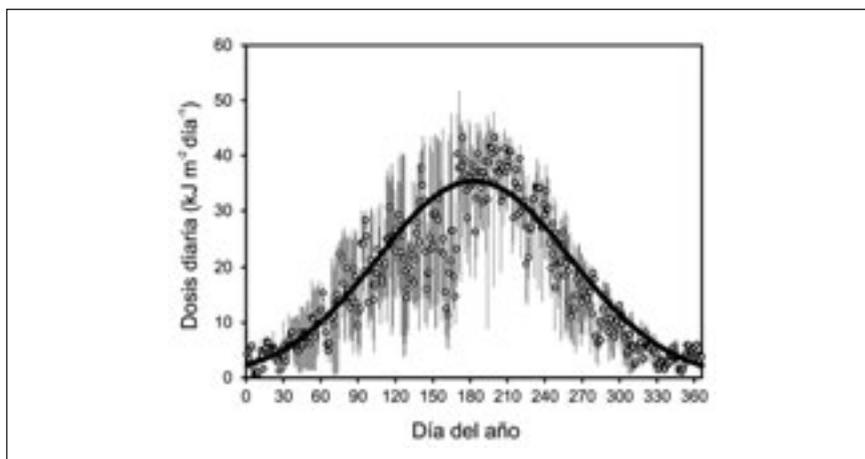


Fig. 3. Ciclo anual de las dosis diarias medias de radiación UV-B ($\text{kJ m}^2 \text{ día}^{-1}$) en el observatorio Rioja 2 (2140 m de altitud). Los círculos blancos representan las dosis diarias como medias de los cuatro años de observaciones (1 de septiembre de 2007 a 31 de agosto de 2011), y las líneas verticales muestran el intervalo entre las dosis máxima y mínima de cada día. Se incluye una curva de ajuste construida con los valores medios.

curva de ajuste, con dosis máximas en verano, mínimas en invierno e intermedias en primavera y otoño. Este ciclo anual encontrado en Rioja 2 es similar al señalado para Valladolid, pero como ocurría con las dosis diarias máximas de UV-B, las medias mensuales del mes más expuesto ($41 \text{ kJ m}^2 \text{ d}^{-1}$ en julio: Bilbao *et al.*, 2010) superaban las de Valdezcaray. Sin embargo, las medias mensuales del mes menos expuesto ($4 \text{ kJ m}^2 \text{ d}^{-1}$ en diciembre: Bilbao *et al.*, 2010) eran comparables a las encontradas en el presente estudio.

Además de la elevación solar y el fotoperiodo, otros factores, como la nubosidad, la columna de ozono, el albedo o los aerosoles, podrían modificar el ciclo ideal descrito en el párrafo anterior. Resulta significativo comprobar que gran parte de las dosis diarias medias se agrupan en torno a la curva de ajuste, y que los mayores desajustes se producen en el periodo abril - principios de junio, cuyos puntos aparecen frecuentemente muy por debajo de la línea, y en el periodo finales de junio - agosto, cuando se agrupan casi totalmente muy por encima de la línea. Estos desajustes se pueden achacar fundamentalmente a la gran nubosidad que ocurre en primavera y a su escasez en verano. Sobre este efecto de la nubosidad podría haberse solapado la influencia del grosor de la columna de ozono, que es mayor en primavera que en verano (Häder *et al.*, 2007b; Núñez-Olivera *et al.*, 2009). Por otra parte, en la Figura 3 se observa una mayor dispersión de las dosis diarias en primavera, por la mayor variabilidad de la nubosidad que tiene lugar en esta estación del año, como ocurre en otras zonas de España (Gutiérrez-Marco *et al.*, 2007; Antón *et al.*, 2009; Bilbao *et al.*, 2008, 2010). En particular, mayo es el mes más variable, como se ha encontrado también en Valencia (Martínez-Lozano *et al.*, 1996), Madrid (Gutiérrez-Marco *et al.*, 2007) o Valladolid (Bilbao *et al.*, 2008).

Con respecto a la influencia del albedo, Valdezaray puede mostrar una cierta cubierta de nieve durante varios meses al año (de noviembre a mayo: Arnáez Vadillo, 1980). Se ha descrito un aumento de hasta un 25% de la radiación UV eritemática (la fracción UV que produce enrojecimiento en la piel) debido a reflexiones múltiples entre la cubierta de nieve y la atmósfera en días despejados a 1610 m de altitud, aumentos que pueden llegar a un 80% en días nublados (Renaud *et al.*, 2000). En nuestro caso, como ocurre en general en la investigación sobre radiación UV (McKenzie *et al.*, 2007), la influencia de la nieve, junto con la de los aerosoles, necesitan un mayor estudio en el futuro.

La Figura 4 representa los cambios temporales, a lo largo del periodo de estudio, de las relaciones entre las dosis diarias de las tres bandas espectrales medidas (PAR, UV-A y UV-B) en los dos observatorios utilizados. En las tres bandas se registraron oscilaciones importantes entre días consecutivos, probablemente debidas a cambios en la nubosidad, ya que las nubes no absorben por igual las distintas longitudes de onda (por ejemplo, atenúan más la radiación solar total que la UV-B), y por lo tanto provocan variaciones importantes a corto plazo (hasta un 60%) en las proporciones de las diversas bandas del espectro (Antón *et al.*, 2008). No se observó un patrón anual definido en el cociente UV-A/PAR (como ocurría en Málaga: Aguilera *et al.*, 2004), dado que ninguna de estas bandas del espectro resultan afectadas por la columna de ozono estratosférico. Sin embargo, las relaciones UV-B/PAR y UV-B/UV-A mostraron variaciones estacionales evidentes, con valores más altos en los meses en torno al solsticio de verano y valores más bajos alrededor del solsticio de invierno. Estos patrones son similares a los señalados para otros observatorios (Aguilera *et al.*, 2004; Seckmeyer *et al.*, 2008). Los valores máximos de verano se explican porque el ozono estratosférico alcanza su máximo en primavera y declina en el verano (Núñez-Olivera *et al.*, 2009), de manera que la radiación solar que llega al nivel del suelo en la época estival está enriquecida relativamente en UV-B (Antón *et al.*, 2008), la banda del espectro solar absorbida específicamente por el ozono estratosférico. Es importante conocer este dato de cara a la fotoprotección de la población, ya que en verano no sólo se registra una mayor irradiancia UV-B, acoplada a una mayor irradiancia solar global, sino también una mayor proporción entre UV-B y PAR y entre UV-B y UV-A. Solamente se apreciaban diferencias claras entre ambos observatorios en el cociente UV-B/PAR, con valores más altos en el observatorio de mayor altitud, de acuerdo con el hecho de que la UV-B y la PAR presentaron los gradientes más y menos acusado con la altitud, respectivamente (Tabla 2).

En la Figura 5 se representan las variaciones diarias de la irradiancia UV-B media horaria para cada mes del periodo estudiado en el observatorio Rioja 2. Para permitir una comparación detallada con otras localidades, los datos numéricos correspondientes también se muestran en la Tabla 4. El resto de las variables revelaban similares variaciones diarias en ambos observatorios. Los valores máximos mensuales de la irradiancia UV-B media horaria fluctuaron entre 0.72 W m⁻² en enero y 5.36 en julio, y siempre se encontraron

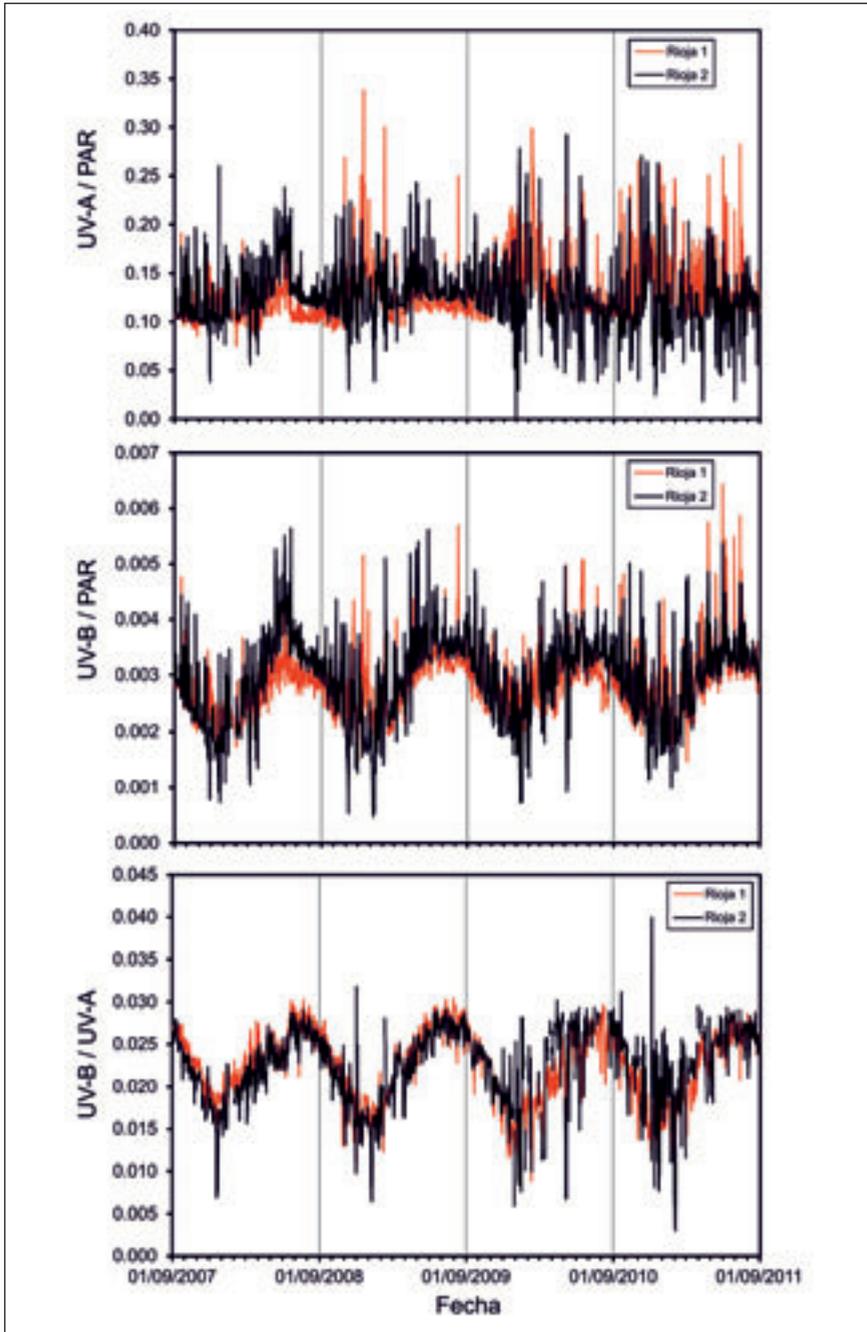


Fig. 4. Cambios temporales, a lo largo del periodo de estudio, de las relaciones entre las dosis diarias de las tres bandas espectrales medidas (PAR, UV-A y UV-B) en los dos observatorios utilizados (Rioja 1, 1640 m de altitud; Rioja 2, 2140 m).

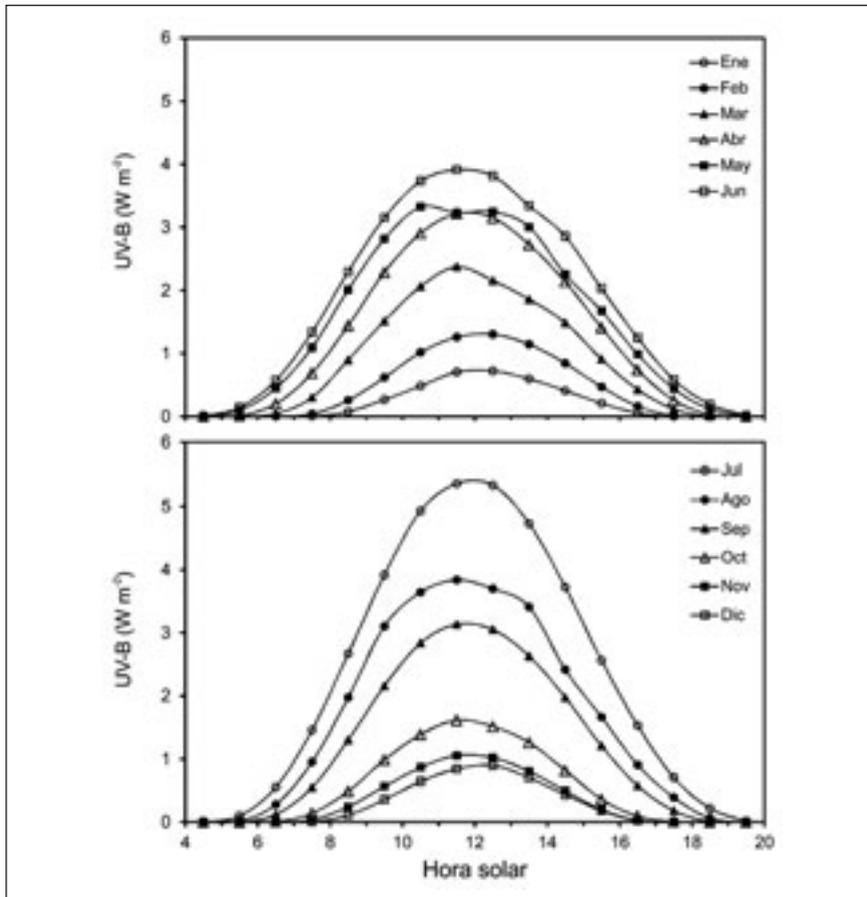


Fig. 5. Variaciones diarias de la irradiancia UV-B media horaria en el observatorio Rioja 2 (2140 m de altitud) para cada mes del periodo estudiado (1 de septiembre de 2007 a 31 de agosto de 2011).

en torno al mediodía solar. En Valladolid (840 m de altitud), el máximo horario también ocurría en julio, pero con valores más bajos (2.02 W m^{-2} ; Bilbao *et al.*, 2008), al igual que el mínimo horario a mediodía (0.30 W m^{-2} en diciembre), todo ello de acuerdo con la diferencia de altitud de ambos observatorios. La Figura 5 muestra en general una gran simetría, con los valores más altos en julio y junio, que progresivamente van descendiendo en primavera y otoño hasta llegar a los mínimos invernales, como ocurre en otros observatorios (Foyo-Moreno *et al.*, 1998; Bilbao *et al.*, 2008; Cañada *et al.*, 2008). El factor determinante de esta variación combinada diaria-anual fue la elevación solar, máxima en el mediodía solar y en el solsticio de verano, y mínima al amanecer y anochecer, así como en el solsticio de invierno. Además, la nubosidad puede alterar notablemente las variaciones debidas a la elevación solar, e incluso puede desplazar el orden lógico de los meses y las ho-

ras. Por ejemplo, la discontinuidad que se observa en mayo, que en algunas horas de mediodía y la tarde cae a valores propios de abril, se pudo deber probablemente a que mayo fue notablemente húmedo en el periodo estudiado (el mes más lluvioso en 2008 y el segundo más lluvioso en 2010: <http://www.larioja.org/npRioja/default/defaultpage.jsp?idtab=442821>). Por la distribución horaria de la citada discontinuidad, estas lluvias de mayo pudieron ser chubascos tormentosos. Un factor adicional cuya influencia puede hacerse notar en algunos casos es la columna de ozono estratosférico, que en el hemisferio norte alcanza su máximo en primavera (en torno a abril) y va descendiendo hasta el final del otoño, con mínimo en torno a noviembre (Häder *et al.*, 2007b; Núñez-Olivera *et al.*, 2009). Si se comparan los meses de marzo y septiembre, que tienen similares elevaciones solares, los valores horarios de irradiancia UV-B son mayores en septiembre por la menor columna de ozono (como ocurre en Valladolid: Bilbao *et al.*, 2008). No obstante, tampoco se puede descartar en este caso una influencia de la nubosidad, ya que marzo es, estadísticamente, un mes mucho más húmedo que septiembre en La Rioja (Núñez-Olivera y Martínez-Abaigar, 1991). Las variaciones diarias de la radiación UV y PAR que se han registrado en otros observatorios son similares a las encontradas en el presente trabajo (Bilbao *et al.*, 2008; Seckmeyer *et al.*, 2008).

Las dosis anuales de PAR, UV-A y UV-B en los observatorios Rioja 1 y Rioja 2 en los tres años completos del periodo estudiado (2008, 2009 y 2010) aparecen en la Tabla 5, y en la Figura 6 se representan los datos correspondientes a Rioja 2. Las dosis anuales de todas las bandas del espectro eran mayores en Rioja 2 que en Rioja 1, como ocurría con las irradiancias máximas diarias y las dosis diarias (Tabla 2). Así mismo, los cocientes entre las dosis medias anuales de ambos observatorios para las distintas longitudes de onda, son notablemente parecidos a los señalados para las variables analizadas en la Tabla 2, y ascendentes en la progresión PAR – UV-A – UV-B. La discusión de estos resultados es similar a la efectuada anteriormente para los cocientes correspondientes a las irradiancias máximas diarias y las dosis diarias (Tabla 2).

En Logroño, que es el observatorio más cercano del que se poseen datos similares, aunque correspondientes al periodo 2001-2004, las dosis anuales medias de PAR, UV-A y UV-B eran, respectivamente, 2.16, 0.30 y 0.0058 GJ m⁻² (Häder *et al.*, 2007b). Las diferencias entre Logroño y los observatorios de Valdezcaray no sólo pueden deberse a las características propias de cada observatorio, sino también al instrumento de medida y al periodo utilizado en cada estudio. A pesar de las diferencias de instrumentación y periodo, se puede especular que en Logroño se registran mayores dosis anuales de PAR y UV-A por su menor nubosidad en comparación con Valdezcaray (Rioja 2). Este factor prevalecería sobre los gradientes de PAR y UV-A que se registran con la altitud. Sin embargo, la dosis anual de UV-B es ligeramente mayor en Valdezcaray (Rioja 2), a pesar de su mayor nubosidad, por el considerable gradiente altitudinal que posee esta banda del espectro (Björn *et al.*, 1998; Lorente *et al.*, 2006; Sola *et al.*, 2008). Es necesario realizar más investigaciones, utilizando el mismo sensor y un periodo isocrónico en Logroño y Valdezca-

TABLA 4.
Variaciones diarias de la irradiancia UV-B media horaria ($W m^{-2}$), para cada mes del periodo estudiado en el observatorio Rioja 2 (2140 m de altitud)

Hora solar	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
4 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5 - 6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.10	0.14	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
6 - 7	0.00	0.00	0.05	0.20	0.45	0.57	0.56	0.28	0.12	0.01	0.00	0.00
7 - 8	0.00	0.04	0.30	0.69	1.09	1.34	1.46	0.95	0.55	0.14	0.04	0.00
8 - 9	0.08	0.26	0.90	1.44	2.01	2.29	2.67	1.97	1.30	0.49	0.24	0.11
9 - 10	0.27	0.62	1.51	2.29	2.82	3.15	3.92	3.10	2.16	0.99	0.56	0.36
10 - 11	0.48	1.02	2.06	2.90	3.32	3.73	4.93	3.64	2.84	1.39	0.87	0.65
11 - 12	0.70	1.26	2.37	3.22	3.23	3.91	5.36	3.84	3.13	1.62	1.06	0.84
12 - 13	0.72	1.30	2.15	3.15	3.25	3.81	5.34	3.70	3.05	1.52	1.02	0.90
13 - 14	0.60	1.15	1.86	2.72	3.00	3.34	4.73	3.41	2.63	1.26	0.80	0.70
14 - 15	0.41	0.84	1.49	2.14	2.25	2.85	3.72	2.42	1.97	0.82	0.49	0.43
15 - 16	0.21	0.47	0.91	1.41	1.67	2.03	2.56	1.66	1.21	0.36	0.20	0.18
16 - 17	0.05	0.16	0.43	0.74	0.99	1.25	1.53	0.91	0.57	0.10	0.03	0.02
17 - 18	0.00	0.02	0.12	0.26	0.44	0.58	0.71	0.39	0.18	0.01	0.00	0.00
18 - 19	0.00	0.00	0.01	0.03	0.12	0.19	0.22	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00
19 - 20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TABLA 5.
Dosis anuales de PAR, UV-A y UV-B ($GJ m^{-2}$) en los observatorios Rioja 1 (1640 m) y Rioja 2 (2140 m) en los tres años completos del periodo estudiado (1 de septiembre de 2007 a 31 de agosto de 2011), junto con las medias de los tres años y el cociente entre las medias de ambos observatorios

	2008 Rioja 1	2009 Rioja 1	2010 Rioja 1	Media Rioja 1	2008 Rioja 2	2009 Rioja 2	2010 Rioja 2	Media Rioja 2	Media Rioja 2 / Media Rioja 1
PAR	1.78	2.02	1.79	1.86	1.91	2.19	1.91	2.00	1.08
UV-A	0.19	0.24	0.22	0.22	0.24	0.28	0.23	0.25	1.14
UV-B	0.0049	0.0060	0.0051	0.0053	0.0058	0.0070	0.0059	0.0062	1.17

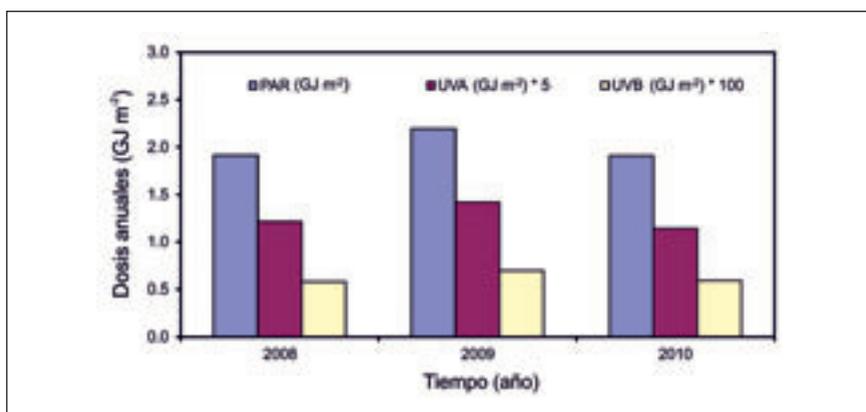


Fig. 6. Dosis anuales de PAR, UV-A y UV-B medidas en el observatorio Rioja 2 (2140 m de altitud) en los tres años completos del periodo estudiado (1 de septiembre de 2007 a 31 de agosto de 2011).

ray, para comprobar estas hipótesis. En comparación con otros observatorios, tanto españoles como del resto del mundo (Häder *et al.*, 2007b; Bilbao *et al.*, 2008, 2010), las dosis anuales de UV-B de Valdezaray superaban a las de diversas localidades del norte y centro de Europa, pero estaban por debajo de observatorios del sur de Europa como Gran Canaria (0.0103 GJ m⁻²), Atenas (0.0087), Lisboa (0.0083), Málaga (0.0080) o Valladolid (0.0070). Nuevamente, la menor nubosidad de estas localidades, todas ellas situadas a altitudes mucho más bajas que Valdezaray (entre 8 y 840 m), puede explicar estos resultados, ya que en Sierra Nevada, localizada a menor latitud (37° N) y mayor altitud (2850 m) que el observatorio Rioja 2 de Valdezaray, se registra una dosis anual de UV-B de tan sólo 0.0064 GJ m⁻² (Häder *et al.*, 2007b).

4. CONCLUSIONES

1. Se han medido las irradiancias fotosintética (PAR: 400-700 nm), ultravioleta-A (UV-A: 315-400 nm) y ultravioleta-B (UV-B: 280-315 nm) en dos observatorios situados en Valdezaray (La Rioja) a distinta altitud (Rioja 1 a 1640 m y Rioja 2 a 2140 m) desde el 1 de septiembre de 2007 hasta el 31 de agosto de 2011. Partiendo de estos datos, se han calculado las dosis diarias, mensuales y anuales de las citadas bandas espectrales.

2. Todas las variables (irradiancia y dosis de PAR, UV-A y UV-B) se correlacionaban significativamente entre sí, independientemente del observatorio, la banda espectral y el tipo de variable (irradiancia o dosis).

3. El desnivel de 500 m entre los dos observatorios se tradujo en que, en el observatorio más elevado, se recibían mayores irradiancias máximas diarias y dosis diarias de UV-B y UV-A en los meses de verano, así como mayores dosis anuales de estas bandas del espectro. Esto era debido a los no-

tables gradientes altitudinales que hemos encontrado en ambas bandas (hasta un 36% km⁻¹ en UV-B y un 30% km⁻¹ en UV-A), considerablemente superiores a la mayoría de los publicados. Así mismo, el cociente UV-B/PAR era mayor en el observatorio más elevado.

4. Las diferencias en las irradiancias máximas diarias y las dosis diarias y anuales de PAR entre ambos observatorios se atenuaban o desaparecían con respecto a las diferencias señaladas para UV-B y UV-A, por el menor gradiente altitudinal de la PAR (hasta un 20% km⁻¹).

5. Las irradiancias máximas diarias y las dosis diarias de PAR, UV-A y UV-B mostraban valores más altos en torno al solsticio de verano (meses de mayo, junio y julio) y valores más bajos alrededor del solsticio de invierno (meses de noviembre, diciembre y enero) en ambos observatorios. Los factores que determinaron estos cambios fueron principalmente la elevación solar, el fotoperiodo y la nubosidad.

6. El cociente entre las dosis diarias UV-A/PAR no mostró un patrón anual definido, dado que estas bandas del espectro no resultan afectadas por los cambios anuales en el ozono estratosférico. Sin embargo, las relaciones UV-B/PAR y UV-B/UV-A mostraron valores más altos en los meses en torno al solsticio de verano, por el menor grosor de la columna de ozono en esta época del año. Por lo tanto, en el verano no sólo se recibe más irradiancia UV-B acoplada a una mayor irradiancia solar global, sino también mayores proporciones UV-B/PAR y UV-B/UV-A.

7. En todos los meses del año, las irradiancias horarias de PAR, UV-A y UV-B eran mayores a mediodía y menores al amanecer y al atardecer, de acuerdo con los cambios diarios de la elevación solar. La incidencia de la nubosidad podía alterar este típico patrón diario.

8. En comparación con otras estaciones tanto de montaña como de tierra baja, los dos observatorios estudiados en Valdezcaray están expuestos a mayores picos de irradiancia y dosis diaria de UV-A y, especialmente, de UV-B. Sin embargo, la mayor nubosidad asociada a las zonas de montaña puede contrarrestar el gradiente altitudinal de estas longitudes de onda, por lo que las dosis anuales de UV-A y UV-B pueden ser sólo similares o incluso inferiores a las recibidas en localidades de menor altitud. En cuanto a la PAR, no sólo las dosis anuales sino también las irradiancias máximas diarias y las dosis máximas diarias pueden ser similares o inferiores en observatorios de montaña con respecto a los de tierra baja.

9. Nuestro estudio puede resultar importante en relación con la evaluación de los efectos de la radiación PAR, UV-A y UV-B sobre los ecosistemas de montaña, y con la fotoprotección de las personas involucradas en actividades laborales o de ocio en zonas de montaña. Con estos objetivos, sería recomendable continuar con las medidas de radiación, particularmente de UV, en Valdezcaray y otras zonas de La Rioja, para corroborar, sobre series más largas, las variaciones encontradas, así como para evaluar la tendencia de la radiación UV-B en las próximas décadas en relación con la degradación de ozono estratosférico.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación del Proyecto CGL2008-04450 y otros anteriores. Al Gobierno de La Rioja por los Proyectos Colabora 2008/04 y 2009/07 concedidos a Gabriel Fabón y por la Beca de FPI PRED2010/16 concedida a Laura Monforte. A Gonzalo Morras (Valdezaray S.A.) por el imprescindible mantenimiento de los sensores y su amable colaboración en todas nuestras necesidades. El presente trabajo está integrado en la Acción COST FA0906 de la Unión Europea (*UV-B radiation: a specific regulator of plant growth and food quality in a changing climate*).

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, J., De Gálvez, M.V., Conde, R., Pérez-Rodríguez, E., Viñegla, B., Abdala, R., Segovia, M., Herrera, E. y Figueroa, F.L. (2004). Series temporales de medida de radiación solar ultravioleta y fotosintética en Málaga. *Actas Dermosifiliográficas*, 95: 25-31.
- Antón, M., Cencillo, M.L., Serrano, A., Vaquero, J.M. y García, J.A. (2007). Ozone mini-hole over southwestern Spain during January 2004: Influence over ultraviolet radiation. *Geophysical Research Letters*, 34: 1-5.
- Antón, M., Serrano, A., Cencillo, M.L. y García, J.A. (2008). Relationship between erythemal irradiance and total solar irradiance in South-Western Spain. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 113, Art. No. D14208.
- Antón, M., Serrano, A., Cencillo, M.L. y García, J.A. (2009). Experimental and forecasted values of the ultraviolet index in southwestern Spain. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 114, Art. No. D05211.
- Arnáez Vadillo, J. (1980). La infraestructura ambiental de una estación de esquí: el ejemplo de Valdezaray (Rioja). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 6: 3-18.
- Aucamp, P.J. (2007). Questions and answers about the effects of the depletion of the ozone layer on humans and the environment. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 6: 319-330.
- Bilbao, J., González, P.S. y De Miguel Castrillo, A. (2008). UV-B climatology in Central Spain. *International Journal of Climatology*, 28: 1933-1941.
- Bilbao, J. y De Miguel, A. (2010). Estimation of UV-B irradiation from total global solar meteorological data in central Spain. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 115, Art. No. D00I09.
- Björn, L.O., Callaghan, T.V., Gehrke, C., Johanson, U., Sonesson, M. y Gwynn-Jones, D. (1998). The problem of ozone depletion in northern Europe. *Ambio*, 27: 275-279.
- Caldwell, M.M., Bornman, J.F., Ballaré, C.L., Flint, S.D. y Kulandaivelu, G. (2007). Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation, and in-

- teractions with other climate change factors. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 6: 252-266.
- Calow, P. (ed.) (1998). *The Encyclopedia of Ecology and Environmental Management*. Blackwell Science, Oxford, 832 p.
- Cañada, J., Esteve, A., Marín, M.J., Utrillas, M.P., Tena, F. y Martínez-Lozano, J.A. (2008). Study of erythemal, UV (A+B) and global solar radiation in Valencia (Spain). *International Journal of Climatology*, 28: 693-702.
- Engelsen, O. y Kylling, A. (2005). Fast simulation tool for ultraviolet radiation at the earth's surface. *Optical Engineering*, 44, Art. No. 041012.
- Ennis, C.A. y Marcus, N.H. (1996). *Biological consequences of global climate change*. University Science Books, Sausalito, California, 53 p.
- Foyo-Moreno, I., Vida, J. y Alados-Arboledas, L. (1998). Ground-based ultraviolet (290-385 nm) and broadband solar radiation measurements in south-eastern Spain. *International Journal of Climatology*, 18: 1389-1400.
- González-Frías, C., Martínez-Lozano, J.A., Lorente, J., Tena, F., Utrillas, M.P. y De Cabo, X. (2002). La red española de medida de radiación ultravioleta B. *Revista Española de Física*, 16: 18-23.
- Gutiérrez-Marco, E., Hernández, E., Camacho, J.L. y Labajo, A. (2007). Analysis of UVB values in the centre of the Iberian Peninsula. *Atmospheric Research*, 84: 345-352.
- Häder, D.P., Kumar, H.D., Smith, R.C. y Worrest, R.C. (2007a). Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 6: 267-285.
- Häder, D.P., Lebert, M., Schuster, M., Del Campo, L., Helbling, E.W. y McKenzie, R. (2007b). ELDONET - A decade of monitoring solar radiation on five continents. *Photochemistry and Photobiology*, 83: 1348-1357.
- Hegglin, M.I. y Shepherd, T.G. (2009). Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux. *Nature Geoscience*, 2: 687-691.
- Lorente, J., De Cabo, X., Campmany, E., Sola, Y., González, J.A., Calbó, J., Badosa, J., Alados-Arboledas, L., Martínez-Lozano, J.A., Cachorro, V., Labajo, A., De la Morena, B., Díaz, J.P., Pujadas, M., Horvath, H., Silva, A.M. y Pavese, G. (2006). Altitude effect on UV index deduced from the VELETA-2002 experimental campaign (Spain). En: *International Radiation Symposium IRS 2004: Current Problems in Atmospheric Radiation* (Fischer, H., Sohn, B.J., eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 1-4.
- Martínez-Lozano, J.A., Tena, F. y Utrillas, P. (1996). Measurement and analysis of ultraviolet solar irradiation in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology*, 16: 947-955.
- McKenzie, R.L., Björn, L.O., Bais, A. y Ilyasd, M. (2003). Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2: 5-15.

- McKenzie, R.L., Aucamp, P.J., Bais, A.F., Björn, L.O. y Hyas, M. (2007). Changes in biologically-active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 6: 218-231.
- Molina, J.M. y Rowland, F.S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249: 810-812.
- Norval, M., Cullen, A.P., De Gruijl, F.R., Longstreth, J., Takizawa, Y., Lucas, R.M., Noonan, F.P. y Van der Leun, J.C. (2007). The effects on human health from stratospheric ozone depletion and its interactions with climate change. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 6: 232-251.
- Núñez-Olivera, E. y Martínez-Abaigar, J. (1991). *El clima de La Rioja. Análisis estadístico de precipitaciones y temperaturas*. Gobierno de La Rioja. Consejería de Agricultura y Alimentación, Logroño, 323 pp.
- Núñez-Olivera, E., Otero, S., Tomás, R. y Martínez-Abaigar, J. (2009). Seasonal variations in UV-absorbing compounds and physiological characteristics in the aquatic liverwort *Jungermannia exsertifolia* subsp. *cordifolia* over a three-year period. *Physiologia Plantarum*, 136: 73-85.
- Renaud, A., Staehelin, J., Fröhlich, C., Philipona, R. y Heimo, A. (2000). Influence of snow and clouds on erythemal UV radiation: analysis of Swiss measurements and comparison with models. *Journal of Geophysical Research*, 105: 4961-4969.
- Seckmeyer, G., Pissulla, D., Glandorf, M., Henriques, D., Johnsen, B., Webb, A., Siani, A.M., Bais, A., Kjeldstad, B., Brogniez, C., Lenoble, J., Gardiner, B., Kirsch, P., Koskela, T., Kaurola, J., Uhlmann, B., Slaper, H., Den Outer, P., Janouch, M., Werle, P., Grobner, J., Mayer, B., De la Casiniere, A., Simic, S. y Carvalho, F. (2008). Variability of UV irradiance in Europe. *Photochemistry and Photobiology*, 84: 172-179.
- Sivamani, R.K., Crane, L.A. y Dellavalle, R.P. (2009). The Benefits and Risks of Ultraviolet Tanning and Its Alternatives: The Role of Prudent Sun Exposure. *Dermatologic Clinics*, 27: 149-154.
- Sola, Y., Lorente, J., Campmany, E., De Cabo, X., Bech, J., Redaño, A., Martínez-Lozano, J.A., Utrillas, M.P., Alados-Arboledas, L., Olmo, F.J., Díaz, J.P., Expósito, F.J., Cachorro, V., Sorribas, M., Labajo, A., Vilaplana, J.M., Silva, A.M. y Badosa, J. (2008). Altitude effect in UV radiation during the evaluation of the effects of elevation and aerosols on the Ultraviolet Radiation 2002 (VELETA-2002) field campaign. *Journal of Geophysical Research*, 113, Art. No. D23202.
- Tarasick, D.W., Fioletov, V.E., Wardle, D.I., Kerr, J.B., McArthur, L.J.B. y McLinden, C.A. (2003). Climatology and trends of surface UV radiation. *Atmosphere - Ocean*, 41: 121-138.
- Vanicek, K., Frei, T., Litynska, Z. y Schmalwieser, A. (1999). *UV-Index for the public. A guide for publication and interpretation of solar UV Index forecasts for the public prepared by the Working Group 4 of the COST-713 Action "UV-B Forecasting"*. European Union, Brussels, 40 p.



ZUBÍA

23



Gobierno de La Rioja
www.larioja.org



**Instituto
de Estudios
Riojanos**