

RELACIÓN TRANSMISIVIDAD UV-OZONO DURANTE DÍAS DESPEJADOS EN BADAJOZ (ESPAÑA)

M. Antón, A. Serrano, M.L. Cancillo y J.A. García

Dpto. de Física, Universidad de Extremadura

Avda. de Elvas s/n, 06071 Badajoz, España

Tel: (+34) 924289536

Fax: (+34) 924289651

mananton@unex.es, asp@unex.es, mcf@unex.es, agustin@unex.es

Resumen

De todo el espectro radiativo, tiene un interés particular el estudio de la radiación ultravioleta, debido, principalmente, a los efectos perjudiciales que puede causar sobre la salud humana. En los últimos años se ha observado un notable incremento en el flujo de radiación que llega a la superficie terrestre, motivado por el descenso en las cantidades de ozono estratosférico.

El objetivo de este trabajo es analizar, mediante el Factor de Amplificación de Radiación (RAF), la relación entre las variaciones de la radiación ultravioleta eritemática (UVER) y la cantidad de ozono medida en Badajoz. El periodo de medidas se extiende desde el 1 de febrero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2002. El RAF estimado para Badajoz es 1.337 ± 0.008 cuando se consideran los 138 días despejados de los que consta la serie.

Abstract

Among all wavelengths, it is of particular interest the study of ultraviolet solar radiation mainly due to the serious damage it can cause to the human health. In recent years it has been observed an important increasing of the UV radiation flux reaching the earth's surface due to, mainly, stratospheric ozone depletion.

This work is aimed at analysing by means of the Radiation Amplification Factor (RAF) the relationship between the variation of ultraviolet erythemal radiation (UVER) and the ozone amount measured at Badajoz. The period of measurements ranges from 1 February 2001 until 31 December 2002. The RAF estimated for Badajoz is 1.337 ± 0.008 when only data for the selected 138 clear days are considered.

Palabras claves

Radiación ultravioleta, factor de amplificación de radiación, ozono, TOMS

Key words

Ultraviolet radiation, radiation amplification factor, ozone, TOMS

1. INTRODUCCIÓN

De todo el espectro radiativo, tiene un interés especial la región ultravioleta (100-400 nm), ya que, aunque representa únicamente el 8% de la radiación solar (Iqbal, 1983), posee efectos muy dañinos sobre la salud humana, principalmente en la piel, vista y sistema inmunológico (Diffey, 1991; Madronich y Grujil, 1993). Así, en la piel, la exposición durante un corto, pero intenso periodo de tiempo a la radiación UV está estrechamente relacionada con diferentes efectos, como el característico bronceado o la quemadura solar. Además, la acumulación de esta radiación a lo largo de los años podría provocar la aparición de enfermedades graves, como el cáncer de piel. Entre los efectos perjudiciales

que la mencionada radiación puede llegar a causar sobre la vista están la fotoqueratitis, cataratas o degeneración en la mácula. En cuanto al sistema inmunológico, una excesiva exposición a los rayos UV podría inducir un descenso en la respuesta de dicho sistema. A parte de los efectos perjudiciales anteriormente mencionados, la radiación UV también es responsable de distintos efectos negativos en otros sistemas biológicos, como plantas, organismos acuáticos y microorganismos (Diffey, 1991).

Los efectos dañinos anteriormente mencionados, están aumentando considerablemente. Así, por ejemplo, desde 1981, el número de casos de melanoma (cáncer maligno) ha aumentado un 3% cada año (ASC, 2002).

Por otra parte, es un hecho contrastado el incremento de la cantidad de radiación UV que incide sobre la superficie terrestre (Madronich et al.,1998) debido, principalmente, al descenso en la cantidad de ozono estratosférico. Por ello, en la actualidad y a escala mundial existe un creciente interés en realizar medidas simultáneas de estas dos variables.

El objetivo del presente trabajo es analizar y cuantificar para, los años 2001 y 2002, la relación existente entre las medidas de transmisividad de radiación UV eritemática (UVER) medida en Badajoz y las estimaciones de ozono estratosférico realizadas por el instrumento satelital TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) para días totalmente despejados. Este estudio se lleva a cabo mediante cierta variable, introducida por Mackenzie et al. (1991), llamado Factor de Amplificación de Radiación (en inglés, Radiation Amplification Factor, RAF).

Inicialmente se describe la variación que experimentan, tanto la radiación UV como la cantidad de ozono en Badajoz para el periodo de estudio. Posteriormente, se calculan los valores del RAF siguiendo la expresión potencial propuesta por Madronich (1993). Finalmente, se propone un estudio mensual del factor estudiado, para analizar las posibles variaciones estacionales que pudiera presentar.

2. DATOS

El grupo de trabajo de Física de la Atmósfera del Departamento de Física de la Universidad de Extremadura (UEX) cuenta con tres estaciones de medida que registran valores simultáneos de radiación ultravioleta. Los emplazamientos de estas estaciones son: Badajoz, Cáceres y Plasencia, formando la red regional de medida de radiación solar en Extremadura, que en un futuro se espera incrementar con nuevas estaciones e instrumentos.

En Badajoz, los radiómetros están ubicados en la terraza del Departamento de Física de la UEX, en el campus universitario (38.99°N, 7.01°W, altitud=199 m) y registran valores de irradiancia ultravioleta desde febrero de 2001. En el presente trabajo se estudia la serie de datos que abarca desde el 1 de febrero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2002. Hay dos periodos en los que no se disponen de datos, pues los radiómetros participaron en sendas campañas de intercomparación. El primer periodo se extiende entre el 17 de septiembre y el 1 de octubre de 2001, y el segundo entre el 7 de noviembre y el 19 de diciembre de 2002.

La radiación UV eritemática (UVER) se mide mediante un radiómetro UV de banda ancha (UV-S-E-T, de la firma Scintec). La respuesta espectral de este instrumento es similar al espectro de acción eritemática estandarizado por el CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) (MacKinlay y Diffey,1987). El sistema de adquisición de datos mide cada 10 segundos, almacenando los promedios cada minuto (en milivoltios). Aplicando el coeficiente de calibración obtenido en la intercomparación con un espectrofotómetro Brewer, realizada en el INTA (El Arenosillo, Huelva) (Cancillo et al.,2002) esos valores de salida se convierten a valores UVER (en mW/m^2).

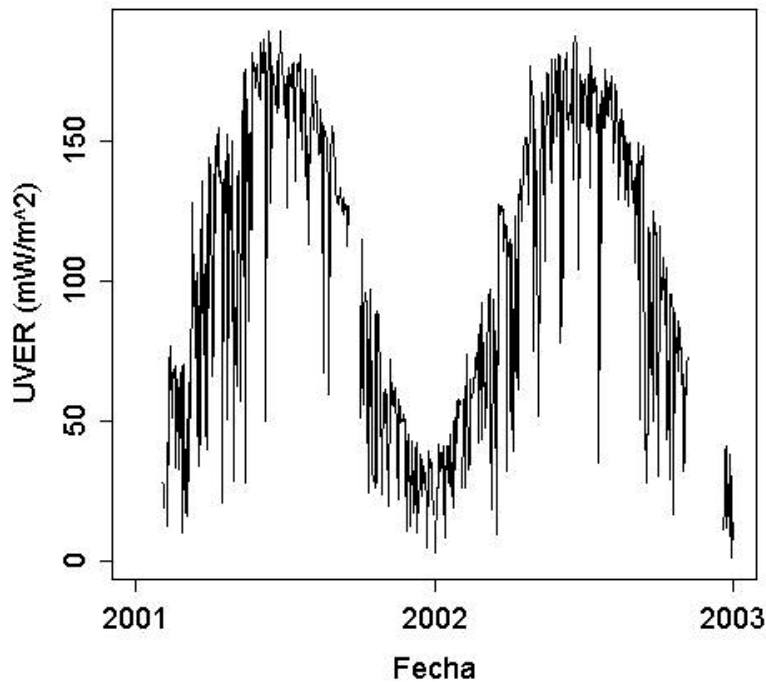
En nuestro estudio hemos considerado valores medios de radiación correspondientes a un intervalo de 10 minutos en torno al instante en que el satélite Earth-Probe pasa por la

vertical de Badajoz (11:40 UTC). Esto garantiza que nuestra medida en superficie sea representativa de las condiciones de nubosidad y ozono existentes en el momento de paso del satélite.

Por otra parte, el instrumento TOMS se encuentra a bordo del satélite Earth-Probe, el cual fue lanzado al espacio hasta una altura de 500 kilómetros el 16 de julio de 1996. A partir del 12 de Diciembre de 1997 el satélite se encuentra a una altura de 750 kilómetros.

Este instrumento satelital estima valores diarios de cantidad de ozono estratosférico en unidades Dobson, con una resolución de 1° de latitud x 1.25° de longitud.

Figura 1: Valores medios sobre intervalo de 10 minutos de UVER (para el periodo de estudio).



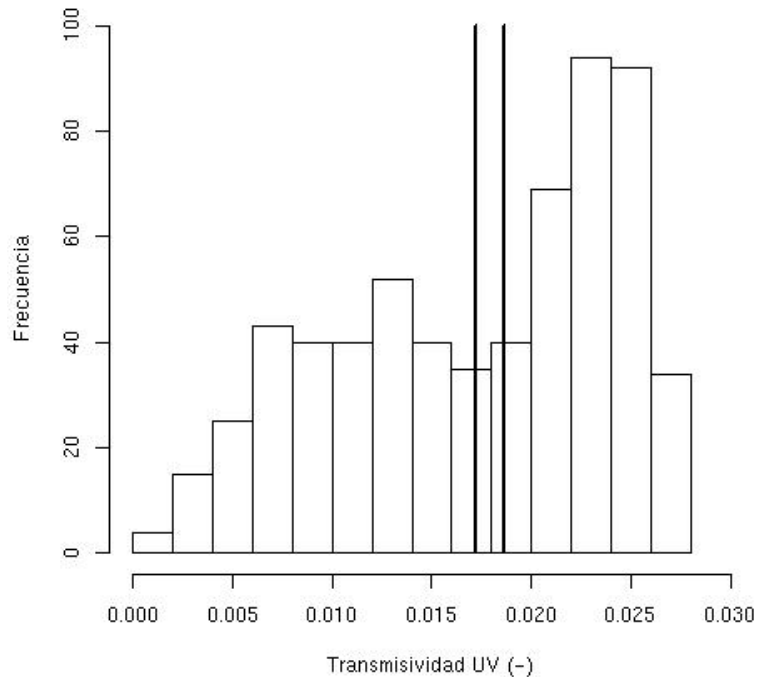
3. ANÁLISIS

Inicialmente se analiza la evolución temporal que experimentan las dos variables que se emplearán en el estudio del Factor de Amplificación de Radiación. Así, la figura 1 muestra la evolución de los valores medios de 10 minutos de UVER en torno al instante en que el satélite paso por la vertical de Badajoz (11:40 UTC). Se observa que la envolvente de dicha evolución se ajusta a una función senoidal determinada, principalmente, por el ciclo anual de la declinación del Sol. Los descensos bruscos son atribuibles a la nubosidad.

Además de la evolución temporal, resulta de gran interés el estudio de la frecuencia de valores. De este modo, en la figura 2 se muestra el histograma de los valores de frecuencia de transmisividad UV correspondientes a nuestro periodo de estudio. Los valores oscilan entre 0 y 0.03. Se observa que la distribución empírica de frecuencias muestra la existencia de dos situaciones claramente distintas: una correspondiente a casos despejados y la otra a situaciones nubosas. Un posible umbral que distingue estas condiciones podría situarse en torno a un valor de transmisividad igual a 0.020. Los valores de esta variable para los casos despejados se restringen a un pequeño intervalo entre 0.020 y 0.028, teniendo altas frecuencias, alrededor del 15% de los casos totales. Por el contrario, las situaciones nubosas presentan un amplio rango de transmisividades, correspondientes a diferentes grados de

nubosidad. Mediante dos líneas verticales se ha representado la mediana y la media. Ambos estadísticos difieren poco, siendo la mediana superior a la media.

Figura 2. Histograma de valores de UVER medidos sobre intervalo de 10 minutos (del 1 de febrero de 2001 al 31 de diciembre de 2002).



En el estudio de la evolución que experimentan los valores de ozono estratosférico estimados por el TOMS (figura 3), se puede observar cómo siguen una evolución anual con máximos en primavera y mínimos en otoño.

Por otra parte, en la figura 4, se muestra el histograma de valores diarios estimados por el TOMS correspondientes a nuestro periodo de estudio. Los valores oscilan entre 225 DU y 475 DU. Mediante dos líneas verticales se ha representado la mediana y la media. Ambos estadísticos no difieren prácticamente, siendo la mediana inferior a la media. La figura 4 sugiere que la función de distribución de frecuencias de ozono es acampanada, unimodal (con moda entre 300 y 320 DU, es decir, en este intervalo se encuentran los valores que se repiten con mayor frecuencia) y asimétrica positiva (cola de valores a la derecha).

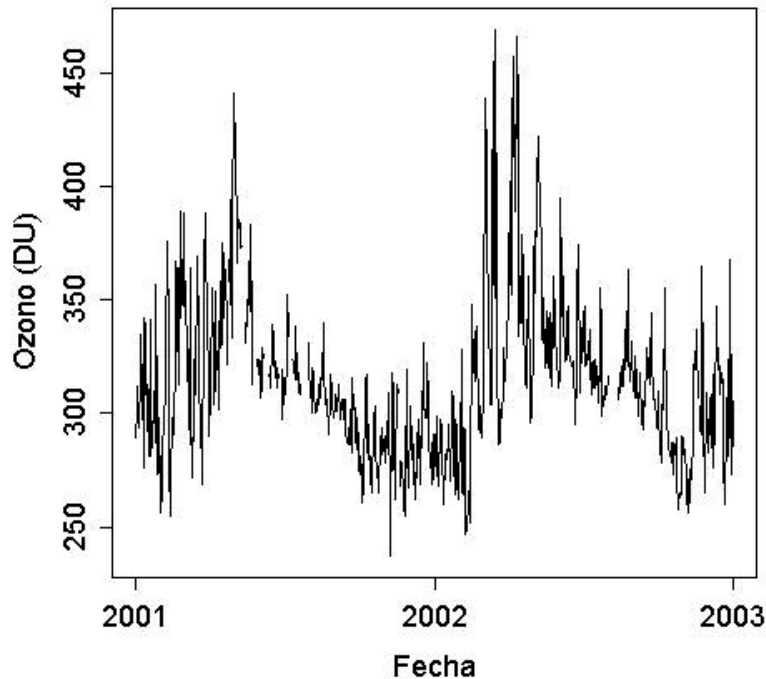
Una vez analizadas las dos variables que se desean relacionar pasamos a definir el parámetro de estudio, conocido como Factor de Amplificación de Radiación (RAF). Este fue introducido originalmente por McKenzie et al. en 1991 y se define como la razón entre las diferencias relativas de irradiancia UV y de cantidad de ozono para un mismo periodo. Este parámetro estima el aumento en la irradiancia UV que produce el descenso de la cantidad de ozono estratosférico en la radiación UV. Se denomina de “amplificación” porque, normalmente, es mayor que la unidad, es decir, descensos del 1% en la cantidad de ozono provocan aumentos superiores al 1% en la irradiancia UV incidente en la superficie terrestre.

Cuando las variaciones que presenta el ozono son importantes la relación entre la irradiancia UV y el ozono deja de ser lineal, proponiéndose la siguiente expresión para determinar el RAF (Madronich, 1993):

$$E / E^* = (O_3 / O_3^*)^{-RAF} \quad (1)$$

Donde por una parte, E y O_3 son medidas simultáneas de irradiancia UV y ozono, y por otra, E^* y O_3^* son medidas de esas mismas variables para otro momento del periodo de estudio.

Figura 3. Evolución del ozono estratosférico estimado por el TOMS para el periodo de estudio.



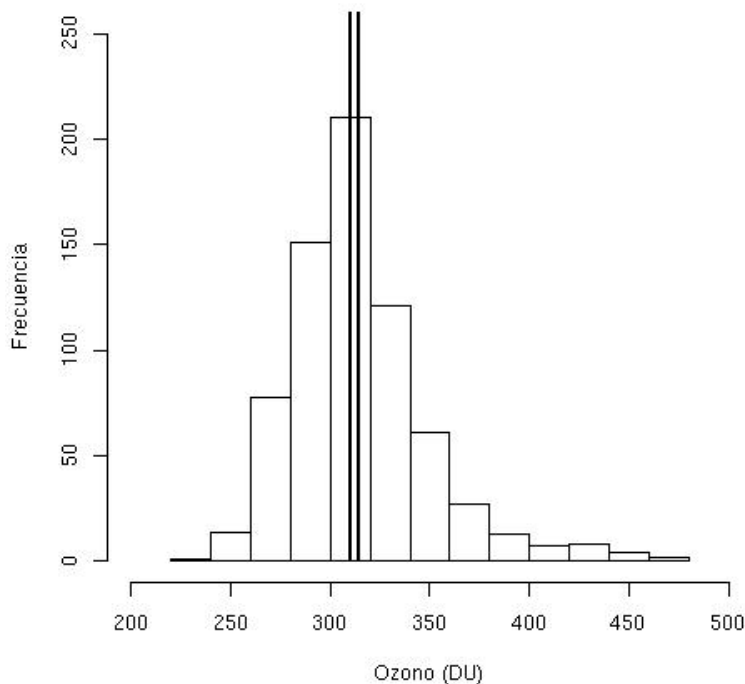
Debido a la importante atenuación que provoca la nubosidad sobre la radiación UV medida en superficie (figura 1), consideraremos, para nuestro estudio, aquellos casos totalmente despejados. Para ello, se ha tomado el valor de reflectividad planetaria estimado por el TOMS, eligiendo como totalmente despejados aquellos casos en los que dicha reflectividad es menor del 5%. El número de días seleccionados es 138.

En el presente trabajo se considera un único valor diario de ozono estratosférico e irradiancia UV, es decir, a cada pareja de datos ozono-irradiancia le corresponde un ángulo cenital diferente. Por tanto, una vez seleccionados los días totalmente despejados, debemos eliminar el efecto de los factores geométricos, para poder, así, estimar el efecto de la variación de ozono en la irradiancia UV sin la perturbación de ningún otro factor. Para ello, consideraremos la siguiente expresión modificada del RAF:

$$\tau / \tau^* = (B / B^*)^{-RAF} \quad (2)$$

Donde τ y τ^* son transmisividades UV, es decir, el cociente entre la radiación UV eritemática y la radiación UV eritemática extraterrestre para el mismo periodo, y B y B^* representan las masas ópticas absolutas de ozono.

Figura 4. Histograma de valores de ozono estratosférico estimados por el TOMS (del 1 de febrero de 2001 al 31 de diciembre de 2002).



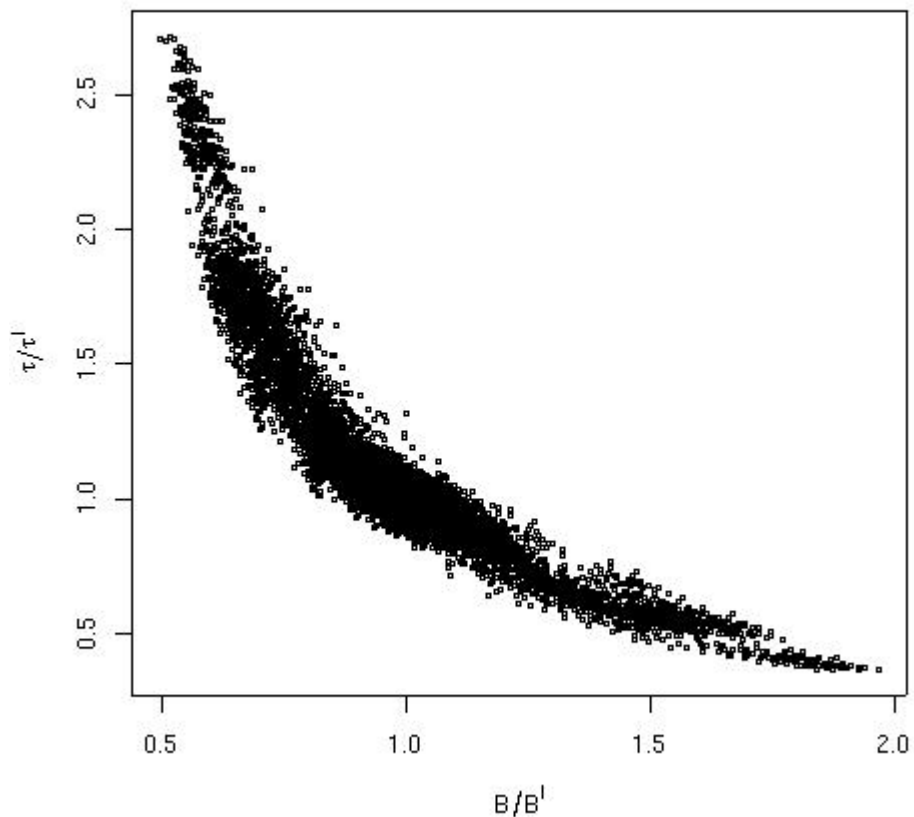
Para el cálculo del RAF, se consideran los casos totalmente despejados correspondientes a nuestro periodo de estudio. Así, con el fin de obtener una buena estimación de este parámetro se consideran todas las posibles combinaciones diferentes, tanto de transmisividad como de masa óptica absoluta de ozono, de dos días sin repetir. Con este método, se obtienen un total de 10085 pares de puntos para realizar la correlación lineal propuesta.

En la figura 5 representamos el cociente de la transmisividad UV frente al cociente de la masa total óptica de ozono. Se observa una dependencia claramente no lineal entre las variables. Este resultado corrobora la necesidad de aplicar la ley potencial anteriormente propuesta en la ecuación 2. Esto es debido a que cuando los descensos en la cantidad de ozono son elevados, la relación entre los cocientes deja de ser lineal (Madronich, 1993). En este trabajo las diferencias relativas máximas entre valores de ozono de distintos días son superiores al 100%. Así, para obtener una buena estimación del RAF se propone la siguiente relación derivada de la ley potencial expresada en la ecuación 2,

$$RAF = - \frac{\ln(\tau)}{\ln(B)} \quad (3)$$

Donde $\ln(\tau)$ es la diferencia entre los logaritmos de las transmisividades de dos días y $\ln(B)$ es la diferencia entre los logaritmos de los espesores ópticos correspondientes a esos mismos días.

Fig. 5 Relación potencial entre los cocientes de la masa óptica total de ozono y la transmisividad atmosférica para UVER

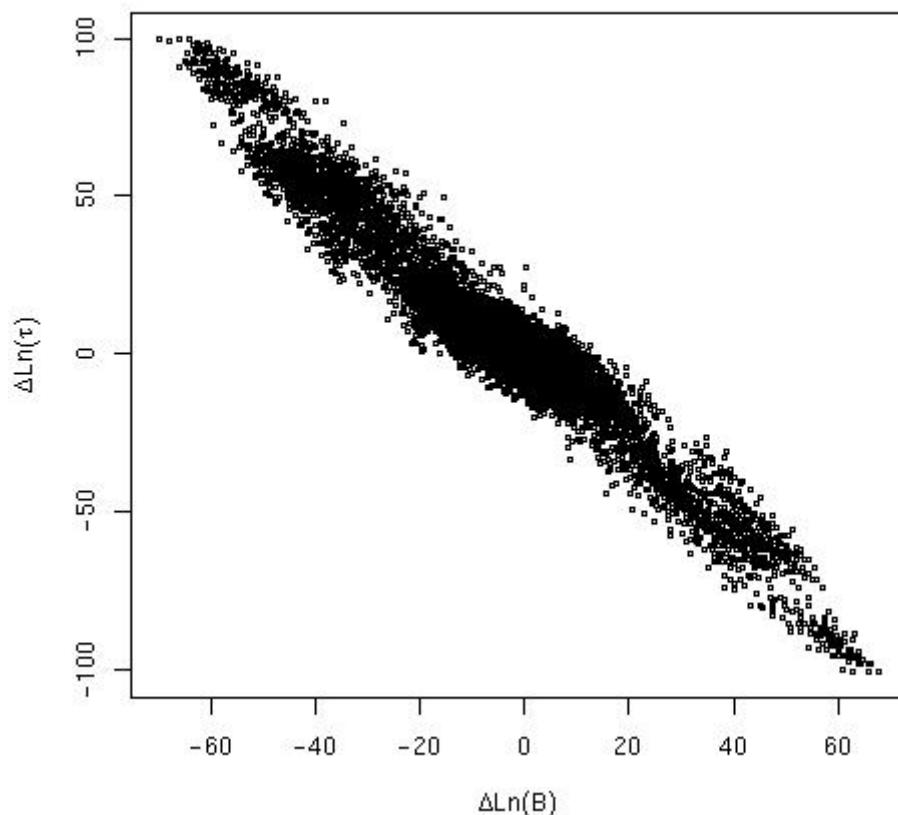


En la figura 6 se encuentra la representación de dicha relación. La pendiente de la recta de ajuste es el RAF, con un valor de 1.337 ± 0.003 , siendo 0.003 el error estándar. El coeficiente de correlación es $r^2 = 0.94$.

Podemos interpretar el significado físico del Factor de Amplificación de radiación en el sentido que, para Badajoz y durante los años 2001 y 2002, cuando la cantidad de ozono estratosférico descendió un 1%, la radiación UV eritemática se incrementó en un 1.34%. Este valor estimado está próximo al calculado para otras estaciones (Madronich et al., 1998). Es conocido que importantes fluctuaciones de ozono predominan en diferentes épocas del año. Esto sugiere la realización de un estudio mensual del RAF, con la intención de detectar posibles ciclos estacionales.

En la tabla 1 presentamos los valores mensuales del RAF, obtenidos mediante la ecuación 3, junto con el número de días totalmente despejados y el número de pares de valores que se han utilizado en la correlación después de seleccionar aquellos que cumplen que, a una disminución de ozono le corresponde un aumento de la radiación y viceversa. Para los meses de enero, octubre y diciembre no se calcula el RAF debido al bajo número de días totalmente despejados que se dispone durante estos meses.

Fig. 6 Correlación lineal entre la diferencia del log. de la masa total óptica de ozono y la diferencia del log. de la transmisividad UV eritemática.



En la tabla 1 se observa que el RAF presenta importantes fluctuaciones mensuales variando entre 0.61 ± 0.03 (mayo) y 1.3 ± 0.3 (septiembre). Una posible explicación a esta variación está en los ciclos anuales, que presentan tanto ozono como radiación UV. Es de reseñar que los valores del factor calculados mes a mes son sensiblemente inferiores al valor obtenido para todo el periodo de medida (1.337 ± 0.003). Este hecho podría atribuirse a las bajas fluctuaciones en el contenido de ozono y, por tanto de irradiancia UV durante los días analizados correspondientes a un mismo mes.

3. CONCLUSIONES

En el análisis de la relación entre la transmisividad UV eritemática y el ozono estratosférico medido en Badajoz para el periodo comprendido entre febrero de 2001 y diciembre de 2002 se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. La distribución de frecuencias de la transmisividad UV eritemática medida en torno a la hora de pasada del satélite Earth-Probe por la vertical Badajoz, presenta dos claras situaciones: casos despejados y casos nublados.
2. La distribución de frecuencias para el ozono estratosférico estimado mediante el instrumento satelital TOMS es unimodal, con la mayoría de los valores en el intervalo 300-320 DU.
3. La expresión potencial propuesta resulta adecuada para la descripción de la variación de radiación UV como función del ozono. El valor del RAF estimado durante el periodo comprendido entre los años 2001 y 2002 fue de 1.337 ± 0.003 . Por tanto, de los resultados de este trabajo se desprende la importancia que adquiere la medida y monitorización de la radiación UV.

4. El factor estudiado presenta notables fluctuaciones mensuales, atribuibles a los ciclos anuales que tienen, tanto el ozono como la radiación UV. Además se constató que el valor para cada uno de los meses del año es sensiblemente inferior al valor estimado para todo el periodo de estudio. Este hecho es debido a que las variaciones de ozono durante los días correspondientes a un mismo mes son normalmente inferiores que las obtenidas para todo el periodo. Estas variaciones mensuales deberán ser corroboradas para series que cubran periodos temporales más largos.

Tabla I Valores de Factor de Amplificación para los meses del año

MES	RAF	DIAS DESPEJADOS	DATOS CORRELACION
Enero	-----	4	1
Febrero	0.95±0.09	10	45
Marzo	1.02±0.04	15	120
Abril	0.82±0.03	23	210
Mayo	0.61±0.03	21	136
Junio	0.76±0.05	42	630
Julio	0.81±0.06	42	666
Agosto	0.75±0.06	38	378
Septiembre	1.3±0.3	9	28
Octubre	-----	2	3
Noviembre	1.04±0.13	9	21
Diciembre	-----	4	6

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación REN2002-04558-C04-03/CLI (CICYT), concedido por el MCyT.

Los autores agradecen al equipo de trabajo del TOMS en NASA Goddard Space Flight Center por proporcionar los datos satelitales empleados en este estudio.

D. Manuel Antón Martínez agradece al MECD la concesión de una beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU) con expediente AP2001-0845

REFERENCIAS

ASC (2002). Cancer Facts and Figures. Technical report, American Cancer Society. Atlanta (USA)

Cancillo, M.L., Garcia, J.A., y Vilaplana, J.M. (2002). Comparacion de medidas de piranómetros de UV y espectrofotometro Brewer, En libro de resúmenes de la III Asamblea Hispano-portuguesa de Geodesia y Geofísica (Valencia)

CIE (1987). Technical Report 17.4, Commission Internationale de l'Eclair

Diffey, B.L.(1991) Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. Physics in Medicine and Biology, 36(3):299-328

Iqbal, M. (1983). An Introduction Solar Radiation. Academic Press Canadá

Madronich, S., McKenzie, R.L., Bjorn, L.O. y Caldwell, M.M. (1998). Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 46:5-19

Madronich, S. y Grujil, F.R. (1993). Skin Cancer and UV Radiation. Nature, 366:23

Madronich, S. (1993) The atmosphere and UV-B radiation at ground level en Environmental UV Photobiology, editado por A. R. Young et al., plenum Press, New york, 1-39.

McKenzie, R.L., Matthews, W.A. and Johnston, P.V. (1991). The relationship between erythemal UV and ozone, derived from spectral irradiance measurements. Geophys. Res. Lett., 18:2269-2272

McKinlay, A.F. y Diffey, B.L. (1987). A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human sky. CIE Journal, 6:21-27