

ANÁLISIS DE LA IRRADIANCIA ERITEMÁTICA: DATOS EXPERIMENTALES Y RELACIÓN CON EL CONTENIDO TOTAL DE OZONO

A.Calle, A.M. Pérez, J.L. Casanova y A. Romo
Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid.
Dpto. Física Aplicada I. Facultad de Ciencias.
47071-Valladolid
e-mail: abel@latuv.uva.es

INTRODUCCIÓN

Los efectos biológicos producidos por la exposición a la radiación solar abarcan todo el espectro; sin embargo, es el espectro solar ultravioleta el que entraña cierto riesgo por los efectos negativos que produce en la mayor parte de los seres vivos (Leffell et al., 1996; Hoppe et al., 1996). Dosis superiores a las consideradas como normales, producen graves daños en los sistemas vegetales por la alteración de sus funciones clorofílicas. Los efectos más amplios son las disminuciones de cosechas y fitoplacton marino. En lo que se refiere a los animales, los daños producidos afectan a diversos órganos principalmente por la aparición de patologías oculares y pérdida del sistema inmunológico. En el caso de los seres humanos también se manifiestan en numerosas disfunciones de la piel, siendo la más grave el melanoma cancerígeno. Una sobreexposición a este tipo de radiación provoca también graves alteraciones en el ADN genético. Estas alteraciones humanas dependen, fundamentalmente, de las características del individuo, de forma que cualquier estudio de riesgo de exposición será incompleto si no se consideran estos factores. Por ello es fundamental la introducción de un Índice de radiación para cada individuo que englobe las condiciones físicas de la radiación y el tipo biológico a que pertenece, lo que se denomina *fototipo* y del que se hablará posteriormente. Este riesgo a la sobreexposición de la radiación se ve incrementado de forma importante en los últimos años por el continuado descenso de los niveles de concentración del espesor total de ozono en la estratosfera (Stolarsky et al., 1991; Stolarsky et al., 1992; Heran et al., 1993; Varotsos et al., 1993), que constituye el principal filtro a la radiación ultravioleta.

1. LA IRRADIANCIA ERITEMÁTICA

Los efectos biológicos de la radiación, dentro del intervalo espectral ultravioleta, presentan una drástica dependencia con la longitud de onda. El intervalo espectral corresponde a la longitud de onda $\lambda=[280 \text{ nm}, 400 \text{ nm}]$, ya que las longitudes de onda inferiores son absorbidas. Sin embargo, la influencia de la radiación en este intervalo está modulada por un coeficiente denominado

coeficiente de acción eritemática que fue establecido por McKinlay and Diffey (1987). Este coeficiente espectral, $\epsilon(\lambda)$, que caracteriza el efecto de eritema, es máximo a partir de los $0.280 \mu\text{m}$ y va decreciendo a medida que aumenta la longitud de onda. Así, el poder eritemático total de la radiación se define mediante la integral de irradiancia espectral total ponderada por el coeficiente de acción eritemático. Esto se expresa como:

$$E_{\text{eritem}} = \int E(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda) d\lambda$$

donde E_{eritem} es la irradiancia eritemática y $E(\lambda)$ es la irradiancia solar a la longitud de onda λ a nivel de la superficie. La figura 1 representa el coeficiente de acción eritemática en una gráfica de escala logarítmica.

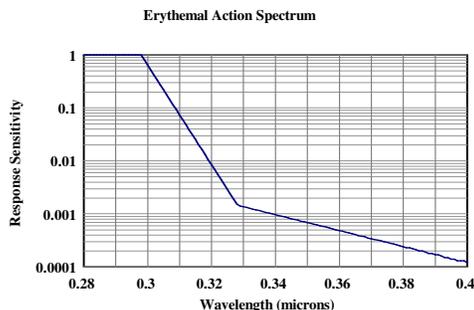


Figura 1. Gráfica logarítmica del coeficiente de acción eritemática (McKinlay and Diffey, 1987)

Dado que los efectos producidos por la radiación solar se manifiestan con posterioridad a la exposición, éstos tienen un efecto acumulativo, por lo que hay que introducir el tiempo de exposición. Para ello, se define la MED (*Dosis Eritemática Mínima*) como la mínima irradiancia necesaria para producir enrojecimiento en la piel, tras un determinado tiempo de exposición a la radiación. A pesar de que el enrojecimiento se produce antes en personas con escasa pigmentación en la piel que en otras con piel más oscura (o sea, depende del fototipo de piel del individuo), se toma como unidad de referencia individuos con piel blanca

ligeramente pigmentada. Para este fototipo, que se corresponde con el típico individuo centroeuropeo, la dosis eritemática mínima de exposición tiene el valor de: $1 \text{ MED} = 21 \text{ mJ/cm}^2 = 210 \text{ J/m}^2$

2. MEDIDA EXPERIMENTAL DE LA IRRADIANCIA ERITEMÁTICA

El Centro de *Investigación de la Baja Atmósfera* (CIBA), cuyo mantenimiento y control corresponde al Dpto. de Física Aplicada I, de la Universidad de Valladolid, dispone, desde el verano de 1995, de una estación de medida de la irradiancia eritemática. Los datos obtenidos por la estación han sido utilizados para el control y seguimiento de los valores alcanzados en las distintas épocas del año, en primer lugar, y para la puesta a punto de un *modelo monocapa* que permita extender los cálculos y la elaboración de un índice ultravioleta al resto del territorio de la península Ibérica. El emplazamiento de medida del CIBA cumple unas condiciones ambientales que se asemejan a las de una gran parte del territorio peninsular, con un clima de tipo mediterráneo con rasgos continentales (Terán *et al.*, 1987). Está situado en un paraje rural cuyas coordenadas geográficas son:

Latitud: $41^\circ 48' 36'' \text{ N}$

Longitud: $04^\circ 56' 06'' \text{ W}$

Altura sobre el nivel del mar: 840 metros.

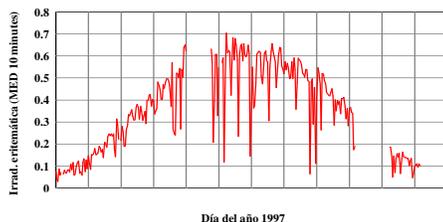
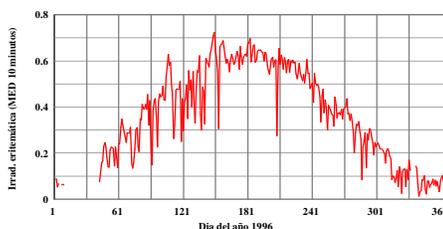
2.1 Características del equipo de medición

La irradiancia eritemática ha sido registrada por un medidor de radiación ultravioleta (BIOMETER-501). Se trata de un radiómetro de banda ancha cuya función de respuesta es prácticamente coincidente con la curva de acción eritemática propuesta por Mckinlay and Diffey (1987) ya descrita. Es un radiómetro creado a partir de una versión mejorada del medidor UV desarrollado en los años 70 por Robertson y Berger, en la Universidad de Temple (USA) que fue el primero de una red global de radiación ultravioleta operativa desde 1973. Su funcionamiento es continuo desde el verano de 1995, en que se efectuó la primera calibración en el observatorio de Izaña situado en las Islas Canarias. Su conexión a un ordenador permite registrar las medidas efectuadas en intervalos de 10 minutos. El radiómetro tiene un rango de lectura en MED's en el intervalo $[0,9.99]$ con una resolución de 0.01 MED/hora.

La adecuada localización del radiómetro asegura la obtención de las medidas en ausencia de cualquier tipo de gases contaminantes asemejándose lo más posible a las condiciones de cielo claro, exceptuando la perturbación producida por la presencia esporádica de nubes.

2.2. Análisis de los datos

La curva de evolución diaria de los valores de irradiancia eritemática es coincidente, salvo un factor de escala, a la curva diaria de la altura solar, alcanzando el valor máximo en torno a las 12:00 GMT. Esto es evidente ya que el ángulo cenital solar es la magnitud más determinante de los valores alcanzados por la irradiancia eritemática. Por esta razón el análisis más importante de los datos de irradiancia eritemática aportados por el radiómetro corresponde a los valores máximos diarios.



Figuras 2 y 3. Irradiación eritemática máxima diaria experimental en el año 1996 y 1997

Las figuras 2 y 3 contienen las gráficas de los valores máximos diarios de la irradiancia eritemática correspondiente a los años 1996 y 1997 respectivamente. Los valores están en unidades de MED en 10 minutos de exposición. Como puede apreciarse, la envolvente de la curva anual es paralela a la evolución de la altura solar anual. Las caídas "bruscas" de los valores de irradiancia corresponden a días nubosos, en los que la cobertura de nubes reduce los valores de irradiancia. Esta circunstancia, a pesar de ser característica en los días de primavera (por causas climatológicas), ha aparecido con cierta asiduidad a lo largo del verano del año 1997. Los valores más altos de irradiancia eritemática se han producido, en el año 1996, a finales del mes de mayo y comienzos del mes de junio, alcanzando un valor

máximo de 0.723 MED el día 29 de mayo a las 12:20 tiempo GMT. En lo que respecta al año 1997, los valores más elevados se han producido a mediados del mes de junio (más en consonancia con la altura solar que en el caso anterior) alcanzándose la cota de 0.705 MED el día 6 de junio a las 12:00 GMT.

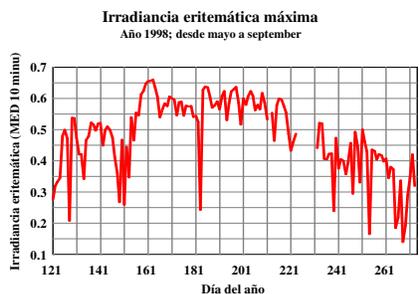


Figura 4. Irradiancia eritemática máxima diaria experimental en el año 1998. Período Mayo-Septiembre

La figura 4 representa los datos experimentales de irradiancia eritemática correspondientes al período del 1 de mayo al 30 de septiembre de 1998. El valor más alto registrado en la estación de medida se produjo el 12 de junio, cuando se alcanzó un valor de 0.661 MED por 10 minutos. De dicha gráfica cabe destacar las fuertes fluctuaciones y desviaciones de la curva estándar producidas durante los meses de mayo y septiembre.

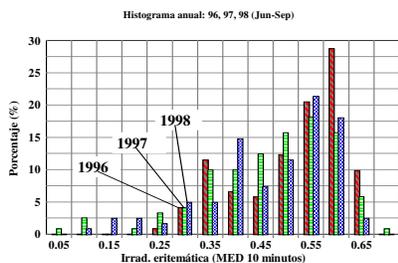


Figura 5. Histograma de los valores de irradiancia eritemática 1996, 1997 y 1998.

La reducción de los valores de irradiancia por cobertura nubosa dependen del tipo y grosor de las nubes (Bordewijk et al., 1995; Brodeker et al., 1996). La caída más brusca, respecto a los valores esperados de la envolvente, corresponde a una reducción máxima del 60% en el año 1996 producida en el verano.

En el año 1997 la máxima reducción encontrada ha

sido del 80% a finales de la primavera. Dado que el mayor interés se centra en el período veraniego, para la comparación de los valores alcanzados en los años 1996, 1997 y 1998 en dicho período, se ha realizado un histograma comparativo de frecuencias de los valores de la irradiancia.

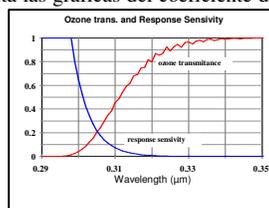
Los resultados, REPRESENTADOS EN LA FIGURA 5, muestran que, en el período analizado, los valores más elevados han correspondido al año 1996. La mayor cobertura nubosa durante el verano de 1997 se traduce en la existencia de valores anormalmente bajos en este período. El año 1998 muestra un comportamiento intermedio entre 1996 y 1997.

4. RELACIÓN ENTRE EL ESPESOR TOTAL DE OZONO Y LA IRRADIANCIA ERITEMÁTICA.

Como ya se ha comentado, el factor atmosférico más importante en los valores alcanzados por la irradiancia eritemática es el espesor de ozono. La cantidad de este componente determina el delicado equilibrio de la cantidad de radiación a la que puede ser expuesto un individuo sin recibir daños.

La figura representa las gráficas del coeficiente de acción

eritemática y la transmitancia mostrada por el ozono para una cantidad estándar de ozono total de 330 unidades



dobson. A la vista de este comportamiento resulta de especial interés el análisis del comportamiento de la irradiancia eritemática integrada cuando varía el contenido total de ozono.

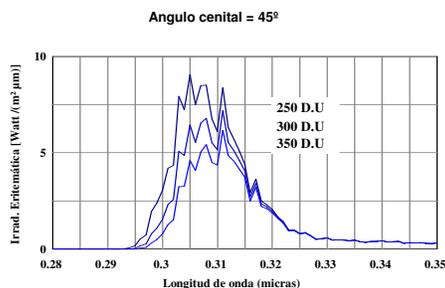


Figura 6. Irradiancia eritemática espectral para diferentes valores de espesor total de ozono.

Para ello, se ha realizado un análisis de la irradiancia eritemática espectral, para un ángulo

cenital solar estándar de 45° para 21 cantidades diferentes de espesor total de ozono, variando en el intervalo [200 UD, 400 UD] en incrementos de 10 UD.

La figura 6 contiene tres gráficas representativas de los valores espectrales para tres cantidades medias de ozono: 250 300 y 350 UD respectivamente. A partir de la integración de la irradiancia eritemática en cada punto se ha obtenido la relación entre dicha magnitud y el espesor total de ozono. A partir de la integración de estas gráficas espectrales puede obtenerse una relación entre la irradiancia eritemática total y el espesor total de ozono. Para ello se han probado varias expresiones matemáticas de tipo exponencial y potencial obteniendo el mejor coeficiente de correlación mediante la siguiente expresión:

$$\text{Irrad} = A * [O_3]^{-B}$$

donde **A=100.65** y **B=1.18**; $[O_3]$ es el espesor total de ozono en unidades dobson e Irrad es la irradiancia eritemática integrada. El coeficiente de correlación entre ambas magnitudes a través de la expresión anterior es de $r=0.99997$, siendo el *error medio* de $1.18 \cdot 10^{-4}$. Los coeficientes A y B del resultado anterior son sólo válidos para un ángulo cenital solar de 45°. Este resultado es representativo del fuerte incremento de radiación eritemática cuando la cantidad de ozono varía.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un análisis de los datos experimentales de irradiancia eritemática así como la evolución de sus valores a lo largo de las distintas épocas del año. Estos resultados deben ser dirigidos a la elaboración de un índice de peligrosidad a la exposición, incluyendo la información procedente del tipo de piel de cada individuo. Esta relación entre la radiación y el fototipo general establecido en seis categorías generales, está tabulado en el denominado *índice de radiación ultravioleta*. La difusión de este índice entre la población debería ser tarea prioritaria en los meses de verano; sobre todo en países, que como el nuestro, el turismo y el tiempo de ocio de la población están directamente abocados a actividades directamente relacionadas con largas exposiciones al sol (tiempo de ocio relacionado con la playa, la montaña etc.).

REFERENCIAS

-BORDEWIJK, J.A., SLAPER, H., REINEN, H.A.J.M. and SCHLAMANN, E (1995). *Total solar radiation and the influence of clouds and aerosols on the biologically effective UV*.

Geophysical Research Letters, vol. 22, No. 16, august, 1995, pp. 2151-2154.

-BRODEKER, G. E., and MCKENZIE, R.L. (1996). *An algorithm for inferring surface UV irradiance including cloud effects*. Journal of Applied Meteorology, vol. 35, october 1996, pp. 1860-1877.

-HERMAN, J.R. and McPETERS, R. (1993) *Ozone depletion at northern and southern latitudes derived from january 1979 to december 1991 Total Ozone Mapping Spectrometer data*. Journal of Geophysical research, vol. 98, no. D7, july 1993, pp 12783-12793

-HOPPE, P., RABE, G., PRAML, G., LINDNER, J., JAKOBI, G. and FRUHMANN, G. (1996). *Are there risk groups in respect to acute effects of environmental ozone ?*. Proceedings of 14th International Congress of Biometeorology, 1-8 september 1996, Ljubljana, Slovenia. Vol. 3, pp. 40-49.

-LEFFELL, DAVID J. and BRASH, DOUGLAS E. (1996). *Radiación solar y cáncer de piel*. Investigación y Ciencia, agosto 1996, pp. 62-68.

-MCKINLAY, A.F. and DIFFEY, B.L. (1987) *A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. Human exposure to UV radiation: risk and regulations*. Elsevier Science, pp. 83-87.

-STOLARSKI, R.S., BLOOMFIELD, P., McPETERS, R.D. and HERMAN, J.R. (1991). *Total ozone trends deduced from Nimbus 7 TOMS data*. Geophysical Research Letters, vol. 18, number 6. pp. 1015-1018.

-STOLARSKI, R.S., BOJKOV, R., BISHOP, L., ZEREFOS, C., STAEHELIN, J. and ZAWODNY, J. (1992). *Measured trends in stratospheric ozone*. Science. Vol. 256, 17 april 1992, pp. 342-349.

TERAN, M. de, SOLÉ, L. y VILÁ, J. (1987). *Geografía general de España*. Ed. Ariel Geografía, Barcelona 1987.

-VAROTSOS, C. A. and CRACKNELL, A. P. (1993) *Ozone Ddepletion over Greece as deduced from Nimbus-7 TOMS measurements*. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, number 11.1993, pp. 2053-2059.