

## SOL Y CAMBIO CLIMÁTICO

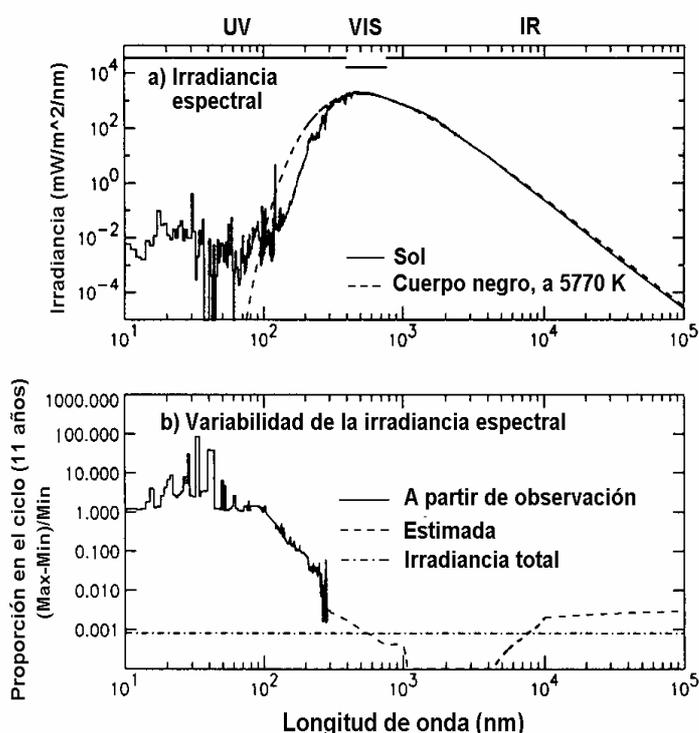
Adolfo Marroquín Santoña  
Doctor en Física - Meteorólogo del Estado  
Miembro de la Comisión Científica de la RSEEAP

Las causas que provocan los cambios en la cantidad y distribución de la energía que llega a la Tierra son fundamentalmente tres:

- 1.- Factores geométricos relacionados con la inclinación del eje terrestre y de su órbita alrededor del Sol, que altera fundamentalmente la distribución espacial de la energía incidente.
- 2.- Factores internos del propio sistema Tierra, por ejemplo cantidad y distribución de la nubosidad, que intervienen también en las alteraciones de la distribución de la energía.
- 3.- Variaciones en la propia fuente, es decir en el Sol, que modifican la energía emitida, y por tanto la recibida.

Ésta última es tal vez la menos conocida de las tres, y a ella vamos a dedicar algunas consideraciones. Es claro que la verdadera fuente de vida de la Tierra es el Sol, y está claro también que las variaciones en esta fuente de energía han de influir de forma notable en lo que podríamos llamar Capa Biológicamente Activa del planeta Tierra. Esta capa, que podríamos estimar se extiende desde algunas decenas de metros bajo el suelo hasta algunos cientos de kilómetros sobre el mismo, es afectada por las variaciones y alteraciones en la energía radiada por el Sol, variaciones que alcanzan valores del orden del 0.1% y están relacionadas con la presencia de regiones activas en la atmósfera solar (manchas solares) que se producen a escalas de tiempo que van desde algunos minutos hasta los 11 años del ciclo de actividad solar.

El espectro de la energía radiante incidente en la cima de la atmósfera y los cambios durante el ciclo de actividad solar se muestran en la **Figura 1**, donde en la



**Figura 1**

parte superior se presenta la irradiancia solar espectral comparada con el espectro del cuerpo negro radiante a 5770 K (Se ha utilizado escala logarítmica para poder mostrar con mayor claridad la región del ultravioleta) y en la parte inferior de la figura, se presenta la amplitud aproximada de la variación relativa de la irradiancia espectral del Sol, entre máximo y mínimo, a lo largo del ciclo de 11 años (Reviews of Geophysics, 1991). La línea de trazos del cuadro inferior muestra una estimación de la variación a lo largo del espectro visible, que contiene

la inmensa mayor parte de la energía radiante del Sol, siendo el principal agente ante un potencial forzamiento del clima global. La línea, prácticamente horizontal, de punto-raya indica la variación aproximada de la irradiancia solar total (habitualmente conocida como "constante solar") a lo largo de los 11 años del ciclo solar.

La **Figura 2** presenta la altura de la unidad de espesor óptico, es decir la altura media a la cual la energía solar es reducida por la atmósfera terrestre hasta aproximadamente 1/e de su valor en la cima de la atmósfera. Esta curva viene determinada por la concentración en la atmósfera terrestre de los gases absorbentes radiativamente activos. A la izquierda de la figura se muestra la altura a la cual la irradiancia solar es atenuada hasta 1/e (unidad de espesor óptico) en la atmósfera terrestre, para el Sol en el cenit (Meier, 1991). Se muestran también los diferentes

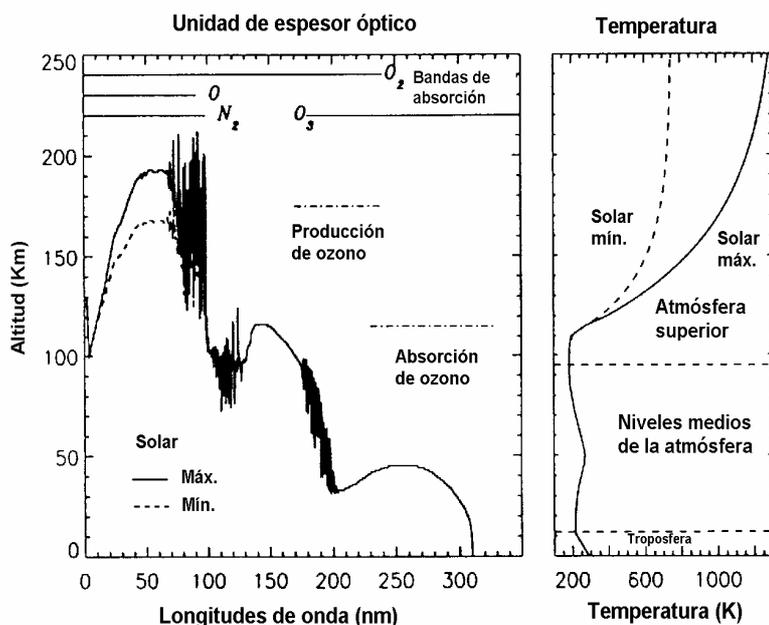


Figura 2

gases absorbentes de radiación en distintas bandas espectrales y las regiones de longitudes de onda en las que domina la producción y la absorción de ozono. A la derecha de la figura se muestra la temperatura estándar de la Tierra, desde la superficie hasta los 250 Km.

Las Figuras 1 y 2 indican que la mayor parte de la energía asociada a cortas longitudes de onda es absorbida en la atmósfera superior, a elevadas altitudes. La radiación de longitud de onda por debajo de los 150 nm (nanómetros,  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) es en su mayor parte absorbida por encima de los 100 Km (en la termosfera), donde la variabilidad solar da lugar a variaciones de cientos de grados en la temperatura. La radiación solar de longitudes de onda entre 150 y 310 nm es absorbida principalmente en la media atmósfera (considerada convencionalmente entre los 15 y los 100 Km) entre la troposfera y la termosfera.

Son numerosos los estudios estadísticos que relacionan variaciones en parámetros atmosféricos e hidrosféricos con la variabilidad solar, a varias escalas temporales. En términos generales, es mucho más fácil estudiar físicamente las variaciones en la alta atmósfera debidas a la actividad solar, que los efectos de ésta en la baja atmósfera o en la hidrosfera, puesto que las mayores variaciones en la entrada de energía procedente del Sol, corresponden a longitudes de onda absorbidas fundamentalmente en la atmósfera superior.

El principal problema a la hora de buscar explicaciones estadísticas a las relaciones entre la variabilidad solar y sus efectos sobre la meteorología y el clima, es que la cantidad de energía asociada a las variaciones en los inputs de la energía solar es pequeña (en valor relativo) al compararla tanto con la energía solar entrante en sí misma, como con las cantidades de energía "implicadas en el funcionamiento" de la baja atmósfera. El valor medio de la irradiancia solar total, la constante solar, es de  $1367 \text{ W/m}^2$ , siendo la variación observada para el ciclo solar de 11 años de alrededor

de  $1.3 \text{ W/m}^2$ , es decir en torno al 0.1%., mientras que en el rango de las radiaciones UV la variación es del orden de 10 veces mayor que la que tiene lugar para la irradiancia global, alcanzando el 1%.

## VARIACIONES SOLARES Y CAMBIO CLIMÁTICO

Puesto que en esencia el Sol suministra toda la energía que mueve el sistema climático, parece evidente que su variación puede provocar cambios que alteren el clima. Como antes señalábamos, medidas de la irradiancia solar mediante radiómetros a bordo de satélites en órbita han detectados variaciones decadales del orden de 0.1% (Hoyt et al, 1992), aparentemente asociadas con el ciclo de 11 años de actividad solar; mayores variaciones, del orden de varias décimas por ciento, ocurren a escalas temporales menores, asociadas al ciclo de 27 días de la rotación solar.

La investigación del cambio global requiere del conocimiento de la energía radiativa del Sol, a lo largo de todo su espectro. Sin embargo, actualmente sólo podemos determinar con precisión la existencia de variaciones por debajo de unos 250 nm, puesto que para longitudes de onda mayores la incertidumbre en la medida supera la posible variación. Se necesitan pues medidas mucho más precisas en todas las longitudes de onda para poder establecer con seguridad la existencia o no de cambios.

### Medidas actuales

Durante los primeros tres cuartos del siglo XX, las observaciones en tierra fueron incapaces de detectar variaciones en la irradiancia total que tuvieran su origen, inequívocamente, en el propio Sol. Las limitaciones fundamentales fueron la calibración instrumental y las interferencias y atenuaciones atmosféricas.

Sin embargo, en las últimas décadas se han desarrollado una serie de experimentos (ERB, ACRIM, ERBS, ERBE) basados en mediciones desde radiómetros a bordo de satélites, que han suministrado datos de gran precisión, y libres de la

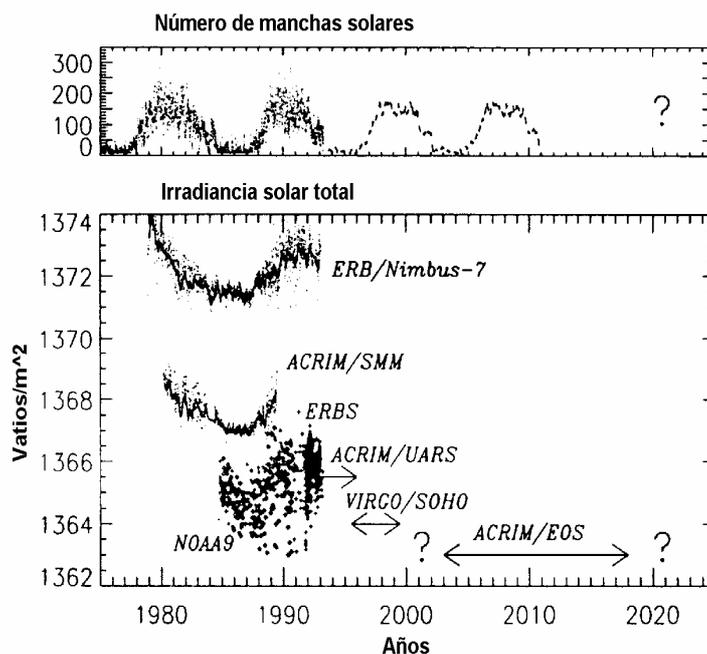


Figura 3

influencia atmosférica. En la parte superior de la **Figura 3** (Lean, 1991) se presentan las variaciones actuales de la actividad solar, medidas a través del número de manchas solares, y en la parte inferior los cambios en las emisiones radiativas medidas por los radiómetros del ERB (Earth Radiation Budget) a bordo del satélite Nimbus 7, del ACRIM I (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor) a bordo del SMM (Solar Maximum Mission), del ACRIM II a bordo del UARS, y del programa ERBE (NOAA9 y ERBS). Puede observarse que la irradiancia solar total es máxima en los períodos de máxima actividad solar (por

ejemplo 1980 y 1990) y disminuye durante los intervalos de mínima actividad. Se ha calculado que la irradiancia solar media disminuyó sistemáticamente desde 1980 hasta mediados de 1986, a razón de un 0.015% anual. Por otra parte, las diferencias que se observan en la figura entre los niveles de irradiancia medidos por los distintos programas, son debidas a la utilización de diferente instrumentación y reflejan la notable inexactitud en las medidas, como consecuencia de las incertidumbres en la calibración, encontrándose diferencias entre los radiómetros del orden de  $6 \text{ W/m}^2$ , es decir en torno al 0.2% de la medida (Luther et al., 1986), y por tanto más de diez veces la supuesta tendencia encontrada por ejemplo entre 1980 y 1986. En consecuencia, cualquier trabajo con este tipo de datos debe ser tratado muy cuidadosamente, teniendo siempre presente que son mucho más fiables las variaciones medidas que los valores absolutos registrados para las magnitudes.

Es necesario por tanto incrementar la precisión de las medidas, además de desarrollar más medidas espectrales, puesto que se considera como muy probable que la variación en la irradiación sea diferente para distintas longitudes de onda, e incluso que para determinadas longitudes las variaciones no estén en fase con el ciclo solar, es decir con la variación en el número de manchas solares.

### FORZAMIENTO SOLAR DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Las variaciones en la irradiancia solar pueden afectar al clima de la Tierra a través de su influencia sobre la temperatura global media, pero también a través de otros caminos indirectos. La magnitud del cambio climático que puede ser asociada directamente con los cambios en la irradiancia solar total medida durante un ciclo de la actividad solar es pequeño comparado con los cambios producidos a lo largo de la historia del clima.

Los actuales GCMs (Modelos de Circulación General) estiman que un aumento del 2% en la irradiancia solar daría lugar a un calentamiento global del orden de  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  (Hansen et al., 1994). Si aceptamos que esto es así, y que la variación es lineal, la variación del 0.1% observada por los radiómetros a bordo de satélites para el ciclo solar completo (11 años), produciría cambios de temperatura de  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$  en el equilibrio. Sin embargo el cambio entre el máximo y el mínimo de actividad solar se producen cada poco más de 5 años, que es un período demasiado corto para que el sistema climático alcance un equilibrio de respuesta, sobre todo teniendo en cuenta que tras cada extremal (máximo o mínimo) en los valores de la irradiancia se entra en la otra mitad del ciclo solar, cambiando por tanto el sentido de la variación.

En consecuencia, esta variación en la temperatura, que en todo caso sería menor de  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , resulta de escasa importancia frente a los  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $4.5 \text{ }^\circ\text{C}$  que los modelos establecen para una eventual duplicación de los gases de efecto invernadero.

En la estratosfera los cambios en la irradiancia solar pueden tener influencias indirectas sobre el clima. Algunas investigaciones con GCMs (Rind and Balachandran, 1994) sugieren que las variaciones en la entrada de radiación ultravioleta (UV), modificando la distribución y temperatura del ozono en la estratosfera, afectarían al gradiente latitudinal de la temperatura, lo que modificaría la velocidad de los vientos estratosféricos y la capacidad de la radiación de onda larga para propagarse fuera de la troposfera. La alteración de la estabilidad troposférica afectaría a varios procesos dinámicos en ella, incluyendo la intensidad de la célula de Hadley a latitudes bajas y subtropicales, así como a las borrascas extratropicales.

Existen pues muchas incertidumbres en relación con la influencia que puedan tener sobre el cambio climático las variaciones en la irradiancia solar, siendo necesario medir más y mejor antes de poder plantear conclusiones. Pero vaya por delante "una de cal y otra de arena", puesto que si nos fijamos nuevamente en la Figura 1 podemos observar que es a la vez tranquilizador y deprimente el que las variaciones de la irradiancia espectral en el visible sean tan pequeñas. Deprimente porque estamos moviéndonos en el límite de nuestra capacidad de medir en esas longitudes de onda, y tranquilizador porque en el peor de los casos estamos al menos seguros de que esas variaciones, que no sabemos medir bien, son afortunadamente muy pequeñas. Sería muy dudosa nuestra supervivencia si las variaciones fueran del orden de magnitud de las que tienen lugar para las longitudes de onda más pequeñas.

**Badajoz, octubre 1999**  
**A.M.S.**

## **BIBLIOGRAFÍA**

Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy, and J. Lerner. 1994. Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms. Pp. 130-163 in *Climate Processes and Climate Sensitivity*, J. Hansen and T. Takahashi (eds.). American geophysical Union, Washington, DC.

Hoyt, D.V., H.L. Kyle, J.R. Hickey, and R.H. Maschhoff. 1992. The Nimbus 7 solar total irradiance: A new algorithm for its derivation. *J. Geophys. Res.* 97:51-63.

Lean, J. 1991. Variations in the Sun's radiative output. *Reviews og Geophys.* 29:505-535.

Luther, M.R., R.B. Lee III, B.R. Barkstrom, J.E. Cooper, R.D. Cess, and C.H. Duncan. 1986. Solar calibration results from two earth radiation budget nonscanner instruments. *App. Optics* 25:540-545.

Meier, R.R. 1991. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere. *Space Science Reviews* 58:1-185.

Rind, D., and N.K. Balachandran. 1994. Effects of solar variability and the QBO on the modeled Troposphere/Stratosphere System. Part II: The Troposphere.