

Revista de Ciencias Exactas, Naturales y Aplicadas

elementos

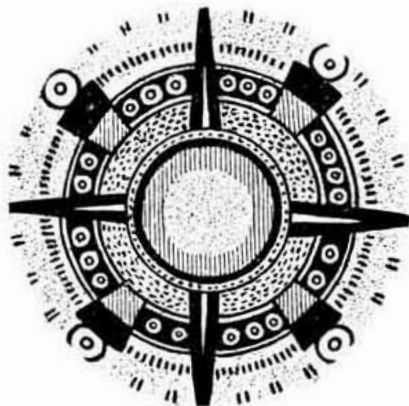
**EL SOL,
¿ESTRELLA VARIABLE?**

**PRIMER CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE HISTORIA DE LAS CIENCIAS
Y LA TECNOLOGIA**

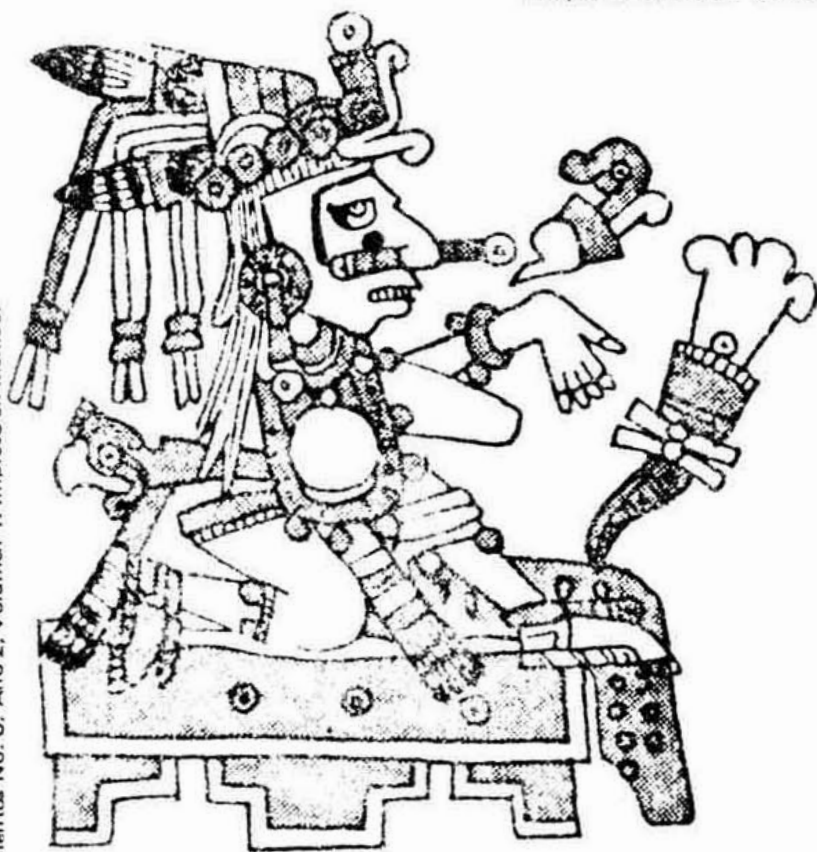
**LA INVESTIGACION BIOMEDICA EN LA UAP
PREMIO NOBEL HABLA A ELEMENTOS**

EL SOL, ¿ESTRELLA VARIABLE?

Jorge Pérez-Peraza*



Símbolo del sol. Pintura mural del "Templo de las Caritas" en Cempoala



Tonatiuh, dios del sol (Códice Borgia)

"Vos Sol, vista y esencia de este gran mundo".

Milton "Paraiso Perdido" Libro V, 1,171 (1667)

El problema de elucidar si la luminosidad del Sol es constante o no, viene preocupando a los científicos desde hace algunas décadas; particularmente a los astrofísicos y a los climatólogos. A los primeros en relación a la concepción actual de la generación de energía en el interior solar: en efecto, el Sol no emite con la misma tasa de luminosidad en el curso de su vida, aunque en su actual etapa de evolución en la secuencia principal, parece haber mantenido una luminosidad casi constante dentro del límite de variación que para esta etapa le concede la teoría de evolución estelar; sin embargo, debido al dilema de la deficiencia de neutrinos,¹ se ha sugerido que el proceso convencional de reacciones termonucleares no sea opera-

1. El Sol II, en Información Científica y Tecnológica, ed. por CONACYT No. 93, 1984, pp. 31-44, en donde el autor escribe sobre el tema de los Neutrinos Solares.

*Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.

El presente y subsecuente artículos del autor están estrechamente correlacionados con los artículos El Sol I y El Sol II, publicados en la revista *Información científica y tecnológica* del CONACYT, Nos. 92 y 93, y en consecuencia se hace frecuente referencia a ellos.

tivo en la fuente de luminosidad solar, y propuesto, entre otras posibilidades que el proceso nuclear presente un comportamiento cíclico. En tal caso si el Sol es una estrella variable y dado que la luz emitida en el presente resulta de procesos ocurridos en el horno solar hace varias decenas de millones de años, consecuentemente debería entonces alternarse máximos y mínimos de la luminosidad tal que dentro de varias decenas de millones de años el Sol deberá ser 0.8 veces menos brillante que en el presente, para ser compatible con el flujo de neutrinos observado actualmente.

Por otro lado, los modelos del clima terrestre desarrollados por los climatólogos predicen que una variación de 1 o/o de la luminosidad solar entraña una variación de la temperatura en la superficie terrestre de aproximadamente 2 grados. Por ejemplo, un incremento de 100° sobre la temperatura superficial solar implica una elevación de 4 a 5 grados en nuestro planeta, implicando ello modificaciones considerables en nuestro clima. Esto conduce a cuestionarse si nuestro astro es o no una estrella variable, y si lo es ¿cuál es su periodo de variabilidad?, ¿en qué término y con qué magnitud se manifestaría en el futuro esa eventual variabilidad en la tasa de luminosidad Solar?

Alternativamente a la variabilidad proveniente de los procesos de generación de energía solar, otras posibles fuentes de variabilidad de la luminosidad solar pueden provenir del ciclo de actividad magnética del Sol, así como de la rotación solar. En efecto, el Sol desde el punto de vista magnético es una estrella variable con un periodo de recurrencia de aproximadamente 22 años. Hemos dicho en el artículo citado¹ que el fenómeno fundamental que causa esa oscilación magnética, parece estar identificado (figura 1), aunque los detalles precisos están aún lejos de ser completamente entendidos. En el curso de un ciclo de inversión de polaridad, todo aquello que depende de los fenómenos de campo

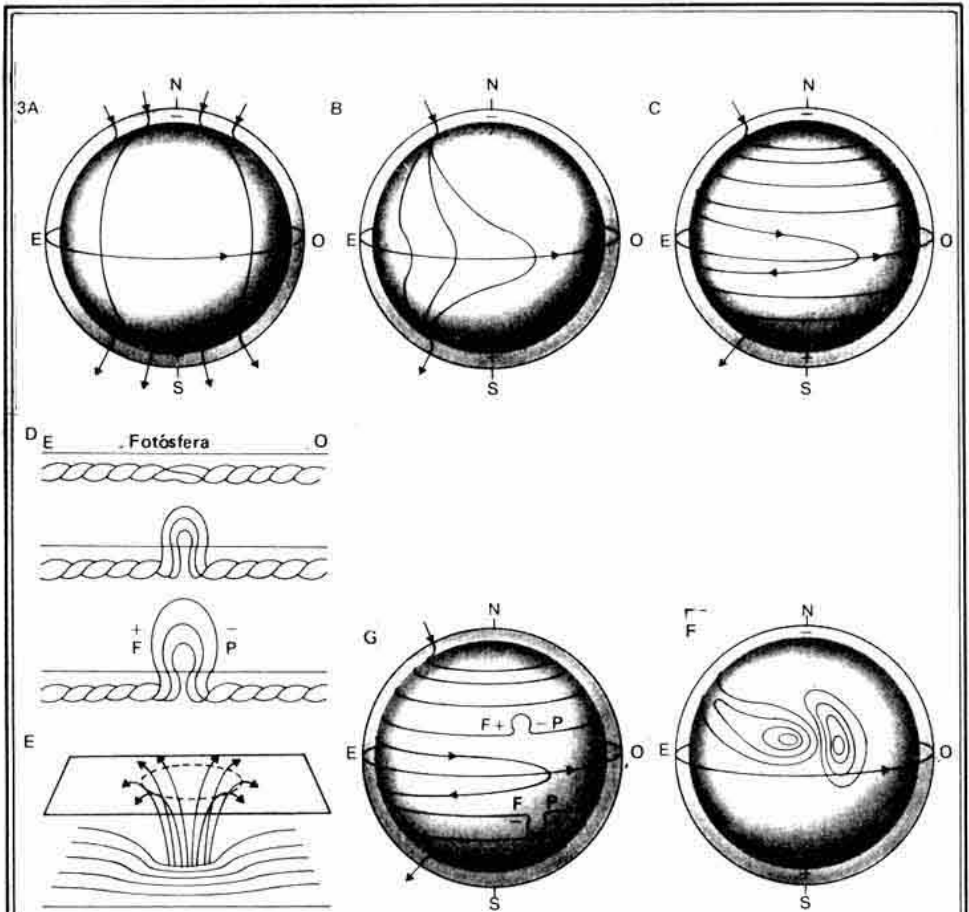


Fig. 1. Evolución del campo magnético en el curso de un ciclo de actividad magnética acorde al modelo de Babcock-Leighton: al inicio del ciclo, las líneas magnéticas subfotosféricas están dirigidas de polo a polo, cada uno con polaridad opuesta, a lo largo de meridianos del Sol, en tanto que la rotación diferencial es de este a oeste con diferente cadencia en diferentes paralelos solares (esquema A). Como las líneas de campo magnético están "congeladas" al material solar, a medida de que avanza el ciclo las líneas se distorsionan por el efecto de la rotación diferencial (B). A medida de que el ciclo progresa las líneas se restiran y se enrollan alrededor del sol paralelamente al ecuador, aglomerándose gradualmente, de tal forma que se incrementa la intensidad de las líneas de fuerza progresivamente (C). Conforme se juntan, se forman tubos de flujo magnético que se van retorciendo paulatinamente por los efectos de convección (D). Se forman especies de fardos de tubos de flujo que al irse juntando forman estructuras parecidas a las cuerdas, incrementando aún más la intensidad de campo, a tal grado que flotan hacia la superficie, en donde los nudos de las cuerdas de esos tubos de flujo penetran en la fotosfera formando grupos de manchas solares (E y F) que se acumulan preferencialmente a latitudes de 40° alrededor del ecuador (G). A medida de que la inclinación de las líneas de campo cambia de dirección, se invierte la polaridad, y el efecto de la rotación diferencial es el de desenrollar en vez de enrollar las líneas de campo, tal que el nacimiento de manchas declina y la actividad disminuye. Eventualmente se llega a un estado en el que las líneas de fuerza se orientan, nuevamente de norte a sur y el proceso de enrollamiento comienza de nuevo, lo que inicia un nuevo ciclo de actividad.

magnético varía: no solamente los fenómenos característicos de la actividad solar (manchas, prominencias y fulguraciones), sino también la forma de la corona y su forma de extenderse varía con el ciclo de actividad solar. Por otro lado, los movimientos de rotación que animan las diferentes capas internas y superficiales del Sol engendran el campo magnético que varía de un punto a otro de la superficie solar, cuya polaridad se invierte cada 11 años. Asociada a esa variabilidad de campo magnético existen diversas estructuras magnéticas abiertas y cerradas que giran con el Sol, lo cual lleva a concebir que esa rotación al igual que los fenómenos de la actividad solar puedan darle una cierta variabilidad a la luz recibida por nuestros instrumentos más sensibles, proveniente del horno solar.

Sin embargo, para poder indagar cuáles son las causas posibles de esa eventual posibilidad y de su grado de participación en ella, es necesario establecer formalmente la evidencia de tales variaciones de luminosidad para después poder inferir sobre su origen. Tales evidencias pueden ser buscadas en el pasado de los planetas del Sistema Solar. Nuestro planeta es el seleccionado preferencialmente para ello: la paleoclimatología, la pedología (estudio de los suelos), la utilización del carbono 14 y el registro de los diversos índices de las manifestaciones terrestres en la actividad solar, son los instrumentos más útiles en la búsqueda de evidencias de variabilidad de luminosidad solar, para complementar el enfoque astrofísico. Las dos evidencias principales de variabilidad de luminosidad solar, se buscan en variaciones de la llamada curiosamente la "constante solar" y en cambios climatológicos del planeta; se trata de asociar esas variaciones al cambio de luminosidad del Sol, discriminando otros posibles efectos que pudieran inducir esas eventuales variaciones de la constante solar y del clima. La constante solar es una medida de la cantidad de radiación que re-

cibe nuestra atmósfera cada minuto por unidad de área: $1.948 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$, o sea aproximadamente una milmillonésima parte de la emitida por el sol, lo cual nos da una idea del factor de dilución de la radiación a la distancia de una unidad astronómica. Las medidas hechas al nivel de la tierra, se han llevado a cabo con una excelente precisión desde hace una cincuentena de años aproximadamente y aunque existe aún un cierto grado de controversia, se puede decir que, a nivel terrestre, las variaciones de luminosidad solar pueden considerarse inferiores al 0.17 o/o (lo que entrañaría una variación de temperatura de aproximadamente 0.35°C). Recientemente, las medidas hechas directamente en sondas especiales en un lapso de 17 años (1962-1978), lo que involucra un ciclo de 11 años de actividad solar, indican una variabilidad estacionaria de luminosidad, dentro de un margen de 1.2 o/o, con 95 o/o de confiabilidad (lo que implica una variación de la temperatura dentro de un margen de 2°C). Además hay evidencias de un incremento de 0.4 o/o entre 1968 y 1978 (lo que significa un calentamiento de clima global de 0.8°C).

Evidentemente, es de cuestionarse si tal variación de la luminosidad a corto término es real o no, pues por un lado tales variaciones tan pequeñas están apenas por encima de los límites de confiabilidad de las correcciones aplicadas para la transparencia atmosférica y las técnicas experimentales para coleccionar y reducir datos, y, por otro lado, no se puede concluir de manera absoluta que esas variaciones de la constante solar provienen efectivamente de variaciones de la luminosidad solar, ya que -como se mencionará más adelante-, con variaciones eventuales de la composición química de la atmósfera, las condiciones de transferencia de radiación varían, a tal grado que no es fácil disociar los efectos de variación de la luminosidad del Sol de los efectos locales.

Otra manera de inferir indirectamente sobre las eventuales varia-

ciones de la luminosidad, es mediante la medición del brillo promedio de Urano y Neptuno; sin embargo, nuevamente no es posible discernir de manera absoluta, si las variaciones observadas se deben a un cambio real de la luminosidad del Sol o a efectos inducidos por el viento solar. En consideración a lo anterior se acepta actualmente que las manifestaciones de la actividad solar, a corto término, no afectan considerablemente la luminosidad solar, y consecuentemente los efectos de las manchas solares, las prominencias y las fulguraciones en el curso del ciclo solar, tienen un efecto despreciable sobre el clima terrestre.

En lo concerniente a variaciones climatológicas a largo término, los cambios de luminosidad solar han sido asociados a la ocurrencia de las edades glaciales, sin que ello sea evidencia de que se deban a variaciones de luminosidad solar. Por otro lado, una vasta cantidad de evidencias paleoclimatológicas indican que la temperatura de la Tierra está cambiando a razón de 5°C , en escalas temporales que van desde 30,000 hasta cerca de 1 millón de años. ¿Cómo probar que esos cambios climatológicos a largo término están indiscerniblemente asociados a cierta variabilidad de la luminosidad solar y no a otros efectos? Una manera sería probar que por cada dos grados de variación de la temperatura terrestre, le corresponde aproximadamente un cambio de 1 o/o en la luminosidad del Sol, acorde a las predicciones convencionales de los modelos del clima terrestre, o bien, si esos modelos no son lo suficientemente confiables, establecer entonces una asociación biunívoca entre cambios climatológicos y características variables del Sol. Cabe hacer notar que las excelentes observaciones llevadas a cabo en las diversas estaciones espaciales "Vikingo" muestran que las condiciones climatológicas actuales de Marte son características de un periodo glacial, y que ciertas configuraciones en forma

de cascarones de hielo cerca de los polos son indicadores de que el clima marciano ha tenido también cambios bien definidos en el pasado, de hecho existen evidencias de que el agua ha erosionado la superficie marciana, implicando con ello que el agua en forma líquida ha existido ahí. Actualmente, toda traza de agua líquida ha desaparecido totalmente de Marte y sólo subsiste en forma de hielo en los polos y probablemente bajo su suelo. Estas variaciones de climatología de Marte podrían también explicarse por variaciones de la luminosidad solar. En efecto, si hubiese alguna manera de determinar la edad de cada cáscara de hielo de los polos marcianos, se tendrían dos registros independientes de los cambios de clima, los terrestres y los marcianos, y si esos registros coincidiesen se tendría un argumento consistente para concluir que el Sol es el responsable de los cambios climáticos de ambos planetas. Desafortunadamente, no se tiene actualmente información sobre los cambios climáticos de Marte en el pasado, tal como se dispone de nuestro planeta, gracias a la colosal empresa detectivesca llevada a cabo por el físico solar John Eddy del High Altitude Observatory en Colorado. Evidentemente, se presenta la alternativa de que las variaciones de la posición de los dos planetas con respecto al Sol, es decir, ligeras variaciones en sus respectivas órbitas y la subsecuente variación en la tasa de insolación de las superficies planetarias, puedan explicar tales excursiones de temperatura que provocaron las glaciaciones. Al efecto,

aunque las frecuencias características de los cambios de posición en sus órbitas se intercorrelacionan adecuadamente con variaciones climáticas, éstas son de una amplitud insignificante para poder provocar tales glaciaciones.

Queda entonces investigar la evolución del clima terrestre en el pasado y su posible asociación con el comportamiento del astro rey. Con ese objetivo John Eddy se abocó a un censo de lo más completo posible, de todos los datos de observaciones que puedan directamente contener elementos de información sobre las variaciones de la actividad solar en los últimos 5,000 años, concentrándose principalmente en los registros de manchas solares y observaciones de la corona que datan desde el siglo sexto. Las épocas anteriores las complementó como veremos más adelante con el estudio del carbono 14 en los anillos de crecimiento anual de los árboles. Es así como Eddy revivió el efímero concepto de variabilidad solar, introducido a finales del siglo pasado por los físicos solares G. Spörer y Walter Maunder, quien era superintendente de la División Solar del Observatorio Real de Greenwich, en Londres. En lo concerniente a manchas solares, la resolución de datos correspondientes a este siglo, no presenta ninguna dificultad. Para los periodos anteriores se recurrió al trabajo minucioso de cerca de 30 años, efectuado por Maunder, quien había recolectado toda la información de manchas disponibles desde el siglo XVII, tanto en la literatura científica como en descripciones me-

nos especializadas. El resultado de esa compilación se muestra en la figura 2, lo que revela sorprendentemente que de 1645 a 1715, prácticamente ninguna mancha estuvo visible sobre el disco solar. Sorprendentemente, porque aun en periodos de mínima actividad, al menos unas pocas manchas son observadas, y de hecho es extremadamente raro que pase un mes completo sin que aparezca una sola mancha. Los resultados de Maunder indican que durante 32 años ni una sola mancha fue vista en el hemisferio norte del Sol, y durante 70 años no más de un grupo de manchas fue observado en una sola ocasión. Algunos periodos de 10 años no pudo observarse ni una sola mancha en el disco solar. La ausencia de manchas en el Sol durante esos 70 años, periodo en el cual paradójicamente tuvo lugar el reinado del Rey Sol! (Luis XIV), es designado con el nombre de mínimo de Maunder. Sin embargo, como es común en la ciencia, la existencia de tal mínimo de actividad, puede ser controvertida en base a numerosos argumentos, que pueden resumirse en el cuestionamiento de que Maunder pudo haber tomado la *ausencia de evidencia como evidencia de ausencia*. Eddy demuestra que la ausencia de evidencia no es el caso: al respecto, la nebulosidad del cielo y la calidad de las observaciones podrían ser aludidas, sin embargo, en la misma época numerosas y excelentes observaciones astronómicas fueron efectuadas, tales como el descubrimiento de los anillos y los 5 satélites de Saturno. G.D. Cassini,

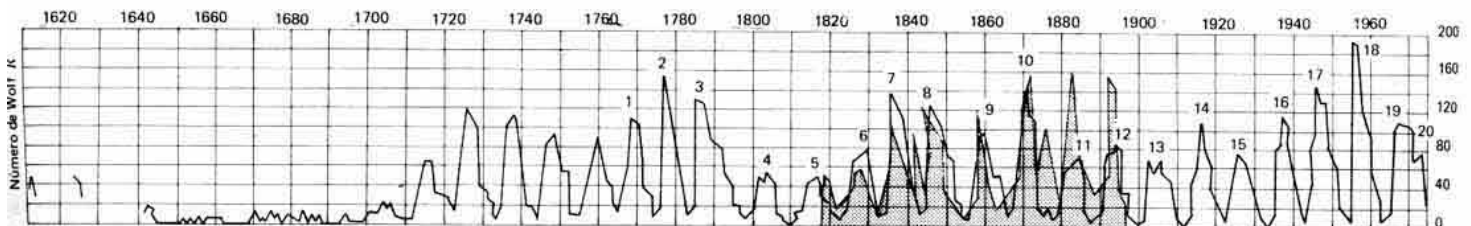


Fig. 2 Número promedio anual de manchas solares (número de Wolf o Índice de Zurich) extendido hasta 1611 por J. Eddy. Aunque hay ligeras variaciones en la longitud de los ciclos y en los niveles de actividad entre máximos sucesivos, se puede apreciar el ciclo básico de 11 años. Nótese que de 1645 a 1715 (Mínimo de Maunder) las manchas estuvieron prácticamente ausen-

tes. La curva oscura muestra la relación entre el número de manchas y la rapidez de crecimiento de los árboles estimado a partir de los anillos anulares. Se ve que el crecimiento es más rápido durante los periodos de máxima actividad solar. Convencionalmente se enumeran los ciclos a partir de 1755, y actualmente estamos en la fase declinante del ciclo 21.

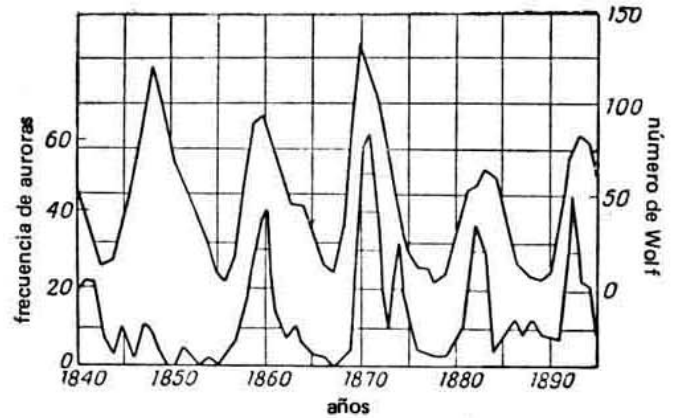
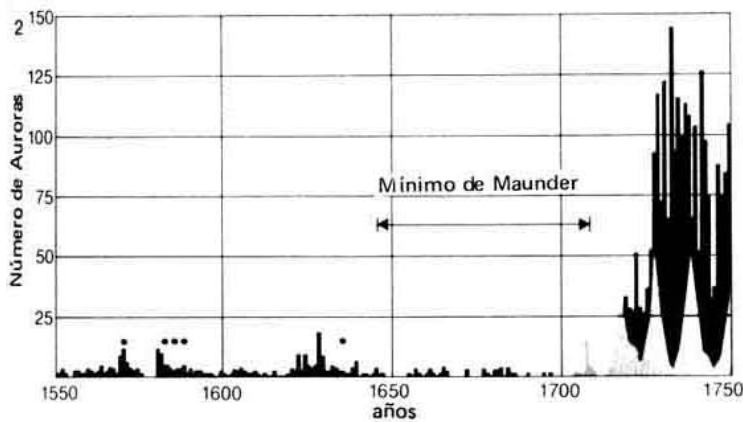


Fig. 3 (a) En color negro y gris aparecen indicadas las frecuencias de Auroras y de manchas solares respectivamente. La ausencia virtual de Auroras entre 1645 y 1715 coincide con la ausencia similar de manchas. Los puntos negros indican registros orientales de manchas. El ciclo de actividad solar "Moderno" iniciado a principios del siglo XVIII se caracteriza por un incremento dramático de actividad auroral.

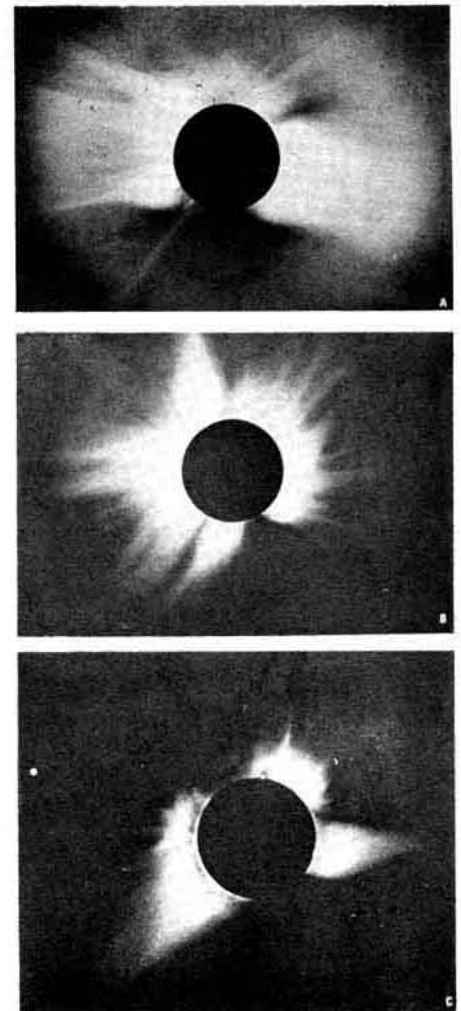
3 (b) El número relativo de manchas solares (curva superior y escala de la derecha) y la frecuencia de Auroras (curva inferior y escala izquierda) se correlacionan, como se indica aquí para el caso del hemisferio sur, en un periodo correspondiente al ciclo "Moderno". La discrepancia en 1845-1955 es debida a observaciones irregulares.

fundador del observatorio de París, quien descubrió en esa época la división mayor de los anillos de Saturno, solía quejarse de la falta de observaciones de manchas solares. Además 35 años antes del inicio del mínimo de Maunder, se acababa de inventar el telescopio. Sin embargo, Eddy como científico minucioso, trató de encontrar si otras manifestaciones de la actividad solar, se correlacionaban eventualmente con el mínimo de Maunder. Las auroras boreales cuya frecuencia e intensidad se correlacionan directamente al número de manchas en el Sol, eran por su espectacularidad, frecuentemente descritas en la literatura de la época; de 1645 a 1715 es prácticamente imposible encontrar rastros de ellas, aun en las altas latitudes como Escandinavia, donde hoy en día las auroras son visibles casi todas las noches. (figura 3a y 3b). Otra evidencia que confirma la ausencia de actividad solar durante el mínimo de Maunder reposa en la forma de la corona solar: en efecto, como se ve en la figura 4 la forma de la corona varía según la fase del ciclo de actividad. Los campos magnéticos que emanan de las manchas aparecen formando los torrentes coronales, que se observan en los eclipses totales del Sol. (figuras A y B) ² Cuando las man-

2. El Sol I, en Información Científica y Tecnológica ed. por CONACyT, No. 92, 1984, pp. 17-28, en donde el autor abunda en el tema.

chas son muy numerosas la corona se ve simétricamente rodeada de torrentes, en tanto que cuando hay pocas manchas el número

Fig. 4 Cambios de la estructura coronal con el ciclo solar. En la Fig. A se muestra la corona durante el eclipse del 30 de junio de 1973 cuando el sol se acercaba a su mínimo de actividad (número de manchas aproximadamente de 40). Los chorros coronales se concentran en el ecuador y las plumas pueden ser distinguidas, en las regiones polares. La figura (B) muestra la foto tomada en México el 7 de marzo de 1970 cerca del máximo del ciclo de actividad No. 20 (número de Wolf del orden de 100). En estas circunstancias las corrientes coronales se distribuyen en casi todas las latitudes, cubriendo incluso los polos solares. La Fig. (C) corresponde a un estado intermedio de actividad solar (número de Wolf 60). La luz blanca coronal en estas fotos es causada por la dispersión de la luz solar por los electrones prevaletentes en la corona. La brillantez es una medida del número de electrones coronales, y la distribución de la luz indica la distribución electrónica en la corona solar: puesto que los electrones están eléctricamente cargados, están sujetos a la influencia y control del campo magnético coronal. En consecuencia se atribuye las formas coronales en luz blanca como delineadoras de las líneas de campo magnético coronal.



de torrentes coronales declina y sólo aparecen unos cuantos cerca del ecuador solar. En el lapso de 1645 a 1715, ocurrieron 63 eclipses totales; de los que se presentaron en regiones accesibles, en ninguno pudo verse la forma estructurada de los torrentes, tan característicos de la corona. Únicamente se observó la llamada "falsa corona" que consiste en un anillo rojizo de luz zodiacal, que se produce debido a la difusión de la luz por los granos de polvo interplanetario.

Otro indicador de la actividad solar es el isótopo radiactivo del carbono: el carbono 14, que se crea en nuestra atmósfera por la interacción de los rayos cósmicos galácticos con el carbono de la atmósfera terrestre. Cuando el Sol está muy activo, su campo magnético se extiende hasta la Tierra, haciendo el papel de escudo blindado para los rayos cósmicos, a los que deflecta en su trayectoria. De esta manera, menos rayos cósmicos llegan a nuestra atmósfera y la cantidad de

carbono 14 se ve consecuentemente disminuida. Por lo contrario, cuando el Sol está menos activo, su campo magnético es más débil y los rayos cósmicos penetran más fácilmente a nuestra atmósfera, lo que se traduce en un incremento en la formación de carbono 14. Entonces, si se tiene un registro de la cantidad de carbono 14 en el pasado, se dispone también de un registro de los niveles de actividad solar en el pasado. Los árboles proveen justamente ese registro temporal de

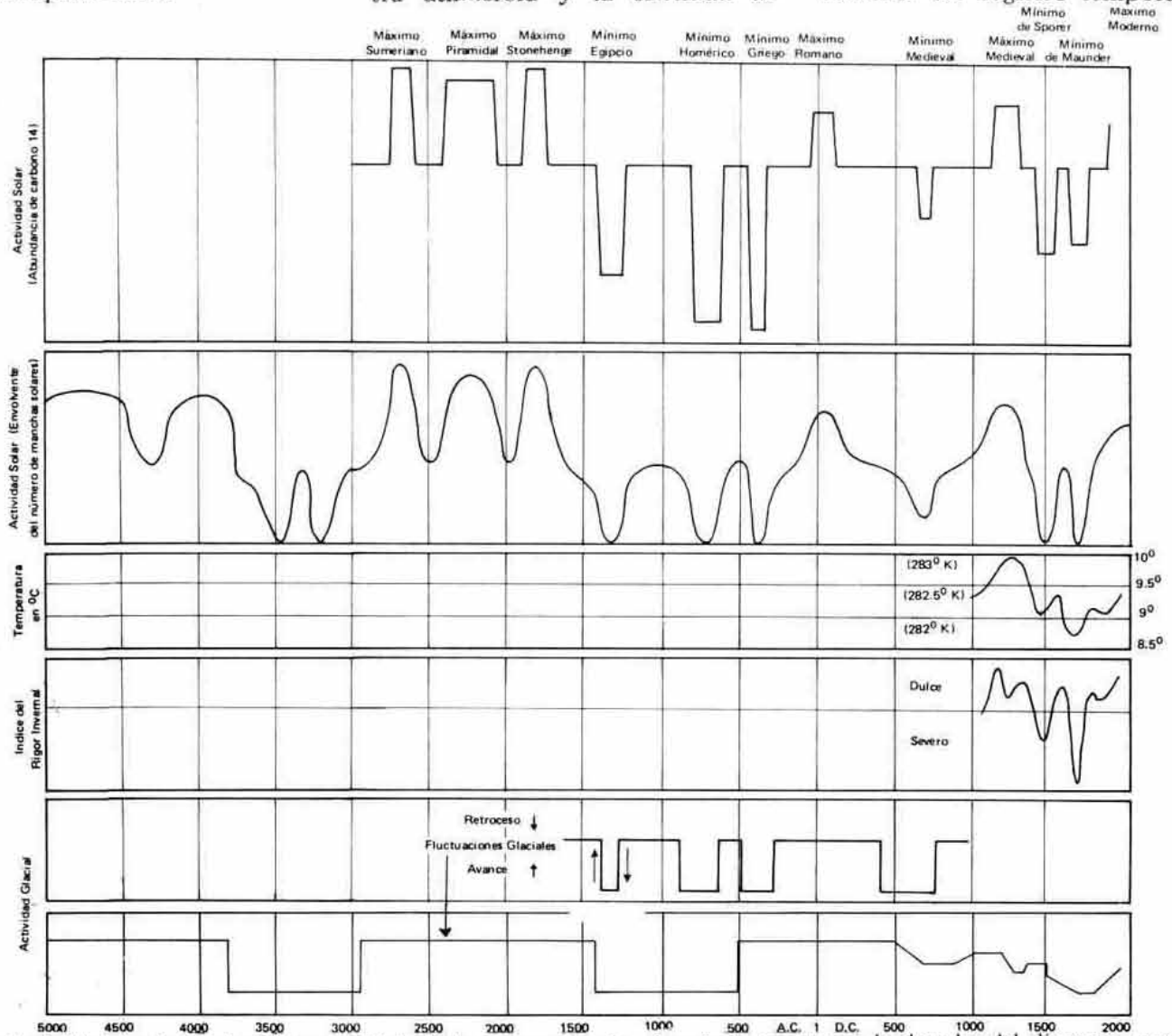


Fig. 5 Variabilidad solar deducida por J. Eddy de la comparación de la actividad solar en los últimos 7500 años, con varios índices climáticos. La curva superior representa la abundancia relativa del ^{14}C en los anillos de crecimiento de los coníferos desde la edad de bronce. Incrementos en la proporción del ^{14}C se ilustran como depresiones en la curva, representando supuestos decrecimientos de la actividad solar. La curva inmediata inferior representa el lisamiento de las curvas del número de Wolf, en forma de envolvente a largo término de la actividad

solar. La siguiente curva a la derecha del diagrama representa la temperatura media anual en Inglaterra. La curva siguiente representa el índice de severidad invernal en la región de París Londres. Las dos curvas inferiores representan ilustraciones de los de los glaciares alpinos (avances y retrocesos). De ellas la de abajo es una envolvente sobre periodos muy largos. Puede notar se que aunque estas correlaciones no son conclusivas, son bastante sugestivas.

^{14}C , almacenado en anillos de crecimiento, netamente separado en intervalos de un año.

El ^{14}C formado en la atmósfera superior, encuentra eventualmente su alojamiento en los árboles, vía la absorción del bióxido de carbono en la fotosíntesis. El análisis de la cantidad de ^{14}C con respecto al carbono normal en los troncos de los árboles, ha permitido trazar la historia de la actividad solar al menos hasta hace 7,000 años, al inicio de la edad de bronce. (5000 años antes de n.e.). Se encuentra así que la abundancia de ^{14}C acusa un máximo anormal en la 2da. mitad del siglo XVII, lo que corresponde al periodo del mínimo de Maunder, y que confirma aún más la existencia de ese mínimo (figura 5). Además se encuentran al menos otros 11 periodos de variabilidad de la actividad, tan prominentes como el mínimo de Maunder, con una duración que va entre 50 y más de 100 años. Algunos muestran depresión de la actividad del tipo del mínimo de Maunder, como el mínimo de Spörer entre 1400 y 1510 de nuestra era, y otros indican un incremento de actividad, como el llamado máximo medieval, entre 1100 y 1300 de nuestra era, así como el máximo moderno que estamos viviendo actualmente, caracterizado por un máximo de manchas en 1957, la presencia de una corona solar muy estructurada y una alta incidencia de auroras boreales. Sin embargo cabe mencionar la limitada validez del ^{14}C con indicador de la actividad solar para el periodo moderno, debido a la enorme cantidad de carbón introducida por la creciente combustión de la humanidad de combustibles fósiles, en el curso de los últimos 100 años. (Fig. 6)

Dentro de los procesos de metodología científica llevado a cabo por Eddy, el siguiente paso era el de investigar ¿a qué se debe esa variabilidad de la actividad solar, que funciona como un reloj de cuerda?: de acuerdo al consenso moderno sobre el origen del ciclo de actividad solar,

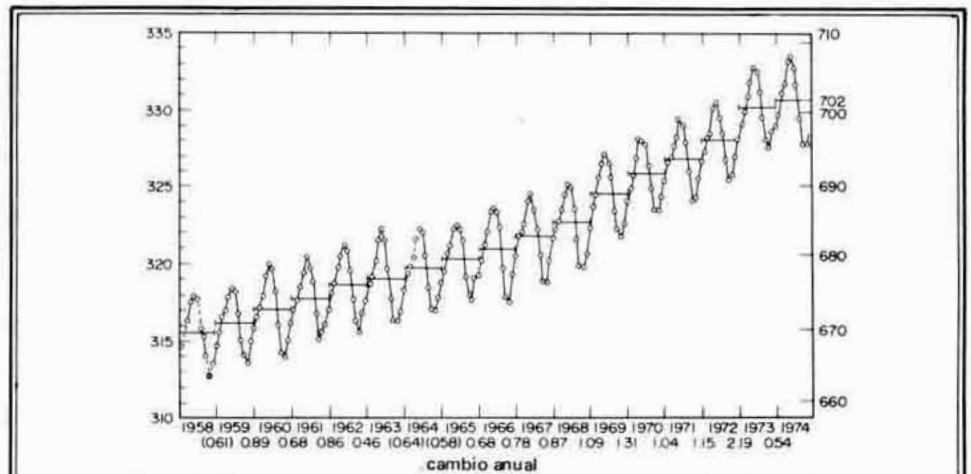


Fig. 6 Incremento en el contenido atmosférico de CO_2 sobre las últimas dos décadas. La escala de la izquierda describe la concentración de CO_2 en partes por millón por unidad de volumen. La escala de la derecha da la masa de carbono en la atmósfera en unidades de 10 millones de toneladas. Superpuesta a las oscilaciones regulares de las estaciones se muestra la tendencia a largo término. (Datos del Observatorio de Mauna Loa compilados por C. Keeling et al.)

descrito en: "El sol, nuestra estrella I", se cree que la rotación diferencial del Sol produce el ciclo de manchas, a través de la acción de un proceso dinámico en el que campos magnéticos asentados profundamente en el Sol, interactúan con la rotación diferencial superficial, generando corrientes eléctricas que a su vez inducen los campos magnéticos de las manchas solares. Así entonces, si hubiese una marcada anomalía en el número de manchas, debe de esperarse encontrar una anomalía correspondiente, ya sea en el campo magnético solar o en la rotación diferencial superficial. En efecto, las investigaciones de Eddy en base a los datos publicados en el siglo XVII por Johannes Hevelius en su libro Selenografía (estudio de la luna) indican que alrededor de 1640, previo al inicio del mínimo de Maunder, la tasa de rotación ecuatorial del Sol se incrementó por un factor de 3 con respecto a la tasa de rotación en los polos, en tal forma que la rotación completa se llevó a cabo con un día entero más rápido que en 1625. La rotación fue entonces 4 o/o superior a la rotación observada actualmente. Por otro lado, estudios recientes de los ciclos de actividad 19, 20 y 21,

demuestran que también a corto término existe una relación inversa entre la rotación ecuatorial del Sol y el número de manchas solares. Al respecto el número de manchas en los 3 últimos ciclos ha decrecido gradualmente, desde el impresionante número de Wolf $R=190$ en 1959, $R=105$ en 1970 $R=70$ en 1981, y correspondientemente la rotación del Sol se ha acelerado: entre 1967 y 1976 la rotación ecuatorial se ha incrementado en un 5 o/o, es decir de 7,200 a 7,600 km/h. El incremento es aún mayor, cerca de 15 o/o, en latitudes laterales al ecuador, y decrece rápidamente hacia los polos. Ahora bien, una vez que se estableció la evidencia de ausencia de manchas de manera inambigua, resta ahora esclarecer que tal anomalía en la actividad solar entraña cierta variabilidad de la luminosidad del Sol, y consecuentemente alteraciones climatológicas en la Tierra.

La intercomparación de estas observaciones solares con las variaciones climáticas del pasado, dan relieve a una correlación neta de mínimos y máximos de actividad con los periodos de enfriamiento y calentamiento global de la Tierra, como se muestra en la figura 5. En particular, el míni-

mo de Maunder corresponde adecuadamente a un pequeño periodo glacial conocido en Europa como la pequeña "edad de hielo", en que la temperatura promedio fue de 1°C menor que la temperatura promedio actual. En ese lapso los glaciares alpinos avanzaron más drásticamente, como no había sucedido desde la glaciación precedente, 15,000 años atrás. (En el bloque inferior de la figura 5 no aparece ilustrado, pues desborda netamente el eje inferior de la gráfica). En ese periodo se extinguió una colonia escandinava de origen muy antiguo, establecida en el sureste de Groenlandia, que quedó aislada del resto del mundo por bloques de hielo que se acumularon en el curso de los años. Debe enfatizarse, que esta intercorrelación con el mínimo de Maunder no es puramente casual, sino una variación real de la luminosidad del Sol, pues los registros indican una intercorrelación neta de la temperatura y la actividad solar a partir del siglo XI -en que se tiene confiabilidad de los datos. Este es el caso del periodo medieval de máxima actividad (1100-1300) que coincide con la "época medieval calurosa". De acuerdo a las teorías climáticas, estos mínimos y máximos pueden ser producidos por excursiones de la luminosidad solar del orden del 1 o/o.

Queda pues establecido mediante variaciones climáticas terrestres, que la luminosidad del Sol es variable, y que aparentemente uno de los principales agentes responsables de ello es su actividad magnética. Aunque esto último puede ser cuestionado, pues el hecho de una correlación significativa entre $A =$ la luminosidad solar y $B =$ la actividad solar, no implica con ello que B origine A o viceversa, sino que quizá C provoque a ambos A y B ; ¿pero en ese caso, qué cosa puede ser C ?, en todo caso C debería estar asociado de alguna manera a la

cadencia de rotación diferencial del Sol. Curiosamente las variaciones de la actividad solar durante el ciclo oncenal no afecta lo suficiente el valor de la luminosidad solar como para tener efectos notables sobre el clima terrestre, y solamente (como se ve en la figura 5) la envolvente conectante de los picos de varios ciclos a largo término, correlaciona sus mínimos y máximos con periodos de climas fríos y calientes, que se extienden entre 50 y 150 años. Parece ser que esa envolvente puede reflejar cambios en el balance de radiación solar de unos pocos o/o, que son bastante independientes de cuando el ciclo oncenal está en su máximo o mínimo. Además parece ser que existe también cierta relación entre la actividad solar y la temperatura promedio de los inviernos (como se ilustra en la figura 7) para el caso particular de Holanda, a partir de 1640. Así pues, las ligeras variaciones a corto término de la constante solar (0.5 o/o) alrededor de su valor promedio pueden ser en todo caso la clave para interpretar, por ejemplo, el vínculo con las sequías terrestres. A este respecto se pueden mencionar algunas inferencias de variación de la luminosidad a corto término y que por lo tanto no afectan el clima terrestre, pero que contribuyen a evidenciar tal variabilidad de nuestra estrella.

Por variaciones a corto término se entiende convencionalmente aquella de periodo menor a los 30 años aproximadamente (10^9 seg.). Se sabe que los cambios relativamente importantes en el flujo de rayos-X, ultravioleta o radio-ondas están asociados con las manifestaciones de la actividad magnética de la atmósfera del Sol; sin embargo todas ellas son variaciones por abajo de una diezmilésima de la constante solar, quedando entonces debajo de los umbrales actuales de detección de los radiómetros. En realidad se concibe fácilmente la ínfima probabilidad de que el incremento de radiación de banda ancha (prácticamente todo el espectro electromagnético) que ocurre inmediatamente al inicio de una fulguración solar, sea balanceada exactamente por un decrecimiento correspondiente del continuo termal solar, pero es difícil demostrar directamente este tipo de cambio de luminosidad total, por quedar debajo de los umbrales de detección.

Entre las variaciones de mayor amplitud, en primer lugar se tiene la variabilidad de luminosidad con periodo de 22.36 años, que se obtiene del indicador climático proveniente del cociente de isótopos Deuterio a Hidrógeno (D/H), que se mide en la celulosa extraída de los árboles de piña; Este indicador es de los de mayor confiabilidad debido a su constancia en el muestreo estudiado, que cubre un pe-

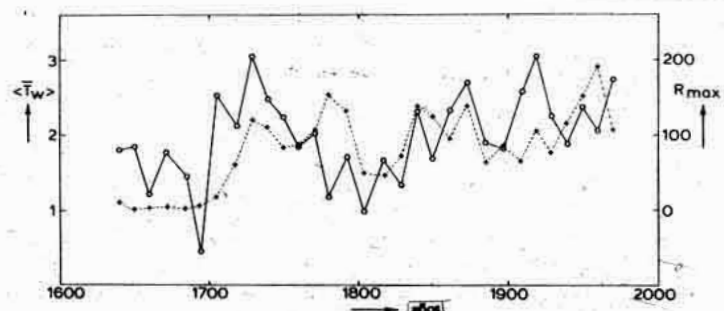


Fig. 7 Relación entre la Temperatura invernal promedio T en Holanda (línea punteada y escala izquierda) y el número de Wolf (línea sólida y escala derecha), acorde a la compilación de C. de Jager.

riodo de mil años. Las implicaciones posibles de este indicador de variabilidad solar sobre la temperatura terrestre muestra que los máximos de temperatura, indicados en 1891, 1913.3, 1935.7 y 1958 no están muy alejados de las sequías en las altiplanicies, ocurridas en 1890, 1913 y 1954.

La estrecha correspondencia de este periodo de variabilidad con el ciclo magnético de 22 años en el Sol, así como el desfaseamiento con todo tipo de actividad magnética superficial, indican que la variabilidad de luminosidad es inducida en el interior del Sol. Tal modulación de los fotones provenientes del horno solar puede estar probablemente asociada con campos magnéticos en la base de la zona convectiva. Tal vez el objeto C, mencionado anteriormente, responsable tanto de la modulación de luminosidad como del ciclo magnético de manchas, es un "cronómetro interno", quizá del tipo de un oscilador hidromagnético, tal que las tensiones de Maxwell asociadas sean las responsables de afectar el transporte de energía a la superficie, y así de modular la luminosidad solar. Dicho oscilador debe estar estrechamente asociado a la tasa de rotación diferencial del Sol, de manera que la modulación del flujo de energía solar sea mayor a medida que se acelere la rotación del Sol y se frene el transporte del campo magnético a la superficie. El desfaseamiento de esta variabilidad solar (D/H) de periodo de 22.36 años, con respecto a la actividad superficial, puede ser debido a un corto tiempo de tránsito para que el campo magnético, responsable de la actividad superficial flote a la superficie, donde años después se manifiesta en playas, fáculas, prominencias, fulguraciones, y transientes coronales.

La estrecha correlación entre la fase del ciclo de manchas con el pico en el número de manchas,

implica que tal tiempo de tránsito sería menor mientras más activo se encuentre el Sol. Esta hipótesis sobre el "cronómetro interno" podría ser corroborada, simplemente estableciendo una correlación entre la luminosidad solar y el ciclo magnético de manchas, tal que el ciclo de manchas presente un retraso en fase correspondiente al tiempo de tránsito del transporte de campo magnético a la superficie; sin embargo para ello se requeriría tener medidas de luminosidad solar por al menos los últimos 300 años.

Evidencias complementarias de esta variabilidad solar asociadas al campo magnético, aparecen con el reciente descubrimiento, en 1969, de los llamados puntos brillantes, que como dijimos anteriormente en ², contienen un flujo magnético total, en la superficie global del Sol, superior al contenido en las manchas solares. Al efecto, observaciones de radio emisiones de longitud de onda de 9.4 cm., muestran que el número de estos puntos brillantes declina acorde al ciclo oncenal. Esto implica que el flujo de campo magnético no solamente está asociado de alguna manera a la modulación de la luminosidad que nos llega a la Tierra en forma de luz y calor (en el visible, IR y UV), sino que también afecta de alguna manera la luminosidad en otras longitudes de onda, conspicuamente, la disminución del flujo solar en radio-ondas asociado a los puntos brillantes, durante la declinación del ciclo número 20 de actividad solar, de algunas docenas de miles de Jansky (unidad de flujo solar en radio) a tan solo 1200 Jansky.

Otra prueba adicional de la variabilidad del Sol a corto término, es el establecimiento en el curso de las últimas tres décadas, de que

2. El Sol I, en Información Científica y Tecnológica ed. por CONACYT, No. 92, 1984, p.p. 17-28, en donde el autor abunda en el tema.

el Sol presente oscilaciones similares a las pulsaciones de una estrella variable, lo que contradice la suposición convencional de una estrella estática y estable contra pulsaciones. Pulsaciones globales en el Sol de periodo 5 minutos, rapidez de 1600 Km/h y extensión de 1000 a 16,000 km., así como pulsaciones locales de periodos desde 15 minutos hasta 2 hrs. 40 min., demuestran que de hecho el Sol no es más que otra estrella pulsante. Se ha demostrado recientemente que en cierta región de la atmósfera solar, las fluctuaciones de temperatura asociadas a estas oscilaciones son mucho más importantes que lo que se asumía bajo la hipótesis de un Sol estático.

Sin embargo, no hay evidencia de que ello afecte notablemente la luminosidad solar y en consecuencia el clima terrestre. La presencia de esas oscilaciones, principalmente las más lentas, no congenian con la actual concepción de la generación de energía solar. El origen de tales pulsaciones es aún de carácter hipotético, sin embargo, existe un cierto consenso de que pueden deberse al detenimiento temporal del flujo de energía proveniente del interior solar, en las capas subsuperficiales de la fotosfera, hasta que se libera causando una oscilación.

Una posibilidad de confirmar las variaciones de luminosidad fue propuesta por Carl Sagan en los términos siguientes: supóngase que la luminosidad solar aumenta y disminuye a largo término, en un factor del orden de 5 o/o, acorde a evidencias Helio-geofísicas y paleoclimatológicas. Si el Sol está variando, debería esperarse que las estrellas similares al Sol también varíen. La respuesta a ello se encuentra en el estudio de los cúmulos estelares; las estrellas de un cúmulo tienen la misma edad, la misma composición química y están situadas a la misma distancia de nosotros, en consecuencia su temperatura y luminosidad deben estar estrechamente correlacionadas. El cúmulo del Pesebre (Praesepe) se utilizó para tal estudio: un diagrama de

Hertzprung-Russel (ver figura 17)² se construyó para todas las estrellas que componen ese cúmulo. La secuencia principal correspondiente, es una curva particularmente bien definida, cuya zona correspondiente a las estrellas de tipo solar muestra la posibilidad de una dispersión alrededor de la curva, que puede variar hasta un 10 y 20 o/o de la luminosidad. De manera más específica, se puede mencionar que la fotometría de estrellas enanas tipo tardías, indica grandes variaciones de varias decenas de porcentaje (o/o) en luminosidad, en tanto que en las estrellas tipo G, muy similares al Sol, no se observan variaciones por arriba de un tope de 0.8 o/o en el lapso de una decena de años, lo cual es consistente con el nivel de variabilidad que se atribuye a nuestra estrella, en la literatura. También cabe mencionar que dentro de las posibles variaciones a largo término de la luminosidad, en relación de la reciente puesta en evidencia de que el radio del Sol decreció en $0.34'' \pm 0.2''$ de arco, o sean 240 km, en 264 años (1715-1979), se ha estimado un decremento correspondiente de 0.47 o/o en luminosidad, sin embargo este valor no incluye la modulación de la luminosidad por la liberación de la gran cantidad de energía gravitacional provocada por ese cambio de radio. Estudios más vastos en esta dirección están en vías de realizarse por Sofía y colaboradores del Goddard Space Flight Center de la NASA, para determinar el periodo de variación de esas contracciones y expansiones, supuestamente de la zona convectiva.

Entre tanto, queda entonces claro que el Sol es una estrella magnética variable, cuyos efectos de variabilidad de su luminosidad sobre el clima terrestre son a largo término y con una amplitud relativamente pequeña. Sin embargo, a corto término las transformaciones inducidas por el hombre en nuestra atmósfera, pueden tener consecuencias mucho más inmediatas e importantes al lado de las que pueden ser inducidas por la variabilidad solar.

Para conscientizar esta aseveración, hay que recordar que si nuestro planeta estuviese desprovisto de su atmósfera, la temperatura promedio se encontraría entre -23 y -20°C , en lugar de los $+15$ a $+20^{\circ}\text{C}$ en que se encuentra generalmente. Esta diferencia proviene del llamado "efecto de invernáculo" de la atmósfera; es decir, la energía solar que llega a nuestro planeta es reflejada en un 30 o/o aproximadamente (el albedo terrestre) y reemitida hacia el espacio, el resto es absorbida y almacenada en el suelo mismo, que después de calentarse remite esa energía, pero ahora en forma de radiación infrarroja, la cual a su vez es absorbida en la atmósfera de la Tierra, lo que determina el valor de la temperatura observada.

Dicha absorción es debida principalmente a la presencia de vapor de agua y de óxido carbónico en la atmósfera. Si hubiera por ejemplar CO_2 , la radiación infrarroja sería enormemente absorbida y la temperatura sería más baja, lo que ejemplifica lo mencionado anteriormente, a propósito de la dificultad de disociar los efectos de variabilidad solar de las variaciones que podrían eventualmente inducirse sobre la composición química por la acción del hombre, dentro del contexto de variaciones climáticas.

A este respecto los diversos modelos de evolución solar sostienen que la luminosidad actual es superior en un 20 a 30 o/o de lo que era hace 4600 millones de años, al iniciarse la era de fusión termonuclear del hidrógeno. Si la composición química de la atmósfera terrestre no ha variado, entonces su temperatura en esa época debió haber estado por debajo de 0° . Toda el agua de los océanos debió entonces encontrarse en forma de hielo. Además, una vez que la Tierra se hubiese congelado es poco probable que se hubiese derretido, porque el poder reflector (el albedo) del hielo es tan elevado, que toda la luz recibida por la Tierra dentro de esa eventualidad, habría sido remitida al espacio; es decir si la Tierra algu-

na vez estuvo completamente congelada, la luminosidad del Sol podría haber aumentado sin que hubiera la posibilidad de que se fundiese el hielo, una vez formado éste. Sin embargo existen numerosas evidencias de que el agua en forma líquida existía hace 3500 millones de años. Debemos entonces concluir que la composición química de nuestra atmósfera era diferente en aquel entonces con respecto al presente y compuesta principalmente de elementos de absorbentes de la luz infrarroja (H_2O , NH_3 , CO_2 y CH_4) con el fin de mantener el efecto de invernáculo lo suficientemente eficaz y poder explicar temperaturas no muy diferentes a las actuales. Sin esta suposición, la teoría de estructura interna y evolución estelar se confrontaría con un nuevo dilema a solventar: en efecto, si un modelo refinado de clima terrestre, con una luminosidad inicial 25 o/o inferior a la actual; demuestra que no es posible fundir el hielo de la superficie terrestre, entonces acorde a las evidencias de agua líquida en el pasado, ello conduciría a cuestionar nuevamente la validez de los modelos de estructura interna, y por ende de los procesos convencionales de generación de energía solar, pues para explicar la presencia de agua la luminosidad inicial no debería ser mayor de un 5 o/o de la actual.

INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y ELECTRONICA

El INAOE tiene como objetivo preparar investigadores, profesores especializados y técnicos en Astrofísica, Óptica y Electrónica. Procurar la solución de problemas científicos y tecnológicos relacionados con las citadas disciplinas y orientar sus actividades de investigación y docencia hacia la resolución de los problemas del país en que inciden las disciplinas mencionadas.

Actualmente el INAOE ofrece las Maestrías en Óptica y Electrónica y se proyecta iniciar la Maestría en Instrumentación Astronómica.

Para información adicional comunicarse con el Sr. Benjamín Romero, jefe del Depto. de Comunicación Social Sta. María Tonantzintla.

A.P. 51 y 216, Puebla - 72000, Puebla.
Tel. 47-05-00; 47-04-19
y 47-03-57

Sin pretender entrar en detalles, dicho sea de paso, algunos modelos de evolución climática del sistema solar predicen que dentro de aproximadamente 4000 millones de años, la Tierra se asemejará al actual planeta Venus, con una presión barométrica 300 veces superior a la presente, debido únicamente a la evaporación de agua; afortunadamente en esa misma época la temperatura global de Marte será aproximadamente igual a la nuestra en el presente. Si existen para entonces seres vivientes en la Tierra, estarán probablemente tentados a cambiar de residencia, lo cual seguramente estará a su alcance.

Entre tanto, el hombre, por su genio inventivo o destructivo, tie-

ne también a su alcance los medios para modificar la atmósfera de su planeta. Es así que en el periodo 1958-1981, la concentración atmosférica de CO_2 se ha incrementado en un 7 o/o (figura 6) y desde el inicio del siglo en un 15 o/o, en razón de la utilización cada vez más abundante de combustibles fósiles (gas, petróleo, etc.); se prevé que el contenido atmosférico se duplique con respecto al actual en la primera mitad del siglo próximo. Si nada se hace para frenar este fenómeno, de acuerdo a recientes y muy populares estudios, se estima que un incremento de $3^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ es de esperarse como resultado de la duplicación del actual contenido atmosférico de CO_2 , lo cual aca-

rearía consecuencias drásticas sobre el clima y muy severas sobre nuestras condiciones de vida.

Este es el porvenir que puede experimentar nuestros nietos y los más jóvenes de nuestros hijos, si no se globalizan, a todo el planeta, los programas que se generen para decelerar la concentración de CO_2 atmosférico. Vemos entonces que la variabilidad del Sol en estas condiciones, no entraña nada de dramático en comparación con la obra del hombre. Está en nosotros el saber preservar nuestra naturaleza y ser lo suficientemente razonables para dejar al Sol hacer su labor sobre nuestro medio ambiente, sin mezclar nuestras desafortunadas intervenciones.



INSTITUTO NACIONAL
DE ASTROFISICA,
OPTICA Y ELECTRONICA.

