

EL SOL Y EL CLIMA TERRESTRE

Josep Maria Trigo i Rodriguez

La actividad solar determinan sustanciales cambios en el clima terrestre

JOSEP MARIA TRIGO I RODRIGUEZ es divulgador científico, licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Valencia y operador de Sistemas del Planetario de Castellón.

El Sol, la estrella más cercana a la Tierra, ha ejercido desde siempre una influencia fundamental para el florecimiento y la evolución de la vida dado que es su principal fuente de energía. La estabilidad luminosa del Sol durante los últimos cientos de millones de años ha permitido la evolución sin grandes sobresaltos de la vida en la Tierra. Pero en el Sol se han producido también a corto y largo plazo ciertos cambios, algunos mal conocidos, que parecen haber afectado apreciablemente a su luminosidad y quizá también la propia transmisividad de la atmósfera terrestre determinando cambios en la climatología del planeta. Los cambios en la actividad solar y en la geometría orbital y geomagnetismo de la Tierra, pueden ser algunos influyentes factores fundamentales en la propia evolución de las especies.

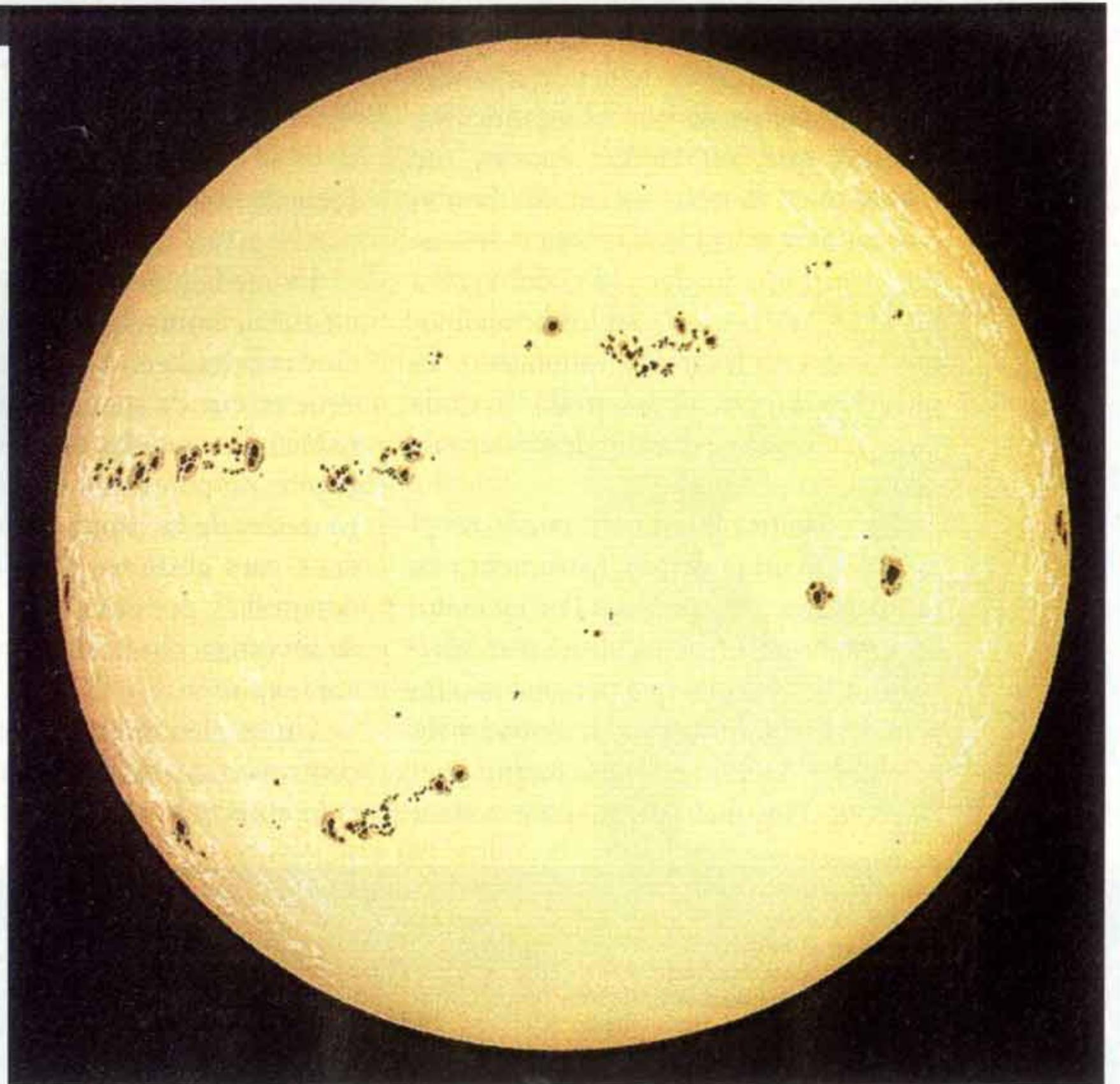


Figura 2. Coincidiendo con las épocas de mayor actividad el Sol se encuentra «cubierto» de manchas solares. Los heliofísicos analizan su número, distribución y características para conocer mejor los fenómenos magnéticos que se desarrollan periódicamente en la fotosfera.

Parentemente para nosotros, observadores situados sobre la superficie terrestre, el Sol está fijo en el cielo y es la Tierra la que con sus movimientos de rotación y traslación causa los dos movimientos aparentes (diurno y ánuo) del Sol en el cielo. Sin embargo algo más difícil de vislumbrar es que el Sol también se mueve, ya que de hecho no hay nada «quieto» en el Universo. Nuestra estrella viaja a través de uno de los brazos espirales de nuestra galaxia a la nada despreciable velocidad de unos 20 km/s. A su vez la galaxia se desplaza, del mismo modo que se mueve el Grupo Local de galaxias al que está sometida gravitatoriamente la nuestra, que a la vez se mueve interactuando con el gigantesco cúmulo de galaxias de Virgo, y así sucesivamente. Dado que los planetas y demás cuerpos (asteroides, cometas, etc.) están sometidos a la atracción gravitatoria solar son «arrastrados» por nuestra estrella, en un viaje continuo a través de nuestra galaxia. Es un hecho que nuestro planeta estará siempre ligado a la influencia Solar y

compartirá con él un destino común.

El Sol en la actualidad está produciendo energía en su interior de manera muy estable. Si no fuese así ni siquiera podríamos estar aquí para contarlo ya que la vida en la Tierra no se hubiese podido desarrollar. El Sol emite un flujo de energía aproximadamente constante a partir, principalmente, de la fusión nuclear de núcleos de hidrógeno que se convierten en Helio produciendo también energía. La figura 1 indica la cadena de reacciones protón-protón que se generan en el Sol.

La actividad del Sol cambia manifiestamente a corto plazo y ello se manifiesta en ciertas estructuras en sus capas externas. Así cuando el Sol está muy activo, aparecen manchas solares y fulguraciones que se hacen más frecuentes

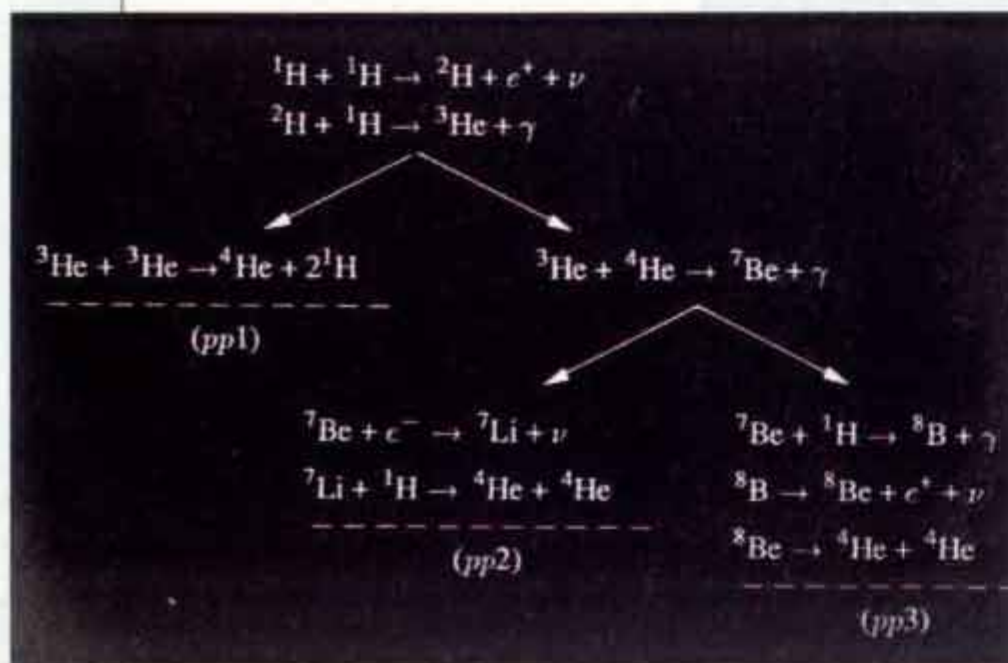


Figura 1. La cadena protón-protón se denomina al ciclo de reacciones generadoras de energía más eficientes para estrellas como el Sol. Dos protones (${}^1\text{H}$) al colisionar formarán un núcleo de deuterio (${}^2\text{H}$) que posteriormente reacciona con otro protón para formar un átomo de helio (${}^3\text{He}$). La reacción genera energía en forma de un neutrino (ν) que no interactúa con la materia y escapa al espacio y un fotón (γ) que junto a otros actuarán como propagadores de la energía en el interior solar. Notemos también que en la cadena pp2 aparece litio y en la pp3 berilio y boro.

cuando la actividad aumenta. Pero, hasta hace unas décadas no se supo a ciencia cierta lo que producía esas violentas manifestaciones en la fotosfera. Hoy sabemos que estas pequeñas fluctuaciones en la actividad solar producen cambios apreciables en el clima de la Tierra.

El Sol es una estrella típica, una bola de gas de unos 700.000 km de radio formada por la atracción gravitacional mutua de sus moléculas. En su interior se alcanzan temperaturas superiores a 15 millones de grados centígrados. En tales condiciones tienen lugar procesos de fusión nuclear en los que se sintetizan nuevos elementos más complejos generando gran cantidad de energía. Ésta se propaga por difusión radiativa en su interior aunque poco antes de llegar a la fotosfera la temperatura ha decrecido hasta algo más del millón de grados centígrados, momento en el que para que el proceso de transporte sea más eficiente comienza el fenómeno de convección. La convección consiste en síntesis en que la materia de esa zona burbujea para propagar más eficazmente la energía que se acumula en el interior. Como resultado la fotosfera consiste en una efervescencia incesante de burbujas gigantes de un tamaño medio próximo a los 1.000 km de diámetro que emergen a la apabullante velocidad de unos 2.000 km/h. Al llegar a la fotosfera la temperatura ha bajado considerablemente hasta unos 6.000 °C pero poco después, a sólo unas decenas de miles de kilómetros de ella la temperatura vuelve a subir varios millones de grados. Este enorme y ardiente halo de plasma,⁽¹⁾ que es visible en parte durante los eclipses solares se denomina corona solar. En esta región se producen las erupciones solares, unas tremendas explosiones que son enormes fuentes de energía que saldrá despedida al espacio formando el denominado viento solar.⁽²⁾

Las burbujas que generan la granulación solar arrastran flujos de partículas cargadas, creando en consecuencia corrientes eléctricas y campos magnéticos colosales. Como podemos recordar de las experiencias realizadas con imanes y limaduras de hierro, que las líneas del campo magnético se evidencian al situarse estas limaduras ferromagnéticas a lo largo de ellas, cerrándose sobre sí mismas. En la fotosfera del Sol se hacen evidentes de una manera similar ya que la materia se extiende sobre estas líneas de campo formando colosales arcos de fuego que primero se separan de la fotosfera y posteriormente vuelven a caer en ella. Estas tremendas eyecciones de material se producen a lo largo de los arcos magnéticos calentando el medio circundante de tal manera que originan la inmensa temperatura del plasma de la

corona. Todos estos procesos han sido seguidos en la última década por diversas sondas espaciales como el Yohkoh que captan el Sol en Rayos X desde el espacio ya que la atmósfera de la Tierra no permite que esta radiación llegue a la superficie terrestre. Además este tipo de fenómenos no suelen aparecer en luz visible.

Generalmente lo que sí podemos ver con un telescopio⁽³⁾ son las denominadas manchas solares. Éstas son los puntos de unión con la fotosfera de estos arcos magnéticos, oscuros por contraste con el brillante fondo. Esto se produce ya que en el interior de ellos la temperatura del material tiene algo menos de 1.000 °C que el resto de la fotosfera. De este modo la existencia de muchas manchas revela gran cantidad de arcos magnéticos. Cuando éstos chocan entre sí se producen explosiones y violentas eyecciones de material, auténticas tormentas de fuego que se denominan erupciones solares o fulguraciones.

Desde hace varios siglos se sabe que el número de manchas solares aumenta y disminuye en un período de 11 años, desde un mínimo hasta un máximo de manchas solares. Como podemos imaginar un gran número de manchas indica una gran cantidad de fulguraciones, res-

nan e incluso desaparece y se invierte a lo largo de milenios. Hoy en día se sabe que la radiación más penetrante contenida en el viento solar puede afectar a la vida del planeta produciendo alteraciones apreciables en los organismos vivos (mutaciones, cánceres, etc.) aunque nuestro planeta posee un escudo protector muy eficiente: los cinturones de Van Allen.

Cuando llega el viento solar a las proximidades de un planeta se forma una onda de choque al interactuar con su campo magnético. Ésta en el caso de la Tierra desvía las partículas del viento solar mucho antes de que entren en contacto con la ionosfera terrestre. Los primeros satélites que estudiaron la radiación en la atmósfera terrestre descubrieron unas zonas que abarcan la Tierra alrededor del ecuador geomagnético y que se denominan «Cinturones de Van Allen». Hay varios cinturones que almacenan estas partículas cargadas. El primero se extiende entre los 2.400-5.600 km de altura en latitudes entre los $\pm 30^\circ$ que contiene protones de 100 MeV y electrones entre 20 y 500 KeV. El segundo se sitúa entre 12.000 y 20.000 km poseyendo electrones y protones de menor energía. Finalmente entre unos 50.000 a 60.000 km existe otro cinturón

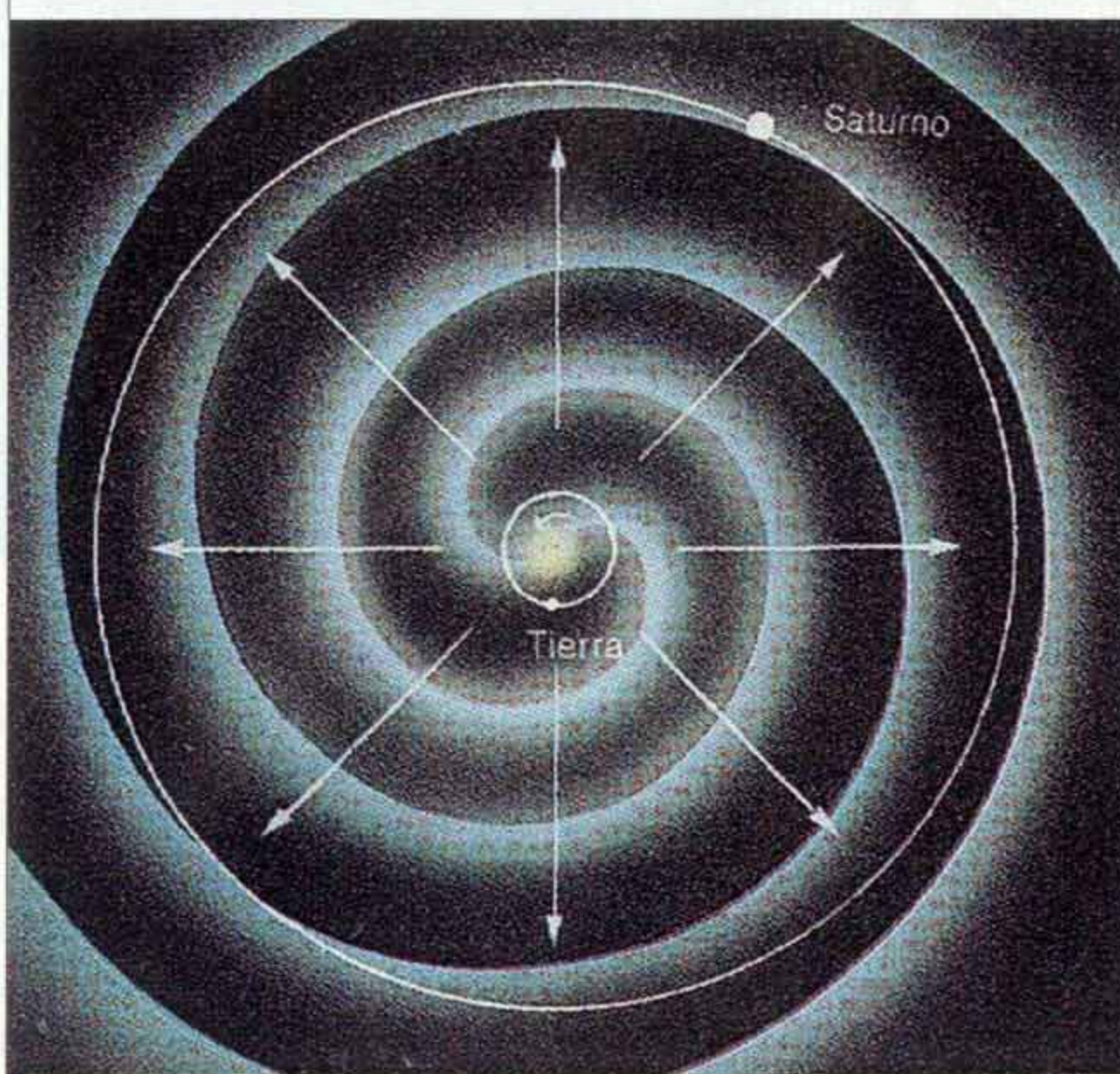


Figura 3. El viento solar se propaga en forma espiral debido a la rotación solar desde que es emitido por el Sol. Es un plasma (gas ionizado) a una temperatura de 100.000 K, constituido por protones, iones y electrones lanzados a gran velocidad por el Sol. Su origen son las fulguraciones que ocurren en la corona solar en donde estos chorros alcanzan velocidades suficientes para escapar del campo gravitatorio solar y propagarse en espiral hacia los planetas a unas velocidades próximas a los 450 km/s.

ponsables de la emisión de intensos chorros de partículas cargadas que se desplazan por el medio interplanetario a gran velocidad. Cabe preguntarse, ¿tienen estas partículas alguna influencia sobre nuestro planeta?

El magnetismo terrestre se produce a causa de los movimientos fluidos que tienen lugar en el núcleo eléctricamente conductor del planeta. Sin embargo cambia con el tiempo ya que es más intenso cuando el fluido se mueve en régimen permanente, decrece cuando los movimientos del núcleo se distorsio-

que alberga electrones con energías mucho menores de unos 200 eV. Esta región denominada magnetosfera nos protege de estas partículas que quedan allí almacenadas.

Diversos investigadores entre los que destaca H.G. Muller demostraron que los rayos X y ultravioletas pueden aumentar el ritmo en que se producen mutaciones. Sus efectos son pequeños pero con la acumulación gradual de un gran número de mutaciones se favorecería la variación progresiva de los organismos vivos. Por ello, un hecho intere-

(1) Un plasma podemos definirlo como un gas en el que un apreciable número de los átomos que lo forman están ionizados, sometidos a altas temperaturas.

(2) Del Sol se desprende el viento solar, un plasma con una temperatura de unos 100.000 °C formado de protones, iones y electrones que son emitidos en las explosiones solares.

(3) No podemos mirar el Sol con instrumentos ópticos, ¡hay peligro de ceguera!, deberemos usar filtros especiales que protejan nuestro sensible ojo de su luminosidad.

sante a considerar por su importante influencia en la evolución de los seres vivos son los cambios de polaridad y variaciones en el campo magnético terrestre. En particular cabe analizar la manera en que estas partículas afectarían a los seres vivos en aquellas épocas en que el campo magnético decrezca o se anule. Las mutaciones, concebidas dentro del complejo mecanismo de la evolución de las especies, serían en esos momentos especialmente probables, favoreciéndose la aparición de mejoras a largo plazo, por un complejo mecanismo de adaptación, en los seres vivos.

Desde los años setenta se han realizado interesantes estudios sobre sedimentos marinos para comprobar la intensidad e inclinación del campo magnético terrestre en el pasado. Los cambios de polaridad aparecen del análisis del magnetismo fósil en las rocas que se formaron hace mucho tiempo ya que aquellos sedimentos que poseen rocas magnéti-

los cambios de temperatura ocurridos a lo largo de millones de años. Al parecer, según los estudios realizados hasta ahora, las épocas de campo magnético más intenso corresponden a períodos terrestres más fríos.

Sin embargo, la explicación de esta influencia entre el magnetismo y el clima no está nada clara. Entre otras posibles explicaciones se ha propuesto que entrada de una mayor o menor cantidad de partículas cargadas en la atmósfera terrestre pueda cambiar apreciablemente su transmisividad, aunque no se conoce bien cómo puede funcionar este mecanismo. Tampoco hay confirmación experimental por intervenir múltiples y complejos factores pero algunos autores señalan que las partículas del viento solar que inciden en la atmósfera producen intensas corrientes eléctricas a unos 100 km de altitud, siendo incluso capaces de modificar los modelos de circulación atmosférica debido a los procesos de magnetismo inducido en la

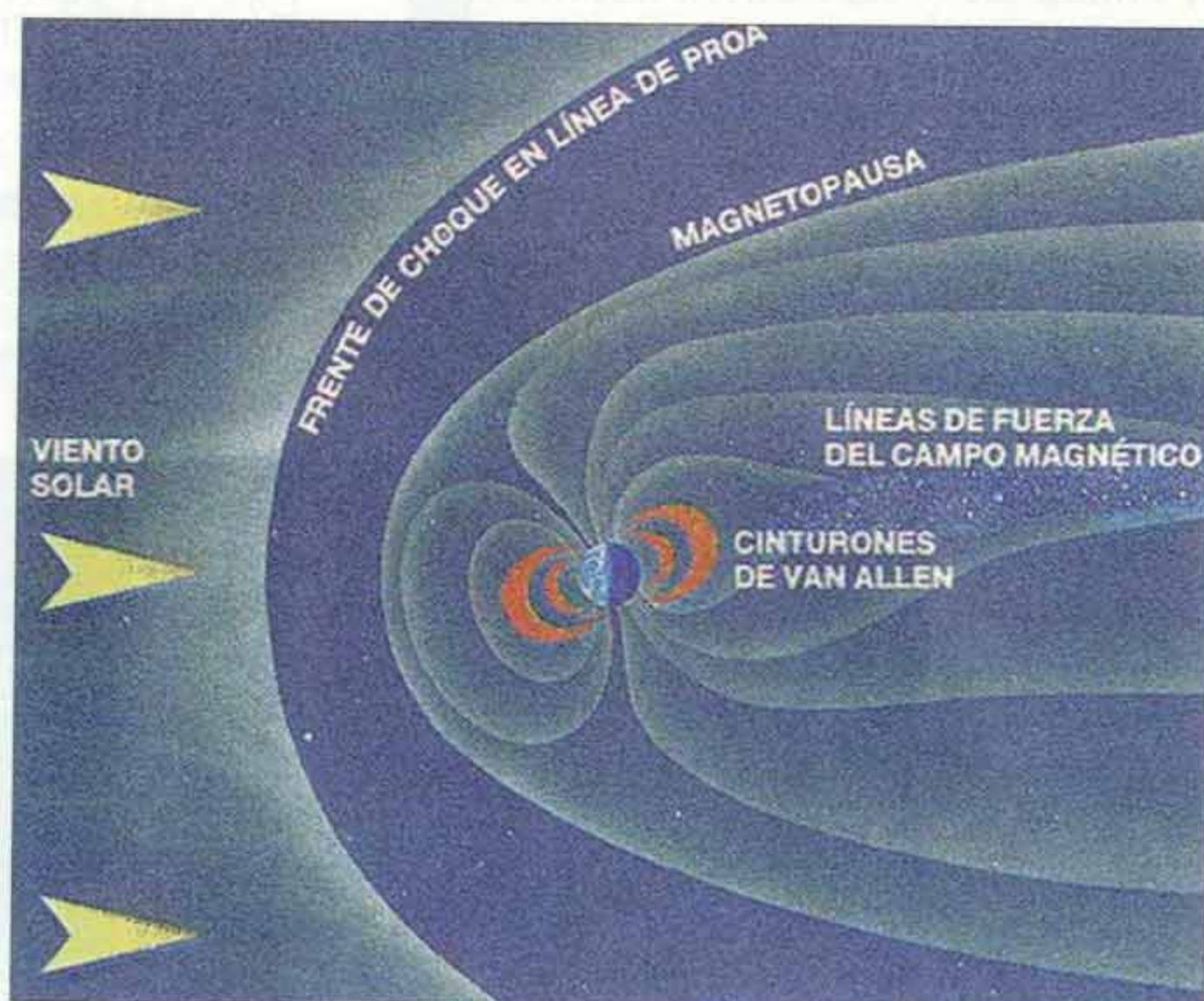
que en ellas parecen producirse los intercambios de energía con las partículas cargadas provenientes del Sol. En general se deduce que cuando el Sol está tranquilo la temperatura promedio en la Biosfera terrestre decrece muy poco, aunque de manera apreciable.

A una escala mucho mayor el nivel de actividad medio del Sol es vinculable a variaciones en la atmósfera terrestre responsables de cambios muy acusados que se corresponden al parecer con las pequeñas glaciaciones y los óptimos climáticos. Como ya se mencionó, se ha pensado que puede producirse principalmente porque la corriente de partículas cargadas que forman el viento solar pudiesen afectar la transparencia de la atmósfera terrestre. De hecho se puede comprobar que la irradiación solar media se mantiene prácticamente constante⁽⁴⁾ y por lo tanto debe haber algún otro mecanismo que coincidiendo con las épocas de mayor actividad permita el paso de mayor radiación a la superficie de la Tierra. Por ello también se busca la interconexión entre el Sol y el clima terrestre en los efectos que el viento solar puede causar en la estratosfera. Ésta es la capa que contiene el ozono, un compuesto variable que según su mayor o menor concentración deja pasar mayor o menor cantidad de radiación UV muy energética. Se ha comprobado que tras procesos que eliminan el ozono, aumenta la cantidad de luz UV que llega a la superficie, causando un incremento en la temperatura.

En el *National Center for Atmospheric Research* entre otros centros meteorológicos de los EUA se han realizado interesantes estudios sobre cómo parece afectar la actividad solar al clima terrestre. Así comparando el nivel variable de actividad de manchas solares desde el siglo XVII con las variaciones de temperatura de la Tierra han llegado a interesantes conclusiones. Se ha descubierto una correlación entre los aumentos y descensos en la temperatura media y la mayor o menor cantidad de manchas solares.

No debemos olvidar sin embargo, cómo establece la teoría climática de M. Milankovic, que existen otros factores tan o más importantes como la actividad solar. Por ejemplo, estudios actuales muestran que los diversos cambios en la órbita e inclinación terrestre alteran el equilibrio de calor recibido por los dos hemisferios terrestres. Por ejemplo, tanto la precesión de los equinoccios, la variación del ángulo de inclinación del eje terrestre o los cambios de excentricidad en la órbita terrestre introducen alteraciones climáticas generando ciclos de unos 22.000, 41.000 y 100.000 años respectivamente. Por la enorme y com-

Figura 4. Los cinturones de Van Allen son el escudo natural más eficaz para proteger a los seres vivos de las partículas cargadas altamente energéticas que constituyen radiaciones solares más peligrosas, capaces de producir mutaciones en las células.



cas se alinean con el campo magnético en el momento de su formación. Una vez solidificadas su magnetismo remanente nos proporciona un valioso registro del campo magnético de la Tierra en aquellas épocas. De este modo se han verificado ciertas inversiones en el campo magnético terrestre ocurridas entre intervalos de millones de años. Estos cambios de polaridad son atribuibles a variaciones en el flujo de las corrientes eléctricas profundas que se producen en los movimientos del fluido cargado que constituye el interior terrestre.

Muchos investigadores han tomado la pauta de inversiones magnéticas como referencia para estudiar diversos procesos geológicos y climáticos. Sorprendentemente, ya que no existe todavía un mecanismo que pueda explicarlo bien, se ha evidenciado también una correlación sorprendente entre las variaciones del campo magnético terrestre y

masas de aire. Esto se produce ya que las partículas más energéticas pueden penetrar en profundidad ionizando los gases y modificando de este modo la conductividad eléctrica de las nubes. Si ésta varía puede facilitarse, por ejemplo, la precipitación del H₂O. Sin embargo, resulta muy difícil establecer la relación existente entre el viento solar y el clima en la biosfera ya que a nivel del suelo existen procesos locales de circulación y calentamiento. Todo ello hace que la influencia magnética tan sólo sea un pequeño factor entre los muchos que modelan el clima terrestre.

Desde la década de los setenta se han realizado cada vez mejores análisis estadísticos mediante los datos meteorológicos cada vez más rigurosos que demuestra la presencia de ciclos de 11 años relacionados con la actividad solar. Estos ciclos se evidencian incluso más en latitudes altas, cercanas a los Polos debido a

(4) La irradiación solar media en el techo de la atmósfera se denomina constante solar y se mantiene en promedio sobre los 1.370W/m² aunque puede variar hasta un 0,08%. Las mediciones han corroborado que esta irradiación varía sinusoidalmente en un ciclo de unos once años relacionado con la actividad solar.

pleja variedad de factores que intervienen en la modelización del clima, no es fácil determinar la manera en que la actividad solar influye en las condiciones de vida de la biosfera terrestre.

Hoy sabemos que la energía solar es un factor más dentro del complejo mecanismo atmosférico que determina el clima global del planeta. Pero lo que si

cantidad y características de los granos de polen u organismos depositados en los sedimentos de lagos o fondos marinos, etc.

Para conocer las fluctuaciones energéticas del Sol se ha estudiado también la producción de carbono 14 (^{14}C) en la atmósfera. Una mínima cantidad de este isótopo del carbono permitiría deducir

1610 y fue a partir de 1650 hasta 1720 aproximadamente, cuando se sucedió este período sin manchas apreciables denominado «Mínimo de Maunder». Estos períodos de inactividad constituyen hoy en día un misterio para los astrofísicos pero son muy útiles como casos extremos para evidenciar la correlación existente entre la actividad solar y las variaciones acaecidas en el clima terrestre. Por ejemplo, los climatólogos han comprobado que este mínimo de Maunder coincide con un período en que la temperatura media del planeta decreció ostensiblemente durante la denominada «pequeña glaciación».

Así a través de cuidadosos y extremadamente concienzudos estudios se ha conseguido correlacionar las observaciones climáticas realizadas por diversas civilizaciones y la actividad solar. En general cuando ocurre un mínimo pronunciado se produce un avance de los glaciares que está acompañado de una disminución importante en la temperatura media del planeta y viceversa. Como consecuencia, estas fluctuaciones podrían determinar alteraciones notables en la biosfera terrestre. Para evidenciar su decidida influencia, la reducción de sólo un 2 % de la intensidad de la radiación solar podría causar un enfriamiento muy acusado en todo el planeta, determinando la aparición de una nueva glaciación. Afortunadamente las variaciones cada 11 años en la energía irradiada por el Sol se reducen a ser del orden de un 1 por mil y se reequilibran constantemente. Estas variaciones actuales determinan pues fluctuaciones climáticas pequeñas pero de todos modos sustanciales para las plantas, por ejemplo. Como contrapunto un incremento similar de un 2 % en la energía radiada por el Sol calentaría el planeta y fundiría total o parcialmente el hielo acumulado en los casquetes glaciares como ya sucedió al comienzo del óptimo período interglaciar en que vivimos.

El método del ^{14}C da una visión global de la fluctuación energética del Sol. Sin embargo el proceso de producción de este isótopo en la alta atmósfera, su transporte a la biosfera y su incorporación al CO_2 se produce en un período de unos veinte años por lo que no es posible en este caso distinguir en los análisis la influencia del ciclo solar de 11 años. El estudio isotópico es mucho más concluyente aunque en el pasado se utilizó también el estudio del grosor de los anillos de ciertos árboles teniendo en cuenta la burda correlación existente entre anillos grandes generados durante años cálidos y húmedos.

La aparición de compuestos orgánicos permitió que el océano primitivo, se transformase con el tiempo en una enorme sopa caliente de moléculas complejas.



Figura 5. La paleontología estratigráfica nos brinda la posibilidad de analizar secuencialmente la evolución de los diversos organismos vivos del pasado. Hoy en día el análisis isotópico de los restos fósiles de foraminíferos que se sedimentaron paulatinamente durante miles de años formando estos estratos nos permite conocer las condiciones (temperatura, composición química del agua, etc.) que existían en los océanos y lagos terrestres hace millones de años. Los foraminíferos como estos nummulites son animales marinos bentónicos y necesitan un medio marino abierto rico en calcio. Son importantes formadores de rocas y las sucesivas especies aparecidas establecen una escala estratigráfica muy detallada desde el Cretácico hasta el Oligoceno.

parece estar claro es que según profundizamos en el estudio de la actividad solar, nos damos cuenta que la actividad biológica en la superficie terrestre viene relacionada con los ciclos de período corto del astro rey. Así se está obteniendo al analizar tanto la evolución biológica en la actualidad como en el pasado a través del registro fósil.

La energía producida por el Sol ha variado considerablemente a lo largo de su historia. Si queremos descifrar los cambios climáticos que se han producido a lo largo de los milenios, deberemos combinar y comparar los datos provenientes de muchos campos científicos. Han aparecido múltiples posibilidades, desde:

- Estudiar las proporciones de determinados elementos depositados en los anillos de árboles como ^{16}O y ^{18}O y de hidrógeno y deuterio para conocer la temperatura del agua que absorbía en un determinado período.

- Analizar mediante perforaciones en los glaciares las dimensiones y contenido de las capas de hielo allí depositadas.

- Determinar cuidadosamente la

la existencia de períodos de actividad elevada ya que la radiación solar intensa lo destruye. Para ello se puede analizar la abundancia de este isótopo de carbono en los anillos de crecimiento de árboles que lo han absorbido durante la fotosíntesis. Notemos que con estos almacenes naturales de carbono se puede también estudiar las fluctuaciones ocurridas en la actividad solar cuando vivían árboles hoy en día fosilizados. Estudios realizados con ellos muestran también una periodicidad de 11 años, coincidiendo con el ciclo solar. Pero también con ciertos árboles milenarios se ha corroborado la existencia de irregularidades en el ciclo de actividad solar, como el mínimo de Maunder acaecido hace tres siglos en el que no aparecieron manchas solares durante varias décadas.

Así pues el ciclo solar se puede hacer visible porque el número de manchas solares aumenta y disminuye cada 11 años aunque no con una absoluta regularidad ni en número ni en frecuencia. Se puede estudiar el número de manchas solares desde que Galileo los siguió a partir de

Dentro de este cultivo aparecieron después de muchos procesos químicos (algunos poco conocidos) buena parte de los compuestos que son la base de los ácidos nucleicos. Según indica el registro fósil, hace unos 3.800 millones de años estos últimos fueron capaces de producir otros a semejanza, en una especie de simple reproducción. Desde entonces hasta ahora el Sol ha proporcionado la energía para mantener esta larga cadena de ciclos en la cual el hombre y los organismos actuales son los últimos eslabones en la cadena evolutiva.

Resulta sorprendente que equipos de geólogos al analizar la abundancia de sedimentos en antiguos lagos del Precámbrico descubriesen hace poco una periodicidad de 11,2 años. Esto quiere indicar que la fluctuación periódica en la actividad solar ya es presente⁽⁵⁾ desde hace, al menos, unos 700 millones de años. También la abundancia de plancton marino o de polen en los sedimentos y la cantidad de

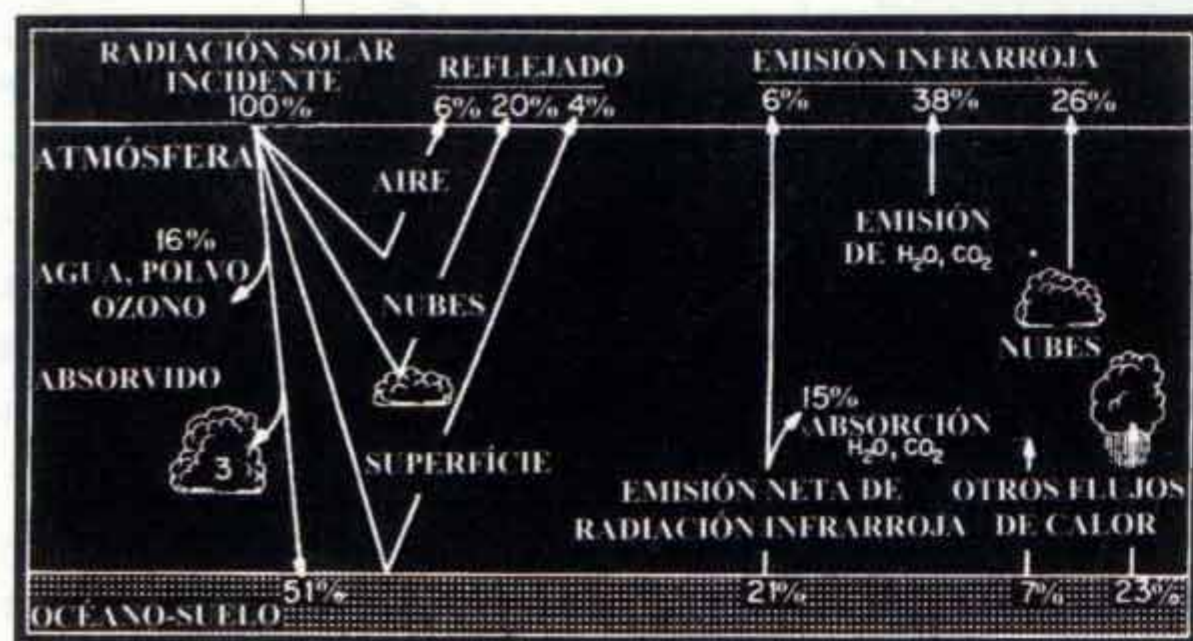


Figura 6. Como muestra este esquema la energía retenida en la atmósfera que es el principal motor del clima requiere un meticuloso balance entre la radiación solar incidente, la reflejada y la emitida por el suelo en forma de radiación infrarroja. El equilibrio radiativo en la actualidad es bien conocido. Sin embargo, conforme nos alejamos en el tiempo se desconoce cómo intervienen muchos factores como por ejemplo las variables proporciones de sus principales constituyentes. Todo ello nos impide determinar con precisión cuál era el balance de radiación que llegaba a la superficie hace millones de años aunque podemos inferirlo del análisis de sedimentos estratigráficos. (Adaptado de Wallace J.M. et al., 1986.)

materia orgánica acumulada en las turberas proporciona interesante información sobre los ciclos de actividad solar. En una visión general parece como si aunque desaparezca el ciclo de manchas, volviese a aparecer después con la precisa periodicidad de siempre. Esto puede indicar, como han señalado varios autores, que sobre las fluctuaciones de 11 años existiesen otras de mayor período que compensasen las variaciones globales. En la actualidad se intenta encontrar el mecanismo que origina las fluctuaciones y se apunta una explicación cuando conozcamos mucho mejor las capas solares internas donde no se puede llegar con los métodos tradicionales de investigación.

Conforme pasen cientos de millones de años la actividad solar se modificará

apreciablemente y con ella la energía irradiada. Ello ocurrirá dado que a largo plazo variará la composición química en su núcleo y cambiarán los procesos que generan la energía solar. De este modo el Sol padecerá variaciones sustanciales en la producción energética a lo largo de su evolución. Más tarde, el Sol atravesará su último estadio de vida aumentando terriblemente su tamaño y expulsando las capas exteriores para formar una nebulosa planetaria a la vez que su núcleo se enfría progresivamente hasta convertirse en una apagada enana negra dentro de aproximadamente 5.000 millones de años. Por tanto la vida en un sistema Solar como el nuestro está restringida a un período de tiempo muy grande, pero al fin de cuentas limitado. Las estrellas con su compleja síntesis de elementos proporcionan la complejidad química necesaria para originar la vida pero también establecen los límites para ella. Esta caprichosa fuente de luz y calor que es el Sol a pesar de no ser eterna es para nosotros todo lo que necesitamos para mantener la vida.

Hemos hablado de cómo la energía irradiada por el Sol es el principal motor del clima terrestre, determinante de la evolución de las especies vivas aparecidas en la Biosfera. Hemos mencionado que los cambios en la actividad solar producen ciertos cambios climáticos que tienen lugar en la Tierra. Pero también debemos considerar los mecanismos que se han desarrollado en la atmósfera para protegernos de aquella parte de la luz solar más peligrosa para la vida: la luz ultravioleta (UV).

Mencionamos anteriormente cómo los cinturones de Van Allen nos protegen de las partículas cargadas que se desprenden del Sol y recorren el espacio interplanetario formando el «viento solar». Sin embargo, las reacciones nucleares que se producen en el Sol producen fotones muy energéticos UV que constituyen un potencial peligro para la vida sobre la superficie terrestre. En el inicio de la vida los primeros seres vivos dotados de fotosíntesis (las cianobacterias o algas azules) produjeron inmensas cantidades de oxígeno a lo largo de millones de años. De este modo nuestra atmósfera, que en un principio carecía totalmente de este preciado gas, ha sido enriquecida por oxígeno paulatinamente durante estos procesos biológicos ocurridos en su superficie desde hace millones de años. Estas moléculas de oxígeno (O₂) nos protegen de parte de esta luz, recombinándose para convertirse en otro protector natural contra los rayos UV: el ozono (O₃).

Los procesos que nos protegen de esta radiación UV no son demasiado complicados de entender, simplemente los foto-

nes que llegan del Sol son absorbidos por diversos componentes de nuestra atmósfera, impidiendo su llegada a la superficie terrestre. En la ionosfera entre 200 y 90 km de altura se producen procesos de fotoionización de N₂, O₂ y O que no permiten pasar aquellos fotones con longitudes de onda $\lambda < 0,1 \mu\text{m}$. Posteriormente tiene lugar entre los 100 y 50 km de altura sobre la superficie terrestre la fotodisociación del oxígeno (O₂ + hν → 2O) que absorbe aquellos fotones cuya $0,1 < \lambda < 0,2 \mu\text{m}$. El oxígeno atómico producido en esta reacción generará el ozono a partir de un proceso de recombinación lento (O₂ + O + X → O₃ + X), donde X es una molécula cualquiera, requerida para conservar la energía en la reacción. Es precisamente el ozono así generado el que nos protege de la última banda del espectro UV, absorbiendo aquellos fotones cuya longitud de onda sea $0,2 < \lambda < 0,31 \mu\text{m}$.

La progresiva destrucción del ozono por gases emitidos masivamente en actividades humanas que destruyen en tremendas reacciones en cadena las moléculas de ozono, añadida a las posibles fluctuaciones naturales de su espesor está permitiendo la entrada casi directa en algunas zonas (los agujeros de ozono) de la radiación UV a la vez que aumenta sensiblemente la transmisividad también en otras. Dado que la destrucción progresiva de esta capa es un hecho constatable de los últimos estudios cabe que reflexionemos sobre nuestra actividad futura y que miremos con mayor preocupación hacia el débil equilibrio natural establecido en la atmósfera, perturbado por diversas y complejas causas, pero resumidas en la falta de previsión a largo plazo de nuestras actividades. Hoy en día el estudio de la química del ozono se muestra de capital importancia para poder afrontar un desarrollo sostenido pero quizá mañana nos enfrentemos a otros problemas de los que no somos ahora conscientes. Y es que si pudiésemos agrupar todo el ozono disperso en la atmósfera al nivel del mar obtendríamos una capa de poco más de 1 cm de espesor: una barrera demasiado sutil entre la vida y la muerte. JM.T.R. ■

Para más información

- J.B. et al., *The New Solar System*, Cambridge University Press & Sky Publishing Corporation, 1990.
- J.M. Wallace et al., (1986) *Atmospheric Science: A introductory survey*, Academic Press, Inc., Nueva York, 1986.
- J. Gribbin, *El clima futuro*, Ed. Salvat, Barcelona, 1986.
- H. Lamb, *Climate: Present, Past and future*, 1986.
- L. Oster, *Astronomía Moderna*, Ed. Reverté, Barcelona, 1984.

(5) Si exceptuamos cortos intervalos de tiempo.