
*Efecto del Sol
sobre la
atmósfera terrestre*

BENITO MARCOTE MARTIN

Enero, 2011

FÍSICA DE LA ATMÓSFERA

5º FÍSICA

Índice

1	Introducción	3
1.1	Capas de la atmósfera	3
2	Influencias exteriores	5
2.1	El Sol	5
2.1.1	Manchas solares y ciclo solar de 11 años	6
2.1.2	Viento solar	11
2.1.3	Fulguraciones solares	12
2.1.4	Variaciones a largo plazo	13
2.2	Rayos cósmicos	15
2.2.1	Origen de los rayos cósmicos	16
3	Efectos sobre nuestra atmósfera	18
3.1	Ionización de la Ionesfera	18
3.2	Efectos del ciclo de 11 años sobre la atmósfera	20
3.2.1	Auroras boreales	20
3.2.2	Insolación solar	21
3.3	Efectos de la variación a largo plazo	22
3.3.1	Mínimo de Maunder	22
3.3.2	Formación de nubes y rayos cósmicos	25
	<i>Bibliografía</i>	26

1 *Introducción*

La Tierra está rodeada por una atmósfera lo suficiente densa como para permitir una gran diversidad de fenómenos en ella. Compuesta principalmente por Nitrógeno ($\sim 78\%$) y Oxígeno ($\sim 21\%$), uno de los compuestos más relevantes de cara a su dinámica es el vapor de agua, ya que en el rango de presiones y temperaturas que nos encontramos en ella ($P \sim 1000 - 100 \text{ mbar}$ y $-50 \lesssim T \lesssim 40^\circ$ normalmente para la región más baja, la troposfera, presente hasta unos $\sim 10 \text{ km}$ de altura, que es donde se localiza prácticamente casi toda el agua existente en la atmósfera) dicho elemento puede ser encontrado en sus tres fases principales: sólido, líquido o gas, obteniendo así una gran diversidad de eventos como son la formación de nubes, precipitaciones de agua líquida (lluvia) o sólida (granizo, nieve).

En este trabajo se va a comentar cómo nuestra atmósfera está influenciada también por agentes externos a ella, provenientes del espacio, como el Sol, que interaccionará de diversas formas con ella produciendo diversas consecuencias.

1.1. *Capas de la atmósfera*

A lo largo de la atmósfera se puede distinguir una serie de capas en las cuales se obtiene un diferente comportamiento con la altura. A grandes rasgos, se pueden definir las siguientes capas, que nos serán relevantes en el futuro debido a que existen diversos eventos que interaccionan con una u otra capa:

Troposfera. La capa más baja de la atmósfera, que va desde la superficie hasta 8-18 km. Se caracteriza por contener prácticamente todo el vapor de agua que se puede encontrar en la atmósfera terrestre, además de que aquí la temperatura desciende linealmente con la altura, con un gradiente térmico vertical medio de $-6.5 \text{ }^\circ\text{C km}^{-1}$, por lo que las zonas más altas llegan a tener una temperatura de $-50, -60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Estratosfera. Va desde 18 - 35 km, y presenta un comportamiento totalmente contrario en cuanto a la temperatura: aquí la temperatura aumenta con la altura, de forma

que se pasa desde los -50, -60 °C hasta los 0 °C en la región más alta, con una presión desde 100 hasta 1 mbar, y siendo la región donde se localiza la *capa de ozono*.

Este calentamiento es debido a que el ozono O₃ absorbe la radiación ultravioleta procedente del Sol, separándose en forma de O y O₂, liberando energía.

Mesosfera. Desde los 50 a los 80 km. Aquí la temperatura de nuevo vuelve a descender con la altura, con lo que llega a descender hasta los -70, -80 °C.

En esta capa es donde la mayoría de los cuerpos procedentes del espacio, como los meteoros, terminan por evaporarse, debido al rozamiento con las moléculas del aire existente en esta capa, que ya presenta una densidad suficiente para ello.

Ionosfera. (ó Termosfera) Esta capa, que abarca desde los 80-90 hasta los 600-900 km, es ya muy tenue y se ve afectada de una forma muy importante por el Sol. Aquí, la temperatura vuelve a crecer con la altura, pudiendo llegar incluso hasta los 1000-1500 °C¹.

Aquí el aire se encuentra permanentemente ionizado como consecuencia de la radiación solar, algo que causa que dicha capa actúe como espejo para las ondas de radio, convirtiéndose así en el mecanismo por el que se consigue que las ondas de radio emitidas en una región del planeta puedan llegar a otra región lejana.

Además, en esta capa (y concretamente en las regiones polares normalmente) es en donde se producen las *auroras boreales*, que se comentarán más adelante.

Exosfera. Es la última capa que se suele definir de la atmósfera terrestre. Aquí prácticamente existe vacío, ya que la densidad poco a poco se va reduciendo hasta hacerse idéntica a la del espacio.

¹Estrictamente, debido a la baja densidad que existe en la Ionosfera tampoco es demasiado riguroso hablar de temperatura.

2 Influencias exteriores

Cuando se trata de considerar los efectos externos a la Tierra que puedan afectar a la atmósfera, rápidamente pensamos en el Sol, ya que es el objeto más destacable con el que nuestro planeta está continuamente en interacción. Sin embargo, éste interacciona con nuestra atmósfera de muy diversas formas, no actuando únicamente como una fuente constante de luz y calor. Debido a esto, en esta sección de profundizará en los eventos o cambios presentes en el Sol que más influyen a nuestro planeta, con el fin de poder entender en las secciones posteriores la razón por la que ocurren diferentes fenómenos en las diferentes capas de nuestra atmósfera.

Además de esto, como veremos el Sol no es el único cuerpo que presenta una interacción reseñable con nuestra atmósfera, ya que existen otros cuerpos, mucho más desconocidos, que también interaccionan de una u otra forma con la atmósfera. Nos estamos refiriendo a los *rayos cósmicos*, protones o núcleos ionizados que inciden sobre nuestro planeta con energías muy altas.

2.1. El Sol

Como hemos dicho, la influencia más clara que recibe nuestro planeta respecto del espacio exterior es debida indudablemente al Sol, ya que éste es la principal fuente de energía (luz y calor) que presenta nuestro planeta. Debido a que el Sol es una estrella de tamaño medio/pequeño, una vez se formó, y junto a él el resto del Sistema Solar incluida la Tierra, hace unos 5.000 millones de años (5 Gyr) rápidamente se stabilizó entrando en lo que se conoce como la *secuencia principal de una estrella*, que es la etapa más larga en la vida de una estrella, durante la cual se puede decir que no se producen grandes cambios en la estrella, ya que ésta presenta un comportamiento prácticamente constante durante todo este periodo, el cual para una estrella como la nuestra abarca unos 10.000 millones de años.

Por esta razón, en todo este tiempo se puede considerar que la insolación solar que ha

recibido nuestro planeta ha sido prácticamente constante año tras año¹. Además, dado que la órbita de la Tierra en torno al Sol es prácticamente circular (la diferencia entre el semieje mayor, $152 \cdot 10^6$ km, y el menor, $146 \cdot 10^6$ km, de la elipse es únicamente de un 4% frente a la circularidad), se puede suponer sin cometer un error apreciable que la cantidad de energía que llega proveniente del Sol es una constante a lo largo de todo el año, y que tiene un valor de $S = 1370 \text{ W m}^{-2}$, que es la denominada *constante solar*.

Sin embargo, y a pesar de todo lo dicho anteriormente, el Sol no deja de ser un sistema dinámico, en continua evolución, por lo que a pesar de su aparente “tranquilidad” o constancia, presenta un gran número de cambios o fenómenos, muchos de los cuales son lo suficientemente importantes (algunos de ellos llegan a ser los fenómenos más violentos que se producen en el Sistema Solar) como para ejercer una interacción apreciable con la atmósfera terrestre. Por ello, es necesario un estudio de dichos fenómenos junto con las consecuencias que producen en nuestra atmósfera, para lo cual es importante tener en cuenta dos factores: la violencia o interacción que tienen los eventos que afectan a la Tierra y con qué frecuencia o periodicidad se producen, ya que un cambio producido puede ser pequeño pero si dura un gran periodo de tiempo podrá terminar teniendo una consecuencia visible.

2.1.1. Manchas solares y ciclo solar de 11 años

Aunque todas las culturas que han pasado por la historia de la Tierra han realizado un estudio lo más detallado posible, siempre en función de la tecnología con que contasen, del Sol, puesto que éste era el astro que les proporcionaba la luz del día y en casi todas ellas era el principal foco de atención, se podría decir en un principio que únicamente se detectó la variabilidad del Sol a partir de que Galileo lo observase a través de un telescopio, allá por 1610, ya que únicamente con este aparato fue capaz de detectar las *manchas solares* que se producen sobre su “superficie” y poder realizar un estudio de sus movimientos.

Sin embargo, esto no es del todo exacto, puesto que dichas manchas solares, se conocen, al menos que se tenga constancia, desde aproximadamente el año 800 a. C., ya que por estas fechas se tiene constancia en diferentes libros de China de observaciones de manchas sobre la superficie del Sol, las cuales fueron posibles de realizarse debido a la orografía del terreno del país, donde existen numerosas regiones donde la mezcla de una profunda

¹Realmente se conoce que ha habido un ligero incremento continuo de la insolación solar en todo este tiempo, en comparación con el existente al inicio del Sistema Solar, pero para lo comentado es irrelevante.

vegetación con el tránsito de ciertos ríos producían frecuentes nieblas, permitiendo una observación directa del disco solar sin que el brillo de éste perjudicase a la visión de los observadores tanto durante los atardeceres como durante los amaneceres.

Además de estas observaciones, también se tienen registros de observaciones solares tanto en Japón, como en Babilonia, y de nuevo China, entre los años 200 y 100 a. C., aunque de éstas únicamente se tiene un registro exhaustivo y continuado por parte de China, cubriendo un periodo desde el año 206 a. C. hasta prácticamente 1700 d. C.^[1].

Mientras tanto, en Occidente, tal y como se ha dicho, hubo que esperar hasta la aparición del telescopio y posteriores observaciones de Galileo y los que continuaron su legado para tener un estudio continuado de la actividad solar, a pesar de que hubo algunos registros esporádicos de manchas solares en torno al 400 a. C.

Con estas observaciones se pudo confirmar que dichas manchas eran indudablemente efectos sobre la superficie solar, y no relativos a eventos que pudieran producirse en nuestra atmósfera, además de poder estimar la rotación del Sol a partir de su movimiento en torno a éste.

Más allá del estudio cualitativo de la actividad solar, en 1849 el astrónomo Rudolf Wolf elaboró una forma para poder tener una constancia en cierta forma *cuantitativa* de la actividad solar, definiendo así lo que hoy en día se conoce como *número de Wolf* (o *Sunspot Number*) y que viene dado por la expresión

$$R = k(10G + F) \quad (2.1)$$

donde F es el número de manchas (focos) que se observan en la superficie solar, G es el número de “grupos” que hay (éstos obedecen a una definición bastante imprecisa, en donde tradicionalmente se determinan como cuántas regiones o grupos de manchas hay, adjudicando varias manchas a un mismo grupo siempre que éstas se encuentren próximas. Hoy en día se suele utilizar las regiones magnéticas para dicha clasificación, aunque no por ello se ha eliminado toda incertidumbre en sus denominaciones), y por último k es un factor que tendría en cuenta y compensaría las condiciones de la observación (como son el equipo usado para realizar la observación o las condiciones climáticas que hubiese), aunque inicialmente Wolf lo fijó como 1 sin tenerlo en cuenta.

La ventaja que trajo consigo el utilizar dicho estimador de la actividad solar por todos los astrónomos fue que de alguna forma se pudo cuantificar la actividad solar, observando

rápidamente que dicha actividad está sujeta a un ciclo con un periodo de unos 11 años, en el cual el Sol pasa por un máximo de actividad (asociado a un mayor número de manchas solares, en general con números de Wolf del orden de $R \sim 100 - 150$) y por un mínimo de actividad (menos manchas, con $R \sim 0 - 20$).

Dada la utilidad de dicho método, estas observaciones se han ido realizando hasta hoy en día, donde los observatorios actuales siguen determinando dicho número para mantener un seguimiento de dicha actividad, como se puede observar en la Figura 2.1, donde se muestra la evolución de R a lo largo de los últimos 400 años, es decir, desde que Galileo comenzó a observar el Sol.

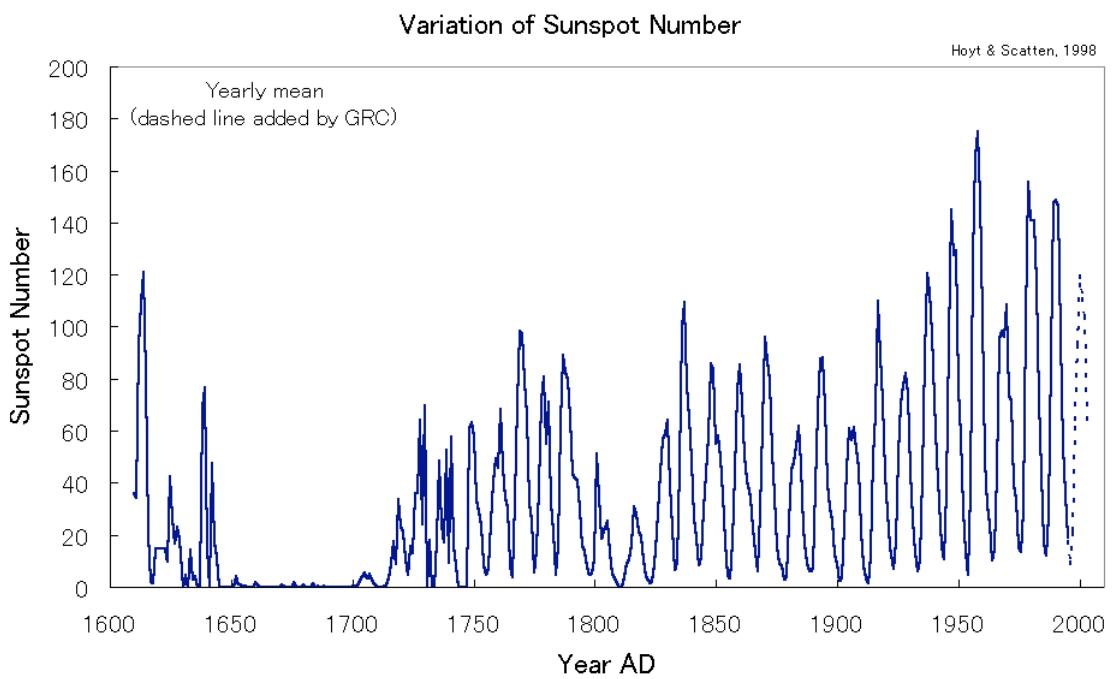


Figura 2.1: Evolución del *número de Wolf* desde 1610 hasta 2000. Los máximos y los mínimos se producen a lo largo de un ciclo de ≈ 11 años, que ha permanecido prácticamente constante en todo este periodo, con la excepción de un intervalo en donde la actividad solar fue prácticamente nula (1645-1715), conocido como el *Mínimo de Maunder*. Cortesía de Hoyt y Scatten, 1998.

Para entender dicho ciclo, así como otros eventos solares que veremos más adelante, es necesario describir el campo magnético del Sol, el cual a diferencia del de la Tierra, que tiene una orientación norte-sur similar al de un imán (diplomo magnético), presenta un comportamiento mucho más dinámico, en el sentido en que las líneas de campo van evolucionando y “retorciéndose” entre sí, por lo que al final terminan por “reconfigurarse”

viviendo de nuevo a la situación inicial de una orientación norte-sur.

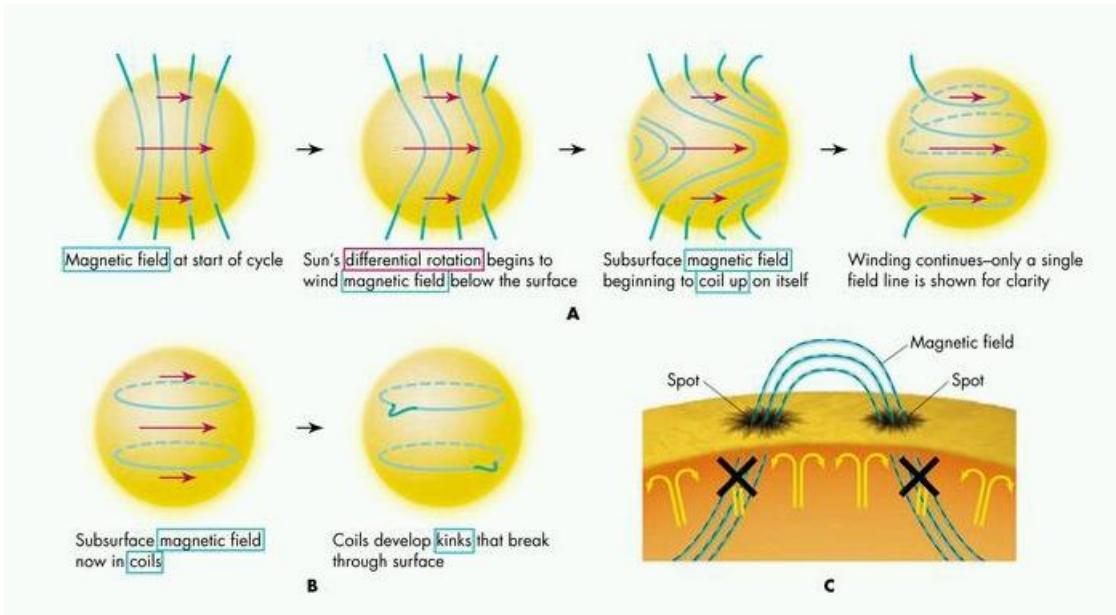


Figura 2.2: Representación de la evolución del campo magnético solar a lo largo de un ciclo solar. Cortesía de la *University of Massachusetts*.

Es decir, y tal como se observa en el esquema de la Figura 2.2, si partimos de una situación inicial en que se tienen las líneas de campo orientadas de norte a sur (que se correspondería a la situación de mínima actividad), el hecho de que el Sol presente una velocidad de rotación diferente en los polos que en el ecuador, consecuencia de no ser un cuerpo sólido sino gaseoso, da como resultado que mientras que en el ecuador se tiene un periodo de rotación de 24.47 días, en los polos este valor asciende hasta unos 34 días^[2], lo que provoca que dichas líneas se vayan curvando (*adelantando*) en las regiones ecuatoriales, de tal forma que al cabo de los días las líneas de campo se encuentran prácticamente paralelas al ecuador, muy próximas, y con sentidos opuestos.

Y esto hace que dicha situación se vuelva inestable, puesto que las líneas de campo con sentidos opuestos tienden a repelerse, ocasionando que las líneas súbitamente se deformen y atraviesen la superficie solar (la fotosfera), tal y como se puede ver en la figura en una recreación simple, obteniendo que en una región de la superficie se obtenga líneas de campo salientes y en otra relativamente próxima entrantes.

Con ello, en estas dos regiones se obtendrá un comportamiento similar: dicho flujo magnético (que normalmente presentan intensidades del orden de décimas de Tesla) provoca un enfriamiento en esa región de la superficie solar, puesto que la densidad y presión del gas de esa zona se reduce, lo que se traduce en que se observa una región oscura (por contraste con el entorno), con una temperatura de $T \sim 4000$ K, contrastando

con la temperatura $T \sim 6000$ K del resto de la superficie solar.

Esto nos llevaría a concluir que durante el máximo de actividad, cuando hay un mayor número de manchas solares, el Sol presentaría un brillo ligeramente menor, provocando que la insolación solar fuese menor. Sin embargo, lo que realmente se obtiene es justo lo contrario, durante los máximos de actividad es cuando el Sol presenta una mayor insolación. Esto se debe a que a pesar de la formación de manchas solares, que reducen el brillo de la superficie solar, también se forma otro tipo de estructuras: las *fáculas*, las cuales son regiones más brillantes que la media de la superficie solar (con un brillo $\sim 10\%$ superior) y que normalmente se localizan en los alrededores de estas regiones activas (con manchas solares), siendo producidas por las zonas donde los campos magnéticos producen un aumento de la densidad y presión, y consecuentemente un aumento de temperatura. Éstas, en lugar de producirse en la fotosfera como las manchas solares, se producen bien en la alta fotosfera o en la capa superior de la atmósfera solar: la cromosfera.

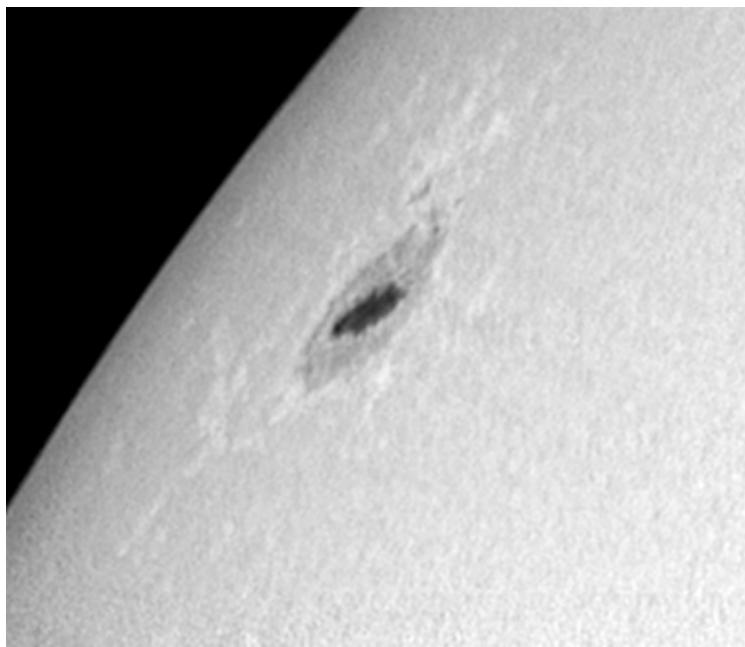


Figura 2.3: Imagen de una mancha solar en luz visible donde se aprecia bastante bien la región fría (mancha solar) por donde sale el campo magnético así como las *fáculas* (regiones brillantes) alrededor de ésta.
Imagen del autor.

Esta etapa descrita es la correspondiente a máximos de actividad, puesto que es cuando se forma un gran número de manchas solares, y es cuando las líneas de campo magnético se vuelven mucho más inestables. Después de este periodo, cuya máxima actividad suele durar un par de años, las líneas de campo se van estabilizándose paulatinamente, bien

porque varias líneas terminan por perderse hacia el espacio por lo que desaparecen, o bien porque se van “reconfigurando”^[3] entre sí las líneas existentes, volviendo así a una situación de mínima actividad en la que de nuevo se tiene un campo magnético orientado de norte a sur, aunque esta vez invertido respecto a la situación inicial, es decir, que se produce una inversión del campo magnético solar cada 11 años.

2.1.2. Viento solar

Por otro lado, a partir de los eclipses solares se sabe que el Sol no se extiende únicamente hasta la “superficie” (la fotosfera) que normalmente vemos al observarlo, sino que existe una región mucho más externa que normalmente pasa desapercibida y únicamente es posible observarla durante los eclipses solares. Nos estamos refiriendo a la *corona solar*.

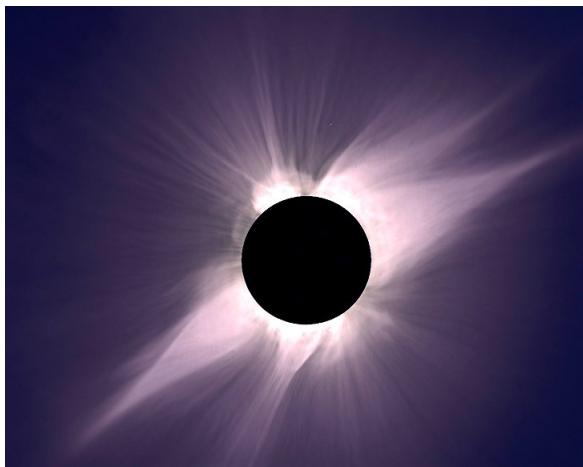


Figura 2.4: Corona solar visible durante un eclipse. Foto de la NASA.

La relevancia de dicha región radica en que es la principal fuente de emisión de material solar al espacio, ya que gran parte del material de la corona va escapando hacia el espacio guiado por el campo magnético solar, que se extiende a través de este plasma por todo el Sistema Solar. Esto crea el *viento solar*, que es un continuo de partículas cargadas emitidas por el Sol y que viajan por todo el Sistema Solar, con velocidades del orden de $100 - 800 \text{ km s}^{-1}$, presentando una densidad del orden de $10^6 \text{ part. m}^{-3}$.

Por supuesto, la intensidad de este viento solar está modulado por la actividad solar, lo que hace que siga un ciclo idéntico al de las manchas solares, en el cual el viento solar se debilita o se fortalece, produciendo que el campo magnético que envuelve al Sistema Solar (y es debido casi exclusivamente al Sol) también tenga períodos de más o menor intensidad.

Esto hace que el “escudo” que presenta el Sol frente a las partículas provenientes del

regiones más externas, ínter o extragalácticas (ya que las más significativas son partículas cargadas y por tanto son frenadas por el campo magnético circundante), sea menor durante los mínimos de actividad, provocando que lleguen un mayor número de partículas al entorno de la Tierra.

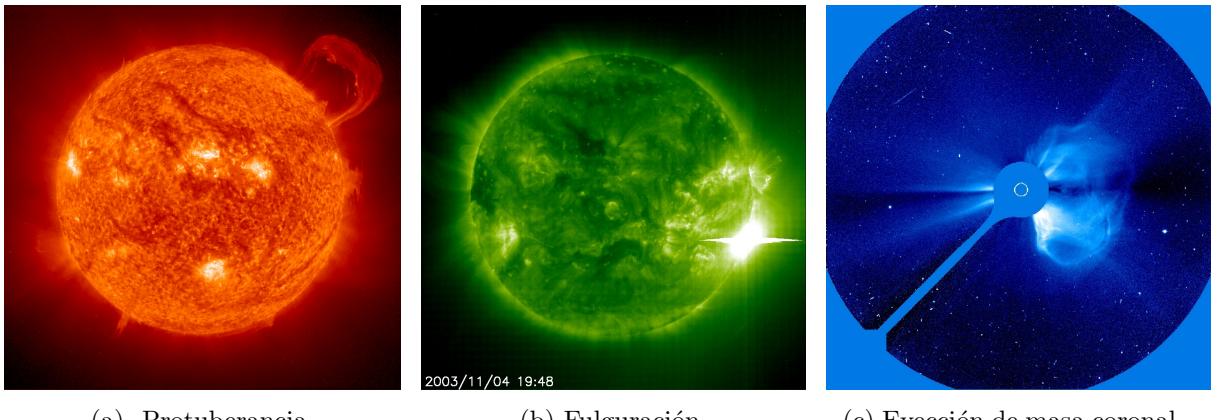
2.1.3. Fulguraciones solares

Al comentar cómo evoluciona el campo magnético solar a lo largo del ciclo de 11 años, hemos visto cómo se pasa por una situación en la que líneas de campo con distintas orientaciones se encuentran muy próximas, provocando una situación de inestabilidad que conlleva unos movimientos violentos que causan que las líneas “salgan” hacia el espacio a través de la superficie solar.

Sin embargo, en ocasiones estos movimientos son mucho más bruscos de los detallados anteriormente, provocando que las líneas no se deformen cruzando únicamente la superficie, sino que también hay líneas de campo que terminan por perderse hacia el espacio exterior. Y dado que en la superficie solar encontramos un alto número de partículas cargadas, esto hace que una cierta cantidad de esta masa se pierda al espacio, emergiendo desde la superficie. Esto es lo que se conoce como *protuberancia solar* siempre que este proceso se desarrolle con cierta suavidad, es decir sin que se hayan producido eventos demasiado violentos o rápidos (ver Figura 2.5a).

En cambio, en otros casos estos entrecruzamientos de las líneas de campo se producen de una forma violenta, generando explosiones y liberando una gran cantidad de energía al espacio en un breve periodo de tiempo. Estamos en el caso en que se ha producido un *flare*, o *fulguración solar*, donde lo que se observará es primero una explosión a nivel superficial (fotosfera) en el Sol, debida a las reconfiguraciones en las líneas de campo magnético, liberando una gran cantidad de energía, que calienta el material circundante hasta los 10 millones de grados (Figura 2.5b).

Y a continuación esta explosión arrastrará y acelerará una gran cantidad de materia consigo (gran parte perteneciente a la corona solar), de forma que lanzará mayoritariamente protones y electrones hacia el espacio, con velocidades comprendidas entre 20 y 3000 km s^{-1} , y por término medio una masa de 10^{12} kg , conociéndose dicho evento como *eyeción de masa coronal* (CME), ver Figura 2.5c. En cuanto a términos de energía, estamos hablando de explosiones que suelen liberar una energía del orden de $10^{27} \text{ erg s}^{-1}$ (10^{20} J), llegando los más potentes a poder liberar hasta 10^{32} erg (10^{25} J) (donde como comparación, se puede poner la energía que liberó la bomba lanzada en Hiroshima, que era de $8 \cdot 10^{20} \text{ erg}$).



(a) Protuberancia.

(b) Fulguración.

(c) Eyección de masa coronal.

Figura 2.5: Imágenes del Sol obtenidas por el Telescopio Espacial SOHO (NASA) en la que en (a) se observa una protuberancia arriba a la derecha del disco solar, en (b) observamos un *flare* solar, y en (c) se observa una CME, donde el círculo blanco central indica el disco solar.

En general, estos eventos lanzan material (protones y partículas altamente ionizadas) al espacio, de forma que éstas se pierden por éste. Sin embargo, en un cierto número de estos casos, la Tierra se encontrará en la dirección de impacto, por lo que parte de este material llegará a nuestro planeta e interactuará fuertemente con éste, produciendo un mayor o menor número de sucesos que irán en función de lo fuerte que fue el flare y en qué condiciones se produjo.

2.1.4. Variaciones a largo plazo

En §2.1.1 hemos visto cómo el Sol obedece a un ciclo de 11 años de actividad, en el cual pasa por períodos de gran actividad y en otros de poca actividad. Sin embargo, ya a partir de la Figura 2.1 se observa cómo dichos ciclos no son siempre semejantes entre sí, sino que éstos están modulados por un comportamiento más general, mayor en el tiempo, haciendo que la actividad promedio en una época sea significativamente mayor que en otras, e incluso existiendo intervalos de tiempo en los que el ciclo de 11 años prácticamente desaparece, obteniendo una actividad solar prácticamente nula en un periodo del orden de varias decenas o centenares de años (como fue el caso del *Mínimo de Maunder* que se puede ver en la citada figura entre los años 1645 y 1715, aunque no es el único mínimo profundo conocido).

Esto hace pensar que además de este ciclo debe existir otro ciclo a más largo plazo, al cual el Sol estaría sujeto y solo se haría evidente al promediar la actividad en un periodo mucho mayor de tiempo. Sin embargo, el primer problema con que nos encontramos

es que de épocas anteriores a las de Galileo no existe un seguimiento lo suficientemente exhaustivo y preciso de la actividad solar como para utilizarlo en una reconstrucción de dicha actividad.

Por ello, lo que se realiza es una reconstrucción de la actividad solar por medio de otras muestras indirectas, como son las dataciones de Carbono-14 y Berilio-10 de la Tierra, por ejemplo el presente en los anillos que se forman en los troncos de los árboles al cabo de los años, ya que, como se explica en [5], éstos reflejan con cierta precisión la actividad solar en esos años, pudiendo identificar los grandes mínimos o máximos por los que ha pasado el Sol (y de qué tipo son: si similares al de Maunder: cortos pero profundos, o más largos suavizados, similares al mínimo de Spörer, que tuvo lugar entre 1460 y 1550, que aunque más largo presentó una actividad más alta que la de Maunder). Con ello, se obtiene una evolución semejante a la de la Figura 2.6, en donde se observa cómo la actividad solar ha

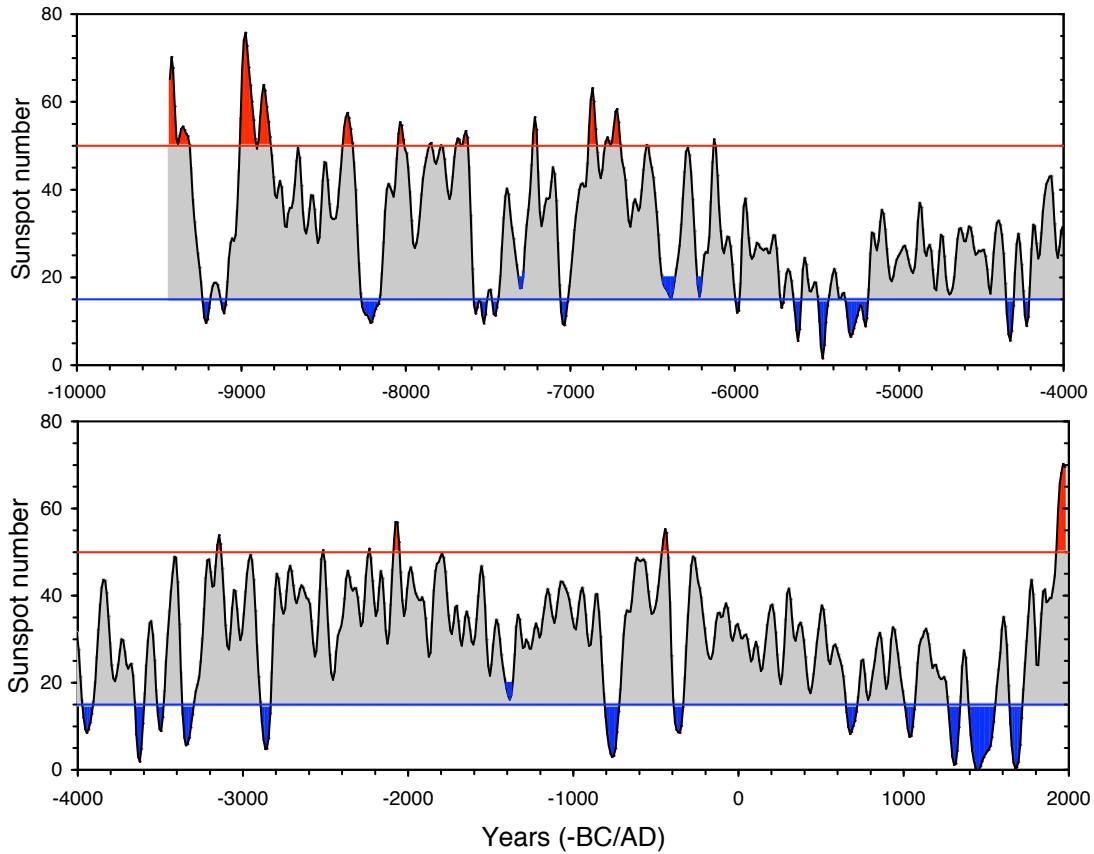


Figura 2.6: Reconstrucción de la actividad solar promedio (número de Wolf) a largo plazo a través de los datos de ^{14}C . Se observan períodos de gran actividad solar (el actual, así como alrededor de ~ 9000 a. C.) y de muy baja actividad, como los Mínimos de Spörer y Maunder recientes (los dos últimos mínimos pronunciados)^[5].

pasado por grandes épocas en las que era en promedio muy intensa, mientras que en otras épocas ha sido mucho más reducida, concretamente se observa el intervalo que va entre los años 1300-1800 d. C. en donde se obtuvo una actividad promedio significativamente más baja de lo normal.

2.2. Rayos cósmicos

Olvíandonos temporalmente del Sol, procedente del espacio hay también otro tipo de partículas relevantes para nosotros, los *rayos cósmicos*, que a pesar de lo que pueda parecer por su nombre, no son fotones sino que es materia, siendo en su mayoría protones ($\sim 89\%$) o partículas alpha ($\sim 10\%$) muy energéticos (moviéndose con velocidades próximas a la de la luz), y que en ocasiones puede llegar a superar los 10^8 TeV (20 J, la misma energía que una pelota de tenis a 150 km/h, pero concentrada en un protón únicamente).

Estas partículas llegan a la Tierra provenientes de todas direcciones (de forma prácticamente isótropa), aunque al contrario de lo que ocurre con otras fuentes, sus direcciones no permiten determinar de dónde vienen, debido a que al ser partículas cargadas a grandes velocidades, se ven muy afectadas por los campos magnéticos presentes en el espacio (desde el campo magnético galáctico, al solar y terminando con el terrestre), por lo que terminan llegando con una trayectoria prácticamente aleatoria (i.e. sin posibilidad de reconstruirla).

Cuando estas partículas se acercan a la Tierra, son desviadas por el campo magnético terrestre, haciendo que una gran parte de ellas no consiga entrar en la atmósfera. Sin embargo, esto no ocurre con todos, por lo que un porcentaje de ellos consiguen incidir en la atmósfera. Por esta razón, existe un flujo de rayos cósmicos mayor en las regiones polares que en las ecuatoriales, ya que en estas regiones es donde las líneas del campo magnético terrestre entran hacia la superficie, facilitando la entrada de los rayos cósmicos.

Al incidir sobre la atmósfera, comisionan con las moléculas del aire, y dado que lo hacen con una energía tan alta, se suelen producir reacciones de creación de piones que posteriormente se desintegran en otras partículas, produciendo una cascada de partículas que por un lado tendrá una componente electromagnética (cascada donde se van emitiendo fotones ó electrones y positrones) y por otro se tendrá principalmente neutrinos y muones, siendo todo este conjunto el que llega hasta la superficie terrestre.

Además, estas interacciones también son responsables de un aporte de algunos isótopos inestables a la atmósfera terrestre, como el Carbono-14, producido en colisiones de un

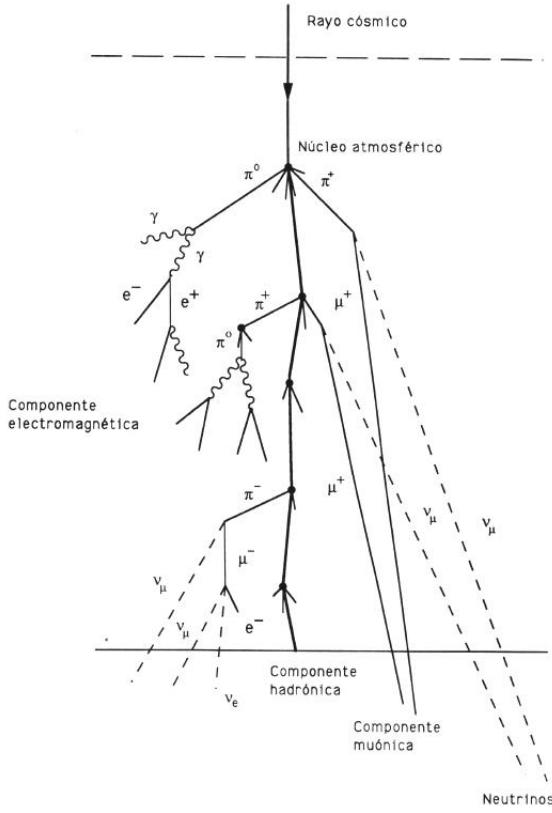


Figura 2.7: Cascada de partículas producida por la incidencia de un rayo cósmico en la atmósfera.

neutrón con un núcleo de nitrógeno: $n + N^{14} \rightarrow p + C^{14}$, haciendo que la cantidad de Carbono-14 en la atmósfera permanezca prácticamente constante.

2.2.1. Origen de los rayos cósmicos

Los rayos cósmicos proceden de diversas fuentes, lo que hace apropiado diferenciarlos en dos grupos en función de la energía que presentan: los *rayos cósmicos de baja energía*, y los *rayos cósmicos de alta energía*.

Los primeros son, como su propio nombre indican, los que tienen una energía menor, típicamente entre 100 MeV y 10 GeV, procediendo la mayoría del Sol, o de algunas estrellas de nuestra Galaxia, y que al incidir sobre la atmósfera típicamente interaccionan con el aire presente en la ionosfera, mientras que los de alta energía (> 10 GeV) no pueden tener un origen estelar, por lo que tienen que proceder de otras fuentes más violentas, como son las supernovas, o incluso fuentes extragalácticas, como son los agujeros negros supermasivos. Éstos consiguen penetrar mucho más en la atmósfera terrestre, de forma que típicamente interaccionan con la materia sobre los 10 km de altura, es decir, en la troposfera.

De esta forma, las principales fuentes de rayos cósmicos son:

- *El Sol.* Fuera a parte del *viento solar* que ya hemos visto, durante las fulguraciones solares se produce una emisión de rayos cósmicos (semejantes a las partículas del viento solar, solo que llevan una energía bastante superior) al espacio, siendo ésta la principal fuente de rayos cósmicos que llegan a la Tierra, aunque con energías claramente menores que las de fuentes galácticas.

Esta emisión como se puede extraer de esto, está modulada por el ciclo de 11 años, puesto que se producirá un flujo mayor de rayos cósmicos cuando existen más fulguraciones, i.e. durante los máximos de actividad.

- *Las explosiones de supernova,* en donde al ser eventos donde se libera una gran cantidad de energía en muy poco tiempo producen una onda de choque que acelera las partículas que se encuentran en su entorno hasta velocidades próximas a la de la luz, pudiendo proporcionarles energías de hasta $10^3 - 10^6$ TeV pasando a formar éstos los denominados *rayos cósmicos galácticos* (GCR).
- *Otras fuentes galácticas.* Para los rayos cósmicos de más alta energía (hasta 10^8 TeV) se requieren otras fuentes más potentes, por lo que se supone que éstos de tienen que producir en las regiones cercanas a los agujeros negros supermasivos que hay en el centro de las galaxias.

A diferencia de lo que ocurre con los rayos cósmicos solares, los rayos cósmicos galácticos están modulados por el campo magnético solar, puesto que éstos se ven repelidos por dicho campo magnético al entrar dentro del Sistema Solar. Por ello, en las épocas de máxima actividad, cuando el Sol presenta un campo magnético más fuerte, el flujo de rayos cósmicos galácticos que llegan a la Tierra es significativamente menor que en épocas de mínima actividad.

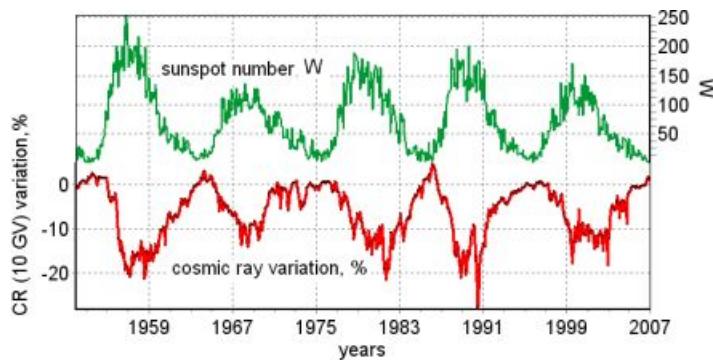


Figura 2.8: Modulación del flujo de rayos cósmicos galácticos que llegan a la Tierra. Se observa cómo durante los máximos de actividad existe una reducción de alrededor de un 20% en dicho flujo.

3 Efectos sobre nuestra atmósfera

Después de analizar los diversos fenómenos que se producen en el espacio y que llegan a la Tierra de una forma más o menos constante, pasaremos a comentar qué efecto tienen sobre la atmósfera terrestre, ya que al incidir sobre la atmósfera terrestre interactuará de alguna forma con ella.

3.1. Ionización de la Ionosfera

Ya comentamos al principio que la ionosfera constituye una capa de nuestra atmósfera que está permanentemente ionizada, además de presentar un aumento de la temperatura con la altura.

Puesto que el Sol emite como un cuerpo negro, a una temperatura de entorno a 5500 K, una buena parte de su emisión se produce en longitudes de onda del ultravioleta, con una menor parte, aunque no despreciable, en rayos X. Esto hace que al incidir sobre la atmósfera se produzcan ionizaciones de los átomos o moléculas de ésta, puesto que esta radiación tiene suficiente energía como para arrancar los electrones de estos átomos.

A su vez, los electrones libres tenderán a volver a unirse con un átomo, puesto que esa será su configuración de más baja energía, y esto sucede más o menos rápido en función de la densidad que haya en el aire, puesto que si existe una densidad grande (los átomos se encuentran más cercanos) la probabilidad de que el electrón sea capturado por algún ion es mayor y dicho tiempo será menor. Por lo tanto, obtendríamos que aunque exista una radiación ionizante (UV ó rayos X) se observará un gas prácticamente neutro.

En cambio, si la densidad es suficientemente baja, como ocurre en la ionosfera, la probabilidad de que los electrones libres sean capturados por los iones se compensa con la probabilidad de que se ionice un átomo, estableciéndose una situación de equilibrio en la que se tiene un gas más o menos ionizado en función del balance de estos dos eventos.

Por ello, la ionización de esta capa presenta un ciclo de día-noche, puesto que estará más ionizado cuando recibe la luz solar, i.e. durante el día, además de ser más extremo en

las regiones tropicales (donde el Sol incide más normal a la atmósfera) que en las regiones polares, obteniendo también un ciclo estacional.

Sin embargo, durante la noche aún existen capas de la ionosfera que permanecen ionizadas, debido a la entrada de partículas cargadas (viento solar y rayos cósmicos de baja energía) que hacen que se sigan produciendo ionizaciones en el gas.

Como consecuencia de que la ionosfera presente esta alta ionización se obtiene uno de los usos más interesantes que presenta la ionosfera de cara a la vida diaria en la Tierra: el plasma de dicha capa actúa como un espejo para las ondas de radio, por lo que la convierte en el objetivo ideal para las comunicaciones por radio a largas distancias, ya que una emisión que se emita en un punto dado de la Tierra puede llegar a un receptor lejano que en un principio no podría establecer una comunicación directa (debido por ejemplo a la propia curvatura de la Tierra).

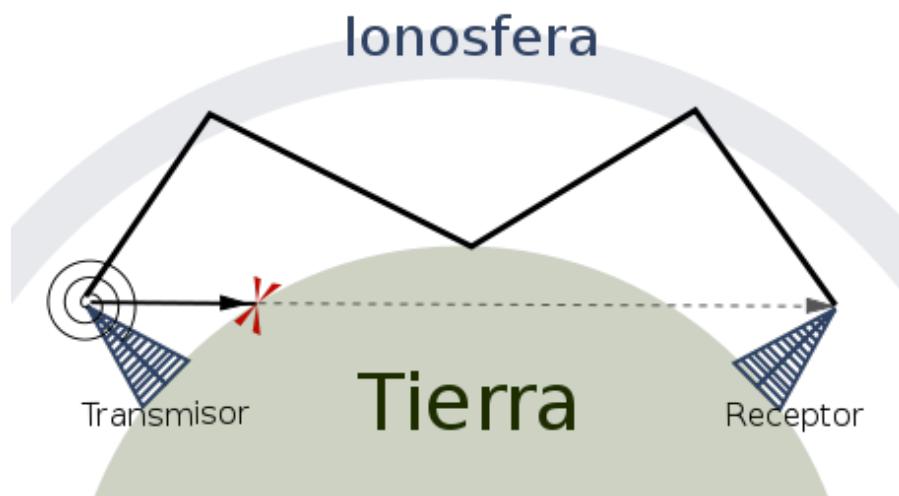


Figura 3.1: Esquema de cómo se puede utilizar la ionosfera para comunicaciones a larga distancia. Imagen de Wikipedia Commons.

Por otro lado, a pesar de que pueda parecer que en estas capas tan altas ya no se tiene una dinámica atmosférica tan diversa como ocurre en las capas más bajas de la atmósfera, esto no es del todo cierto puesto que también se producen tormentas, conocidas como *tormentas ionosféricas*, que son provocadas por una actividad solar intensa, (i.e. cuando se producen flares o CME que llegan a la Tierra). Cuando estas partículas llegan a la ionosfera, pueden producir grandes cambios en la densidad del gas en dicha capa, afectando a la distribución de electrones y por tanto a las corrientes eléctricas que circulan a gran escala por la ionosfera.

Estos cambios afectan sobremanera a las comunicaciones de radio que pasan por dicha

capa, por lo que llegan a producir graves cortes en las comunicaciones por satélite o incluso caídas o grandes interferencias en tendidos eléctricos^[8], debido a la alta carga eléctrica almacenada en la ionosfera.

3.2. Efectos del ciclo de 11 años sobre la atmósfera

3.2.1. Auroras boreales

Como continuación de lo anterior, tenemos otro efecto que se produce en la ionosfera, debido a las fulguraciones solares, por lo que está mucho más modulado por el ciclo solar de 11 años que la continua ionización de dicha capa. En este caso nos estamos refiriendo a las *auroras boreales*, que son las “luces” de diferentes colores que se observan en el cielo normalmente en las regiones polares y que pueden presentar diversas formas y cambian muy rápidamente en el tiempo.

Estos eventos se deben a las partículas del viento solar (protónes y electrones en su mayoría, emitidos desde la superficie del Sol) que llegan hacia la Tierra. Como son partículas cargadas, son obligadas a seguir las líneas de campo magnético terrestre, lo que hace que éste actúe como un escudo en las regiones ecuatoriales, impidiendo que éstas lleguen a la atmósfera, pero en cambio las conduce hacia las regiones polares, donde las líneas de campo “entran” hacia la Tierra.

Por ello, la mayoría de estas partículas entrarán en la atmósfera por las regiones polares (salvo que tengan suficiente energía como para conseguir entrar por regiones más septentrionales, lo cual sucede mucho más raramente, únicamente ante tormentas solares suficientemente intensas, en donde se obtienen auroras incluso en latitudes medias), obteniendo choques con las moléculas de la atmósfera en la capa de la ionosfera, en una región en torno a los 100 km de altura, y que en su mayoría los choques se producirán contra las moléculas de nitrógeno y oxígeno, los cuales producen los colores azul-rojo, y verde-marrón, respectivamente, que se observan en las auroras.

Al chocar con estas moléculas, éstas se excitan hacia niveles más altos de energía, que posteriormente decaen produciendo una emisión en luz visible, siendo ésta la que observamos. Aquí, muchas de las líneas emitidas son líneas prohibidas (es decir, son transiciones que están prohibidas desde el punto de vista de la aproximación dipolar eléctrica), con tiempos de decaimiento lentos (del orden de 10^{-2} s o más lentos), lo cual únicamente es posible que se vean tan intensas debido a que se producen en una capa con una densidad muy baja, facilitando así que los átomos no decaigan antes por colisiones.



(a)

(b)

Figura 3.2: Dos imágenes de auroras boreales, desde Alaska y desde el espacio (ISS). Cortesía de Wikimedia Commons y NASA.

Dado que estos fenómenos se producen debido al viento solar proveniente del Sol, son más comunes cuando existe una mayor actividad solar, es decir durante los máximos de actividad, que es cuando el viento solar es más fuerte a causa de las fulguraciones solares, así que estos eventos están modulados por el ciclo solar de 11 años también.

A pesar de que esto ocurra a una gran altura (en torno a los 100 km), tiene varias consecuencias sobre la superficie, ya que para las tormentas más fuertes, esto produce una tormenta magnética lo suficientemente cargada como para afectar a los tendidos eléctricos, como se ha comentado en §3.1.

3.2.2. Insolación solar

En la sección §2.1.1 se ha detallado el ciclo de actividad solar de 11 años, el cual produce cambios en la luminosidad solar a lo largo del ciclo, ya que durante el máximo de actividad el brillo superficial de la superficie solar es mayor que durante el mínimo de actividad. Esto se traduce en un aumento directo en la insolación que recibe la Tierra, lo que en un principio se podría traducir en un aumento de la temperatura de la Tierra.

Y tal y como vemos en la Figura 3.3, se puede confirmar una variación de la insolación solar como consecuencia del ciclo solar de 11 años, aunque fijándonos en la variación de dicha insolación, $\Delta S \approx 3 \text{ W m}^{-2}$ (mientras que $\bar{S} \approx 1367 \text{ W m}^{-2}$), lo que es una variación inferior al 0.5 %, es decir inapreciable para cualquier efecto que ejerza sobre la atmósfera (lo cual explica por qué no notamos cambios de brillo en el Sol cuando éste se encuentra en su máximo o en su mínimo de actividad). Por ello, en este sentido el ciclo de 11 años

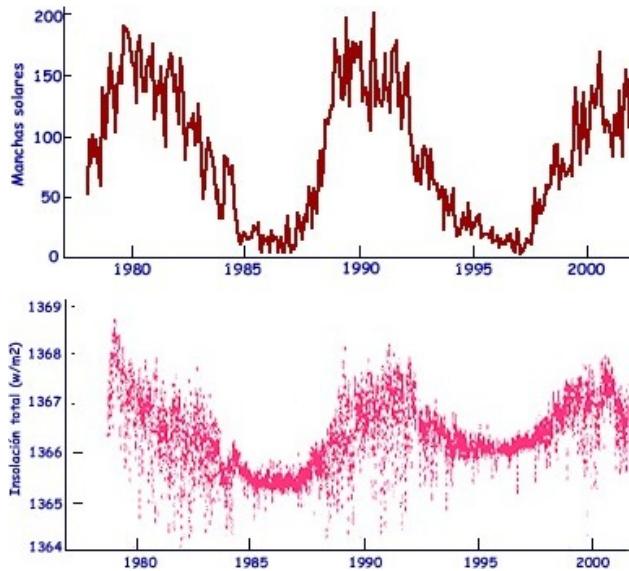


Figura 3.3: Comparación entre la insolación solar que llega a la Tierra y el número de manchas solares presentes en la superficie solar durante los últimos ciclos. Se observa la correlación entre la insolación y el ciclo de 11 años^[7].

habría que descartarlo como influyente en la dinámica atmosférica, puesto que únicamente se observa un promedio de él.

3.3. Efectos de la variación a largo plazo

3.3.1. Mínimo de Maunder

Observando detalladamente la Figura 2.1 se ve cómo destaca un periodo de tiempo que abarca aproximadamente entre 1645 y 1717 conocido, como ya se dijo anteriormente, como el *mínimo de Maunder*, debido a su descubridor.

En esta época se obtuvo una actividad solar muy por debajo de lo habitual, con prácticamente ninguna mancha visible durante todo ese periodo, incluso en los años en que el Sol debería encontrarse en su máximo de actividad, de tal forma que se tienen testimonios^[11] de algunos astrónomos relevantes como G. Cassini en Italia o J. Flamsteed en Inglaterra que comunicaron haber visto su primera mancha solar después de muchos años, y en donde por reconstrucciones de sus observaciones, se ha verificado que en un periodo de unos 30 años, dentro del mínimo, observaron menos de 30 manchas, cuando lo habitual en los últimos siglos es observar unas 40.000 ó 50.000 manchas para el mismo periodo.

Sin embargo, esta no es la única prueba de que verdaderamente existió dicho mínimo

de actividad, ya que existen otras vías por las que se confirma la baja actividad:

- Los registros de auroras boreales, que como ya se ha explicado se producen mayoritariamente en épocas de gran actividad. Aquí, se tiene una gran ausencia de registros de avistamientos a lo largo de toda esa época, lo que parece indicar que efectivamente se produjeron muy pocas auroras, consecuencia de que el Sol no presentaba regiones activas en dicha época.
- La corona solar, visible durante los eclipses, también es un buen test, ya que ésta no siempre tiene la misma forma ni tamaño, sino que cuando hay una gran actividad ésta se observa mucho más extensa e intensa, mientras que cuando hay poca actividad es más tenue. Por ello, las descripciones que se encuentran en libros o manuscritos de esas épocas, permiten reconstruir que existió una corona bastante tenue durante la mayor parte de los eclipses que tuvieron lugar, por lo que es otra confirmación independiente de dicha actividad inusualmente baja.
- Y por último, otro de los síntomas de dicha actividad se infiere de las dotaciones de Carbono 14 y Berilio 10, presentes por ejemplo en los árboles, que como ya se comentó, están influenciados por el flujo de rayos cósmicos que inciden sobre la atmósfera.

Reconstruyendo la actividad solar en dicha época, se ha estimado que el valor e la constante solar durante el mínimo de Maunder era del orden de 3.5 W m^{-2} menor a la actual, es decir únicamente un 0.24% más baja. Que aunque pueda parecer insignificante, un descenso continuo (y no durante breves períodos de tiempo como ocurre durante el ciclo solar) en dicha cantidad se estima que puede hacer descender la temperatura sobre la superficie de la Tierra entre 0.2 y 0.6 °C.

Ahora bien, ya hemos comentado cómo las variaciones en la insolación que produce el ciclo solar de 11 años no presenta indicios fuertes de afectar apreciablemente al clima terrestre, sin embargo aquí estamos hablando de un periodo mucho mayor de tiempo (unos 70 años), por lo que resulta especialmente adecuado para determinar si cambios más prolongados en el tiempo sí que afectan a la dinámica terrestre, ya que durante dicho periodo se debió tener un descenso en la insolación solar.

Por ello, es necesario observar qué condiciones se tenía en esa época en el clima terrestre y si éste presenta cambios apreciables que puedan ser atribuidos a dicho mínimo de actividad.

Durante esa época, que curiosamente coincidió con el reinado de Luis XIV, *le Roi Soleil*, en Francia (1643-1715), se vivió un periodo con una temperatura media más baja de lo habitual, desencadenando la *Pequeña Edad de Hielo*, una época que se suele definir

entre los siglos XVI y XIX (aunque vino propiciada por una tendencia que comenzó desde el siglo XIII) y que presentó una caída de temperaturas de 0.6 - 1 °C, lo que hace que no se le pueda catalogar como una auténtica Edad de Hielo, aunque sí fue una época bastante fría.

Durante esta época se tiene constancia de un avance de los glaciares, a la par de frecuentes congelaciones en varios ríos o canales de Inglaterra u Holanda, obteniéndose incluso varias constancias históricas de congelaciones del río Támesis (Londres) que permitieron organizar fiestas o ferias habitualmente (las conocidas *frost fairs* que pudieron organizarse durante dicha época) o utilizarlo como un nuevo camino en viajes.



Figura 3.4: *The Frozen Thames* (1677). Cuadro del Museo de Londres donde se observa el Támesis totalmente congelado y cómo se hacía vida sobre él.

Es decir, una variación de este tipo en la insolación solar sí induce a pensar que tiene un cierto efecto sobre el clima a escala global terrestre, en forma de un descenso generalizado de las temperaturas, con todos los efectos que eso conlleva. Si bien es cierto que durante dicho mínimo se tiende a pensar que también entraron en juego otros factores ajenos al solar, como son por ejemplo una actividad volcánica ligeramente por encima de lo normal, lo cual también contribuiría a dicho descenso de las temperaturas.

Además de que dicho mínimo fue bastante más acusado en el hemisferio norte que en el sur, en donde aunque sí hay evidencias de dicho mínimo, éste está mucho más atenuado, quizás influenciado por la propia orografía de dicho hemisferio, con una superficie mucho mayor cubierta de océano en lugar de continentes.

3.3.2. Formación de nubes y rayos cósmicos

Ya hemos visto cómo sobre la atmósfera existe una incidencia prácticamente continua de partículas cargadas, los rayos cósmicos, y que los de alta energía (GCR) típicamente interactúan con la troposfera, en torno a los 10 km de altura, produciendo cascadas de partículas entre las que podemos encontrar a niveles más bajos de dicha capa (\sim km) electrones y muones (y sus correspondientes antipartículas).

Esto hace que en dichos niveles se tenga una *fuerte* ionización del aire, debida principalmente a dichos GCR, lo cual indujo a pensar que podría existir una relación entre la formación de nubes y la cantidad de rayos cósmicos que llegan a la Tierra, ya que éstos al ionizar las moléculas presentes en el aire podrían crear núcleos de condensación, a partir de los cuales se comenzaría a formar un mayor número (porcentaje) de nubes.

Los primeros análisis experimentales efectuados para la comprobación de estas hipótesis fueron hechos a partir de la década de los '90, es decir muy recientes, y a través del análisis de varios datos dejaban bastantes señales claras de que existía una fuerte correlación, como la que se puede ver en la Figura 3.5a. Sin embargo, pruebas posteriores no han aclarado si de verdad existe tal correlación o no, ya que dependiendo de la zona en la que se examine el porcentaje de nubes formadas a lo largo de los años se obtiene una mayor o menor correspondencia^[13]. A pesar de ello, sí se induce a pensar en una correlación entre ambos factores, la cual estaría más marcada en las latitudes medias ($40\text{-}60^\circ$) y menos presente en regiones polares, y que afecta a las capas de nubes bajas, formadas entre 1 y 3 km de altura.

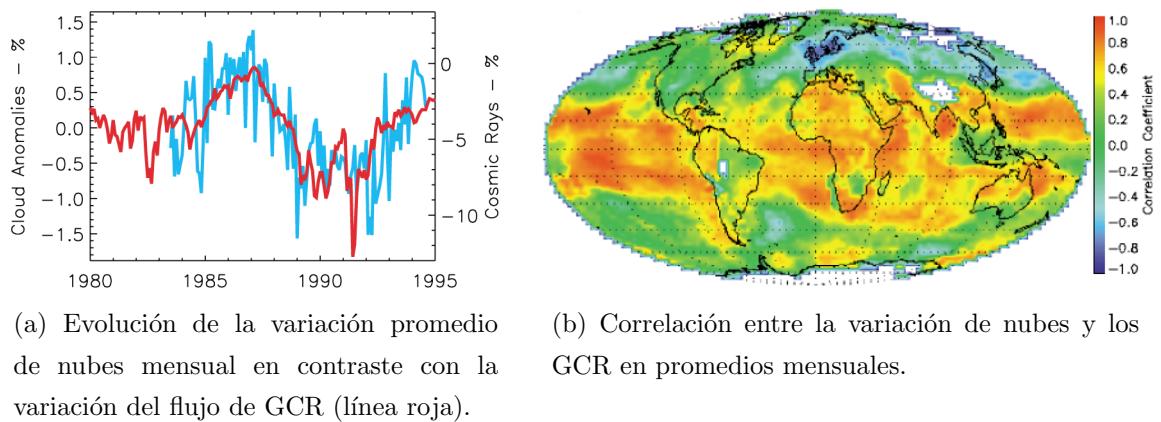


Figura 3.5: Imágenes obtenidas de [15].

Bibliografía

- [1] Xu Zhentao, *Solar observations in ancient China and solar variability*, Phil. Trans. Royal Society of London, A330 (1990)
- [2] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_reconnection
- [4] T. Roca Cortés, *La Corona Solar*, IAC
<http://www.iac.es/gabinete/difus/ciencia/soltierra/9.htm>
- [5] I. G. Usoskin, S. K. Solanki & G. A. Kovaltsov, *Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints*, Astronomy & Astrophysics, 7704 (Feb. 2008)
- [6] Neutron Monitor Database, <http://www.nmdb.eu/?q=node/312>
- [7] Wilson R. & A. Mordvinov, *Secular total irradiance trend during solar cycles*, Geophysical Research Letters, (2003) 30, 3-13-4.
- [8] J. A. Marusek, *Solar Storm Threat Analysis*, Impact (2007)
<http://www.breadandbutterscience.com/SSTA.pdf>
- [9] J. M. Vaquero & M. Vázquez, *The Sun Recorded Through History*, Ed. Springer (2009)
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Aurora_\(astronomy\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Aurora_(astronomy))
- [11] J. E. Beckman & T. J. Mahoney, *The Maunder Minimum and Climate Change: Have Historical Records Aided Current Research?*, ASP Conference Series, Vol. 153 (1998)
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Little_Ice_Age
- [13] E. Pallé et al., *The possible connection between ionization in the atmosphere by cosmic rays and low level clouds*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, **66** (2004) 1779–1790
- [14] H. Svensmark, *Influence of Cosmic Rays on Earth's Climate*, Phys. Rev. Lett. **81**, 22 (1998)
- [15] N. D. Marsh & H. Svensmark, *Low Cloud Properties Influenced by Cosmic Rays*, Phys. Rev. Lett. **85**, 23 (2000)
- [16] K. S. Carslaw, R. G. Harrison & J. Kirkby, *Cosmic Rays, Clouds, and Climate*, Science, 298 (Nov. 2002)