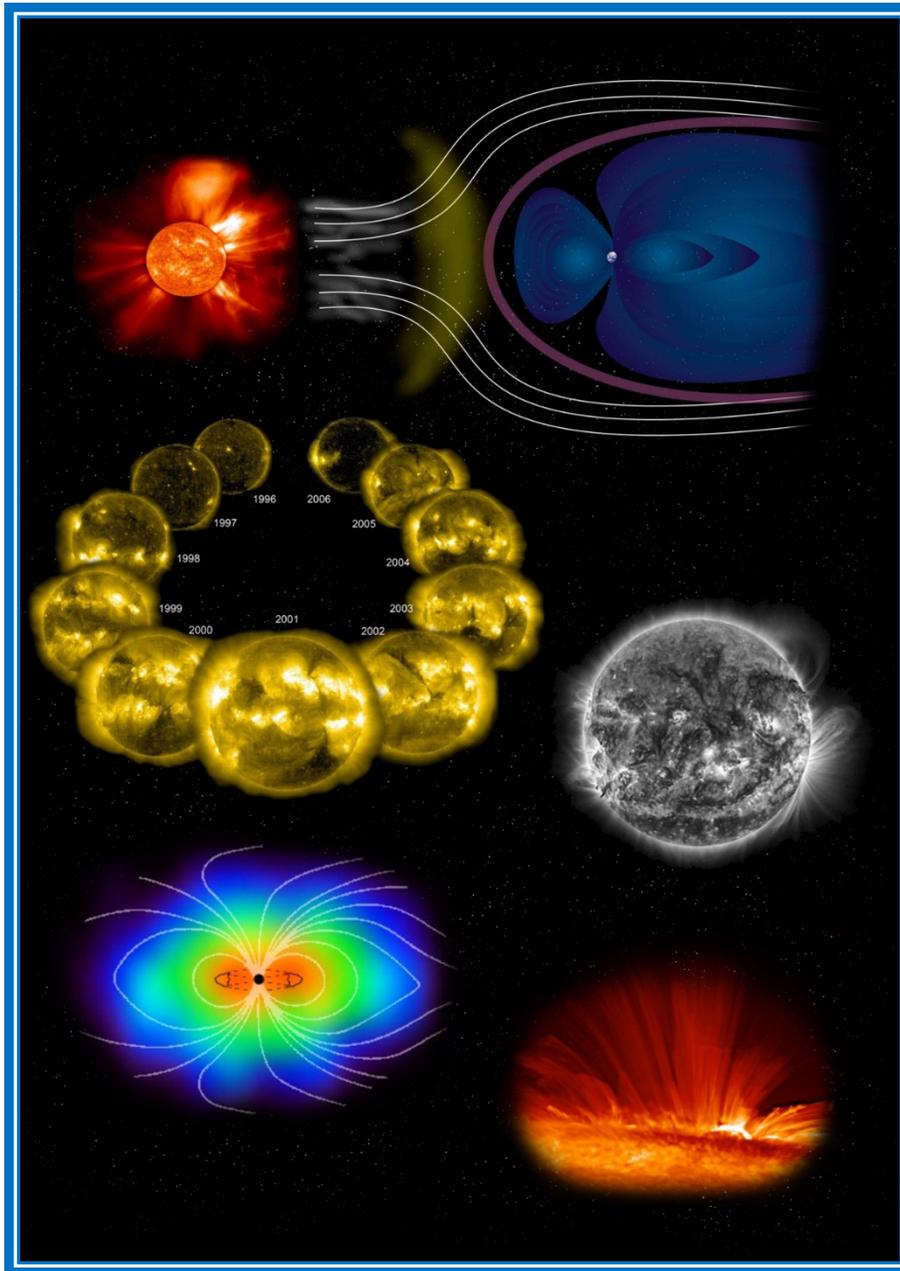


# El magnetismo solar

## CESAR's Booklet



## Introducción a magnetosferas planetarias y al medio interplanetario

La mayor parte de los planetas del Sistema Solar, se encuentran rodeados por unas envolturas magnéticas de gran tamaño. Se conocen como magnetosferas y son producidas por la actividad en el interior del planeta. Estas magnetosferas forman las mayores estructuras del Sistema Solar, llegando a ser entre 10 y 100 veces más grandes que el propio planeta. El viento solar interactúa con estas “burbujas magnéticas” pudiendo moverlas y deformarlas. Pueden ser por tanto inducidas por esta interacción con el viento solar con su ionosfera (Venus y cometas) o por un proceso de dinamo magnética (como ocurre en Mercurio, la Tierra o planetas gigantes).

Ahora que sabemos que existen estas estructuras magnéticas y por qué, las siguientes preguntas que nos surgen son: ¿qué son y cómo podemos ver qué forma tienen? Su forma viene dada por la intensidad de las líneas de campo magnético. Además, estas líneas de campo sirven como camino, como sumidero, para las partículas cargadas que llegan desde el Sol. Estas partículas con carga eléctrica están presentes en toda magnetosfera, aunque la composición y densidad de estas varía de un planeta a otro. Gran parte de ellas se generan en la ionosfera del planeta, por el viento solar o por “partículas satélites” (en forma de anillo) cuyas órbitas vienen descritas por las líneas de campo magnético del planeta.

El movimiento de estas partículas genera grandes campos y corrientes eléctricas, que modifican el campo magnético presente y este, a su vez induce corrientes eléctricas que modifican la trayectoria de las partículas. Por tanto, no es casualidad que estos procesos físicos, tan interrelacionados entre sí, requieran de un complejo y arduo análisis y que hoy en día no se comprendan por completo.

Mientras que la mayor parte de datos y de información que se ha obtenido ha sido recogida por sondas y naves espaciales, se han llegado a detectar desde Tierra la emisión de fotones (en el visible y en ultravioleta) producidos por la excitación de átomos e iones. Por ejemplo, se sabe que electrones acelerados emiten en frecuencias radio y en el visible, llegando a alcanzar desde varios Hz a GHz. Emisiones como esta fueron estudiadas en Júpiter en los años 50, y fueron la primera evidencia de que hay también otros planetas con magnetosfera, y además muy intensa.

### Una breve introducción a los campos magnéticos

Introduzcamos primero el término de campo magnético y lo que es realmente. Un campo es una región del espacio con unas propiedades determinadas, como que actúen o no fuerzas. Por ejemplo, una partícula con carga eléctrica (electrón o  $e$ ) dentro de un campo eléctrico siente esta fuerza eléctrica, sin embargo, si su carga es nula (neutrón) esta fuerza no actuará y la partícula no se moverá. Lo mismo ocurre con un campo magnético, solo que en este caso, la carga magnética corresponde a cargas eléctricas (átomos ionizados) en movimiento, y siendo el campo magnético la magnetosfera.

Los campos magnéticos tienen propiedades muy interesantes. Por un lado, no existen las cargas magnéticas. Cojamos un imán (con su polo Norte arriba y el Sur abajo) y partámoslo ahora por la mitad. No obtendremos un imán Norte y un imán Sur, sino que tendremos dos imanes más pequeños cada uno con su polo Norte y su polo Sur. ¡No existen los monopolos magnéticos! Y, por otro lado, los polos opuestos se atraen y los iguales se repelen. Lo mismo ocurre con las partículas cargadas en movimiento (que generan un campo magnético), y es que se orientan siguiendo las líneas de campo magnético.

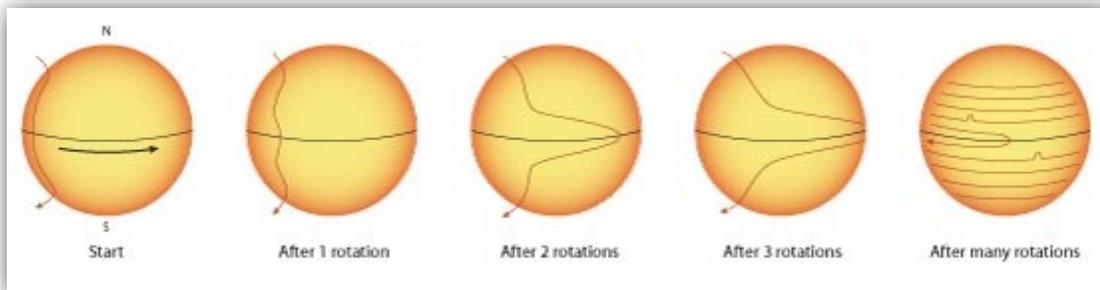
## El campo magnético del Sol

Nuestra Estrella es muy activa magnéticamente hablando. Tiene un campo magnético muy intenso y variable, que va cambiando año a año. Cambia la orientación de sus polos cada vez que alcanza su máximo de actividad, que ocurre una vez por ciclo. Estos ciclos se conocen que tienen una duración de unos 11 años aproximadamente.

También, la actividad magnética del Sol produce numerosos efectos, que todos juntos se conocen como actividad solar. Estos efectos son llamaradas, prominencias, manchas en su superficie y diferencias en el material eyectado en el viento solar.

Algunos de estos efectos también pueden verse desde la Tierra. Por ejemplo, las Auroras Boreales, que pueden verse en latitudes próximas al norte geográfico del planeta. Y, además, se producen a menudo interferencias con los satélites de radiocomunicación y en tendidos eléctricos. También cambia la forma y estructura de las capas más exteriores de nuestra atmósfera. Y, por último, se piensa que estas variaciones en la actividad solar desempeñan y han desempeñado un papel fundamental en la formación y desarrollo del Sistema Solar.

El Sol material por el que está compuesto el Sol se encuentra en estado de plasma, que es básicamente gas a unas temperaturas muy altas. Y al ser “gaseoso” y no ser líquido esto hace que no toda la Estrella rote a la misma velocidad, haciendo que en el ecuador la velocidad sea mucho mayor debido a la conservación del momento angular. Este movimiento diferencial es el principal causante de las variaciones de su campo magnético



**Figura 2:** La rotación del campo magnético del Sol

Créditos: NASA/IBEX

Mira a la Figura 1. El Ecuador del Sol tarda 25 días en dar una vuelta completa, en comparación con los 35 días que tarda en latitudes más polares. Ya que el Ecuador se está moviendo más rápido que otras zonas, esto hace que las líneas de campo se entrelacen entre sí a lo largo del tiempo. Estos entrelazamientos saldrán en la superficie de Sol en forma de erupciones, creando intensas regiones de campo magnético, más frías que sus alrededores, llamadas manchas solares.

Este entrelazamiento de las líneas de campo hace que el Sol se comporte como una gigante dinamo magnética, creando y haciendo desaparecer constantemente nuevas líneas de campo. Este ciclo magnético del Sol dura 11 años, es decir que cada 11 años se produce una inversión de los polos.

El Campo magnético de nuestra estrella no está tan solo por la superficie del Sol, se extiende mucho más allá. La energía magnética, procedente del plasma del Sol es transmitida al espacio,

formando lo que se conoce como campo magnético interplanetario. Estas líneas de campo no son igual que las generadas por un imán, estas líneas de campo se tuercen radialmente dando lugar a una capa de corriente heliosférica, con forma tridimensional de la espiral de Arquímedes (conocida como Espiral de Parker). Puede verse en la Figura 3 la forma mencionada, la capa de corriente heliosférica.



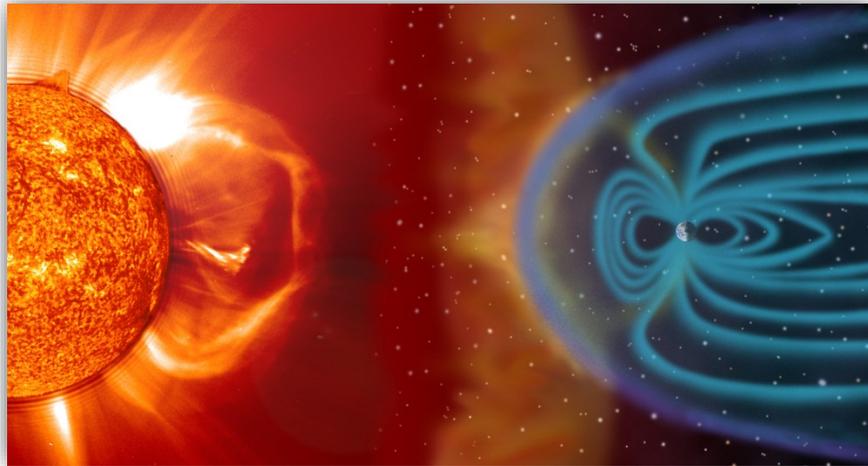
*Figura 3: Capa de Corriente Heliosférica. Créditos: Wikipedia*

La intensidad del campo magnético va disminuyendo según nos alejamos de su superficie, donde la componente dipolar está en torno a los 50–400  $\mu\text{T}$ . Va disminuyendo de manera inversamente proporcional al cubo de la distancia, por lo que aquí en la Tierra este valor teóricamente debería rondar los  $10^{-11}$  T. Sin embargo, varias mediciones han demostrado que la intensidad es 100 veces mayor que la predicha teóricamente. Esto se debe a la acción del plasma que se encuentra en el medio interplanetario, que es capaz de inducir Corrientes eléctricas que generan a su vez campos magnéticos.

## Tormentas geomagnéticas

Una tormenta geomagnética, o tormenta magnética a secas, es simplemente la ruptura del campo magnético de la Tierra. Esta ruptura está producida por la acción de las variaciones de velocidad en las Eyecciones de Masa Coronal. Las eyecciones del Sol son, en otras palabras, rupturas de las capas más externas de la superficie del Sol, de la corona. El material eyectado contiene sobre todo electrones y fotones, con una energía de varios miles de electronvoltios (es decir una temperatura de un millón de grados).

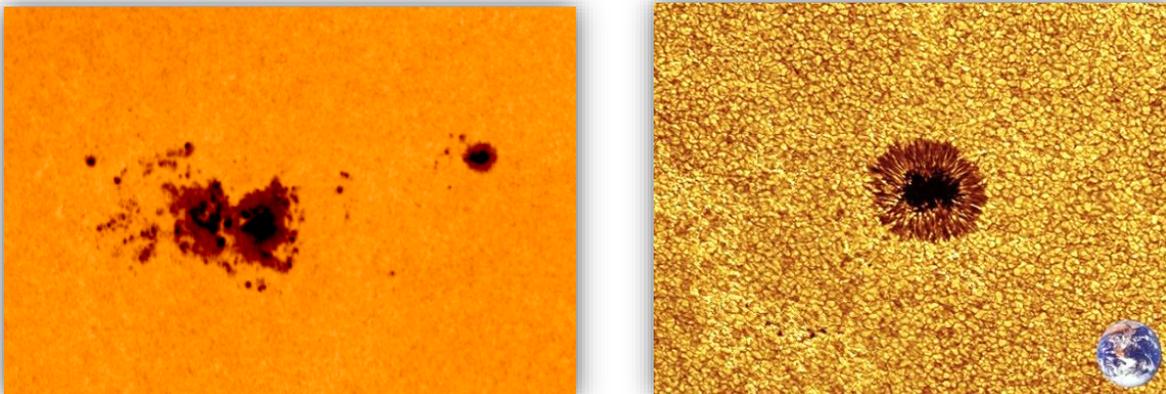
Suelen empezar entre 24-36 horas después de que la eyección haya salido del Sol. Cuando llegan a la Tierra estas partículas llegan a una velocidad altísima, causando cambios en la magnetosfera terrestre. Cuando estas partículas cargadas interactúan con nuestra ionosfera y magnetosfera ionizan las partículas presentes en la atmósfera. Suelen durar 24-48 hora, pero pueden prolongarse durante varios. Una vez cada década aproximadamente suele llegar una tormenta muy energética, y cada 100 años una todavía más energética y potencialmente devastadora. Algunos efectos de estas tormentas geomagnéticas son, por ejemplo: inducción de corrientes en las líneas de alta tensión, fallos en los satélites, GPS...y por supuesto las Auroras Boreales.



**Figura 4:** Una Imagen de una Eyección de Masa Coronal saliendo del Sol. Básicamente, estas eyecciones son enormes burbujas de plasma rodeadas por el campo magnético del Sol que ha estado alimentándolas durante varios minutos o incluso horas. La nube de partículas cargadas que viajen en dirección a la Tierra puede interactuar con la magnetosfera, y causar infinidad de efectos como interferencias en las radios o fallos de sistemas muy sofisticados o las Auroras Boreales.  
Créditos: ESA/NASA

## Manchas solares

Como habíamos mencionado, una mancha solar es una zona de la fotosfera que se encuentra inmersa en una intensa actividad del campo magnético del Sol. Esta actividad hace que el proceso convectivo, mediante el cual el material caliente de abajo ascienda, se detenga. Por consiguiente, la temperatura de esta región es inferior a la del resto. Pero el campo magnético en estas zonas es mucho mayor que en el resto del Sol y unas 2 000 más intenso que el de la Tierra.



**Figura 5:** Fotografías de las manchas solares. La de la izquierda es un grupo de manchas: normalmente la parte derecha tiene una polaridad (por ejemplo “norte”) y la de la izquierda la otra (“sur” por ejemplo). La imagen de la derecha es una vista de una mancha, en comparación con el tamaño de la Tierra.

Credit: ESA/NASA

Debido a la intensidad del campo magnético, la presión dentro de la mancha aumenta, aunque por otro lado disminuye debido a la presión atmosférica hace que disminuya hasta que se iguala con el resto de la presión atmósfera solar. De esta manera se consigue frenar el avance hacia la superficie de nuevo material caliente procedente del interior. Por esta razón la temperatura es inferior al resto de sus alrededores, aunque su temperatura siga siendo muy alta y se vean de un color oscuro. Las partes más oscuras se denominan “umbra” y la zona más próxima con un tono más claro se llama “penumbra”.

Si lo vemos numéricamente, la temperatura en la fotosfera está en torno a 5 500 Celsius, mientras que la de una mancha solar es de 4 000 Celsius. Y es precisamente esta diferencia de temperatura la que hace visibles a las manchas con ese color tan oscuro.

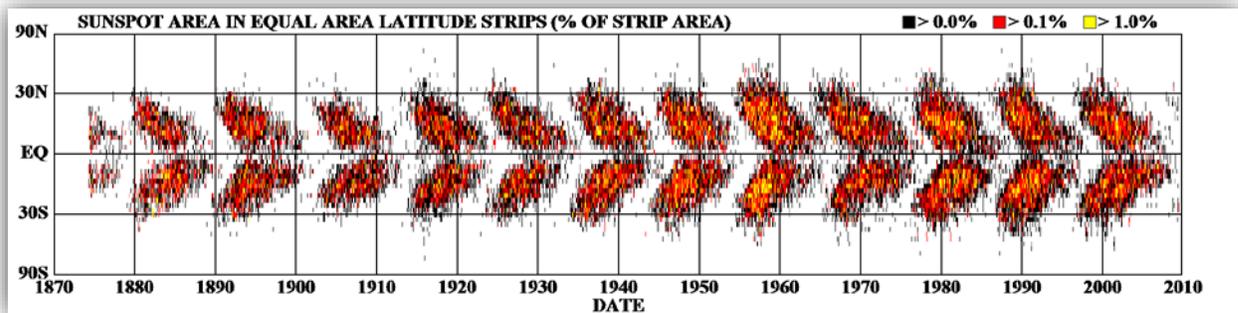
El tamaño medio de una mancha solar es aproximadamente el de nuestro planeta. Aunque estos pueden tener diversos tamaños y formas, pudiendo ser 100 veces más pequeñas o 1 000 veces más grandes.

Los científicos que observan el Sol miden el área total de la superficie del Sol que está cubierta por estas manchas. Da un resultado muy cuantitativo acerca de la actividad solar, ya que a mayor área de manchas el Sol está más activo y a menor manchas menos activo. Han observado también que no son permanentes, sino que van cambiando a lo largo de cada semana o incluso cada día. También que el número de manchas visibles y su tamaño varía periódicamente.

Para medir la actividad solar fijándonos en el número de manchas, hay que hacer uso del “Número de Wolf”. Este número viene dado por el número de manchas y de grupos de manchas que se observan cada día. Representando a lo largo del tiempo estos datos podemos observar también que el Sol tiene un ciclo periódico.

### **El diagrama de Mariposa de Maunder**

Al principio de cada ciclo solar es normal que aparezcan manchas y que lo hagan en grupos. Se ha observado también que los grupos se dan sobre todo en latitudes heliográficas en torno a 5° y 35°. Hay muchos pequeños grupos en estas zonas, en estas bandas, y a partir de los 40° apenas hay presencia de ellas. Además, la aparición de las manchas sigue un patrón muy llamativo a lo largo de cada ciclo. Cuando el ciclo se encuentra en un mínimo (pocas manchas), las que aparecen lo hacen muy cerca del ecuador; y cuando se encuentra en un máximo hay manchas que ahora sí aparecen en latitudes más altas. Esta característica forma un llamativo patrón del que hablábamos, en concreto en forma de mariposa. Fue descubierto por Edwar y Annie Maunder en 1904.

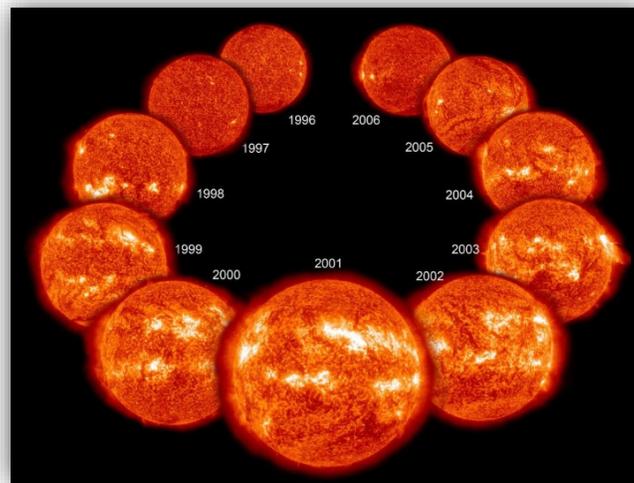


**Figure 7:** El diagrama de Mariposa

Créditos: NASA

Edward y Annie fueron los primeros en darse cuenta de este patrón, cuando representaron la posición (latitud) respecto al tiempo. El tamaño de las manchas no fue considerado para este diagrama, y a día de hoy tampoco se considera.

Un astrónomo alemán a mediados del siglo XIX llamado Samuel Schwabe se dio cuenta del patrón periódico que sigue el Sol cada 11 años de actividad. Y después de varios ciclos de 11 años se ha podido confirmar que existe, y se conoce como ciclo solar.



**Figura 8:** Esta imagen muestra un ciclo solar, desde 1996 hasta 2006. En 2001 se observa el máximo solar y es posible ver todas las manchas y regiones activas.

Créditos: ESA/NASA

Los polos magnéticos del Sol se invierten cada 22 años, por lo que hay dos ciclos de actividad por cada ciclo completo. El campo magnético del Sol tarda entonces 11 años en invertirse, en pasar de ser el Sur a ser el Norte. Y 11 años después volverá a ser Sur de nuevo.

Y se ha podido reconstruir hacia atrás este ciclo y remontarse hasta la época de Galileo, quien observe el Sol por primera vez en el siglo XVII, y se sigue documentando por astrónomos modernos a día de hoy.