

Meteorología Espacial: Los Efectos de las Tormentas Solares a la Tierra

Estefania Blanch LLosa y David Altadill Felip

Abstracto—*La Tierra se ve directamente afectada por la actividad solar. La meteorología espacial es la ciencia que pretende, por un lado, comprender y predecir el estado del Sol y del entorno interplanetario y por otro lado, prever los posibles efectos que esta actividad solar puede tener en los sistemas biológicos y tecnológicos. Debido a que cada vez la sociedad es más dependiente de las infraestructuras terrestres y espaciales, cada vez somos más vulnerables a los efectos de la actividad solar. En este artículo se pretende dar a conocer la actividad solar y su influencia en los sistemas tecnológicos actuales y cómo la meteorología espacial ayuda a conocer, prever y mitigar sus efectos.*

Palabras clave—a meteorología espacial, tormentas solares

I. INTRODUCCIÓN

ESTE artículo consiste en dar una visión general de qué es la meteorología espacial y qué impactos puede tener sobre la vida en la Tierra. Primero que nada, empecemos por conocer su definición. La definición europea actual para el término meteorología espacial es la siguiente [1]:

“El tiempo espacial es el estado físico y fenomenológico de los entornos espaciales naturales. La disciplina asociada -la meteorología espacial - pretende, a través de la observación, monitorización, análisis y modelado, varios objetivos: por una parte, comprender y predecir el estado del Sol, de los entornos interplanetario y planetarios, así como de las perturbaciones que les afectan, sean de origen solar o no; por otra parte, analizar en tiempo real y prever los posibles efectos en los sistemas biológicos y tecnológicos.”

Aunque el término meteorología espacial ha sido desconocido por el público general hasta hace pocos años, sus actividades de investigación se han llevado a cabo desde el siglo XIX. La mayoría de los científicos están de acuerdo que el descubrimiento de las manchas solares por parte de Galileo Galilei en 1610 fue el punto de partida de los estudios sobre la relación Sol-Tierra, pero hicieron falta más de dos siglos para que hubiese datos de calidad de las manchas solares. Lo mismo ocurrió con el campo magnético terrestre. En el siglo XVII ya se hablaba de la evidencia de la existencia del campo magnético terrestre pero no fue hasta 1868 que empezó a haber datos magnéticos con los que trabajar [2]. Esfuerzos como los que se produjeron en 1830 a partir del cual se estableció la primera red mundial de magnetómetros y en 1882 (primer año Polar internacional) en el que se potenció la instalación de magnetómetros en las áreas polares, fueron decisivos para empezar la distribución de datos del campo magnético terrestre a nivel internacional. Estos esfuerzos continuaron y en 1957, después del Año Geofísico Internacional, se trabajó para potenciar e instalar observatorios geofísicos alrededor del mundo y desde entonces se tiene una gran cantidad de datos geofísicos y solares que se pueden compartir en tiempo real. La carrera espacial también ha significado un adelanto para el estudio de la meteorología espacial, ya que actualmente, existen muchas misiones espaciales que

analizan tanto la actividad solar como el medio interplanetario o el campo magnético terrestre desde el espacio.

A medida que la sociedad progresa depende cada vez más de la infraestructura espacial y terrestre que es vulnerable a los efectos de la meteorología espacial. Es por esta razón que existe una necesidad de acción por parte de los seres humanos para mitigar sus consecuencias. Casos de eventos de meteorología espacial como la tormenta solar de marzo de 1989 o la de octubre de 2003 causaron interrupciones a nivel global de los sistemas de navegación por satélite y dañaron significativamente estructuras terrestres como serían los transformadores eléctricos de alta tensión.

II. EL SOL, FUENTE PRINCIPAL DE LA METEOROLOGÍA ESPACIAL

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y el centro de nuestro Sistema Solar, por lo que la actividad que en él ocurra nos puede afectar directamente. Se trata de una gran bola de plasma (gas ionizado) en la que su energía se obtiene de la fusión nuclear que ocurre en su interior de manera que dos núcleos de Hidrógeno (4 protones) se fusionan para formar un núcleo de Helio (partícula alfa). Esta fusión nuclear es la responsable de la gran energía que desprende el Sol en forma de radiación [3]. La radiación que nos llega del Sol se puede clasificar según su energía, de menos a más, como: radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos Gamma (Fig. 1). Afortunadamente, la atmósfera terrestre no deja pasar la radiación más energética (ultravioleta, rayos X y rayos Gamma) ya que sería la radiación más dañina para los sistemas biológicos terrestres. Además de la radiación, el Sol emite continuamente una gran cantidad de materia en forma de protones energéticos y electrones, lo que se conoce como viento solar (en la sección 2.4 se explicará con más detalle).

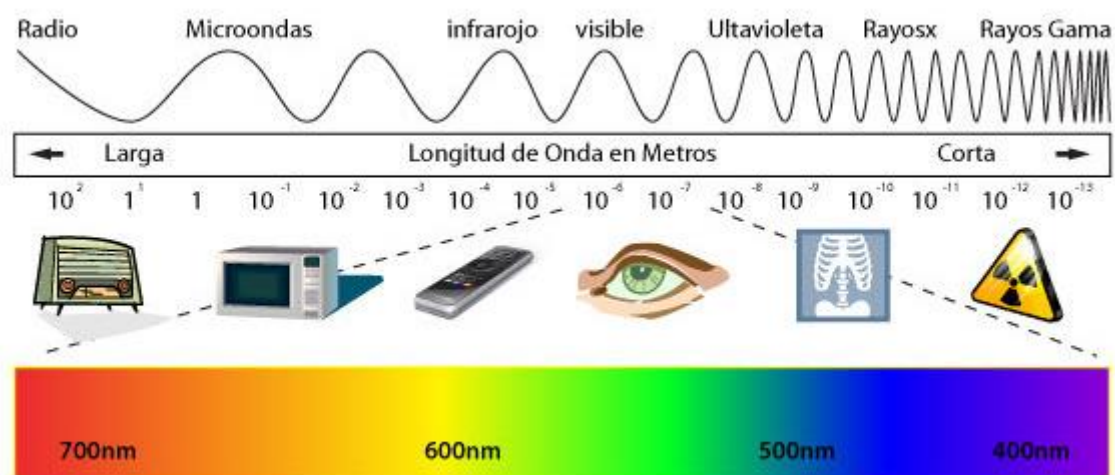


Fig. 1 Espectro de la radiación solar según su energía. A mayor energía, mayor es la longitud de onda. Imagen obtenida de Costa, A, Sunlight Spectra, 3rd EAAE Summer School Proceedings, Ed. Rosa Ros, Brie, 1999

Es importante pues, observar y estudiar el Sol, pues su actividad nos afecta directamente, ya sea a través del viento solar en forma de partículas cargadas, como a través de la radiación que nos envía. Ya hace más de 100 años que se observa el Sol desde la Tierra, con aparatos más o menos sofisticados. Se ha intentado captar toda su actividad. Con los avances tecnológicos de la última mitad del siglo XX se ha empezado a observar el Sol desde satélites, por lo que evitamos el efecto que puede tener la atmósfera terrestre sobre la observación: absorción, mala visibilidad, etc. Utilizando los satélites se puede tener un registro continuo de la actividad solar y de la radiación que emite en todo su espectro, haciendo que cada vez tengamos más observaciones para entender mejor su física. Además, utilizar satélites para la observación del Sol hace posible la predicción de sus

efectos en la Tierra ya que posicionar satélites en la línea Sol-Tierra hace que sepamos qué va a llegar a la Tierra antes de que llegue. Así ha aparecido la meteorología espacial ya que es importante conocer la actividad solar para poder evitar sus efectos sobre la vida de las personas, tales como la protección de los astronautas, interferencias en las comunicaciones, cortes en la corriente eléctrica, etc. Hoy en día, la mayoría de los procesos que tienen lugar en el Sol se conocen bastante bien, pero no lo suficientemente como para permitir su predicción en una escala de tiempo adecuada.

La actividad solar tiene su origen en el campo magnético del Sol, que es resultado del flujo de electrones e iones en su interior. Este campo magnético es muy intenso y complejo debido, entre otras cosas a la rotación diferencial del sol (la velocidad de rotación depende de la latitud). Esto provoca que las líneas de campo magnético se entrelacen entre ellas y generen poderosas perturbaciones magnéticas (Fig. 2). Debido a que las partículas (electrones e iones) en un plasma tienen una carga eléctrica, el movimiento y comportamiento del plasma se ve afectado por los campos eléctricos y magnéticos. Así pues, las partículas cargadas de la superficie del Sol están fuertemente ligadas al campo magnético y a sus perturbaciones. El campo magnético solar presenta una variación periódica de 11 años aproximadamente, pasando por un estado de calma hasta llegar a un período de mucha perturbación de manera que la actividad solar presenta también este período de 11 años.

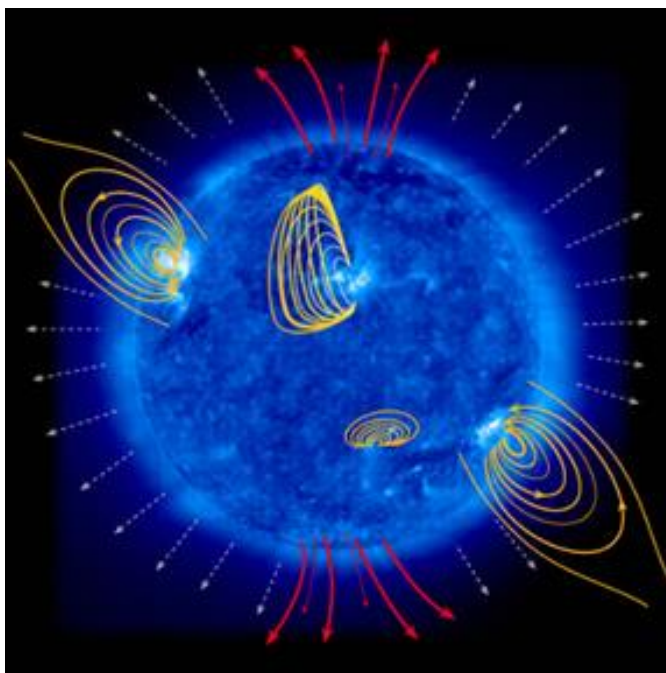


Fig. 2 Dibujo esquemático de las líneas de campo magnético. Las flechas rojas indican líneas de campo magnético abiertas que salen de los polos. Las flechas grises representan la trayectoria del viento solar que puede arrastrar consigo el campo magnético. Las partes brillantes representan las regiones activas que corresponden a zonas de líneas de campo magnético cerradas. Imagen obtenida de "The Dynamic Sun" de la NASA

La actividad solar se manifiesta en las capas más externas del Sol, que son las podemos observar. La fotosfera (Fig. 3 izquierda) es la capa más interna de la superficie del Sol y se encuentra a una temperatura aproximada de 6000 grados. La luz emitida en la fotosfera está en el espectro del visible, por lo tanto, es la que podemos ver sin utilizar ningún filtro. La cromosfera (Fig. 3 derecha) está situada por encima de la fotosfera y está a mayor temperatura (60000 grados); por lo que emite luz de mayor energía, en el espectro del ultravioleta y rayos X. Para observarla es necesario recurrir al uso de filtros adecuados y telescopios situados en el espacio. Y finalmente la corona (Fig. 4) que es la parte más externa y que se extiende hasta una distancia de muchos radios solares. Se encuentra a unos 2 millones de grados. Desde la Tierra, la corona únicamente se puede observar a simple vista durante el breve periodo de un eclipse total de Sol. Afortunadamente, la tecnología permite hoy en día observar la corona solar de manera continua desde el espacio.

A continuación, vamos a presentar la actividad solar responsable de la mayoría de los efectos que puede haber en la Tierra.

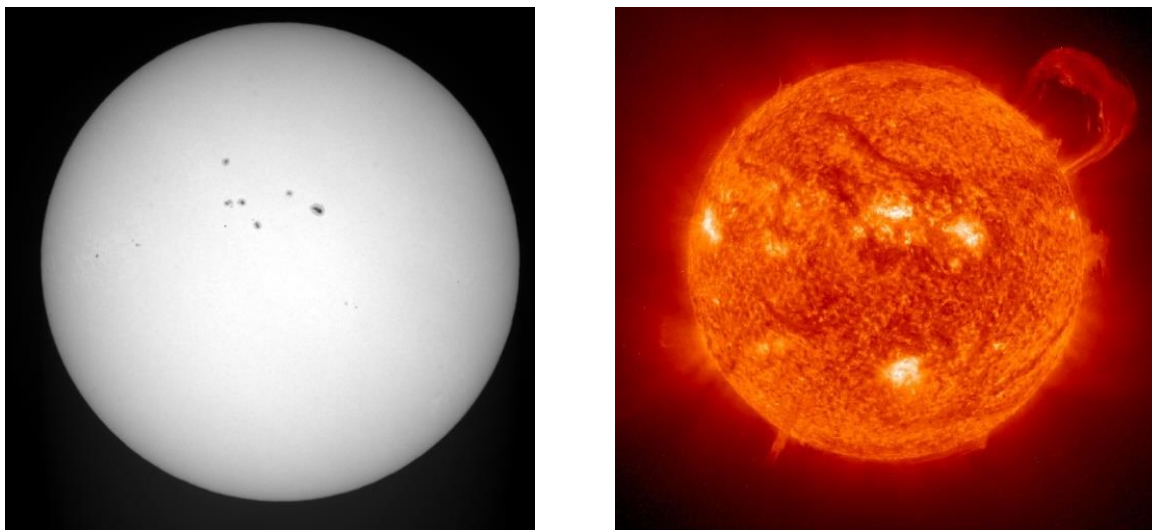


Fig. 3 Izquierda) Imagen en blanco y negro de la fotosfera solar tomada por el Observatorio del Ebro en la que se observan las manchas solares. Imagen tomada el 11 de mayo de 2014. Derecha) Imagen de la cromosfera solar observada en el espectro del ultravioleta extremo tomada por el satélite SOHO en la que se observan las regiones activas como las zonas más brillantes y una protuberancia en la parte superior derecha de la imagen. Imagen tomada el 14 de septiembre de 1999



Fig. 4 Corona solar tomada desde Svalbard (Noruega) durante el eclipse total de Sol del 20 de marzo 2015

A. Manchas Solares

Una de las manifestaciones más características de la actividad solar son las manchas solares (Fig. 5), que aparecen sobre la superficie del Sol (fotosfera). Las manchas solares son regiones del Sol donde el campo magnético es muy intenso y la temperatura es menor que en el resto de la fotosfera (hasta 2000 grados menos); por esta razón se ven más oscuras [4]. Debido al movimiento de rotación del Sol sobre su eje, que tiene un periodo de 27 días, estas manchas aparecen por el limbo Este del Sol, pasan por su meridiano central, en línea recta Sol-Terra, y desaparecen finalmente por el Oeste, si su vida es suficientemente larga. Varían de día en día y tienen una vida media entre días y semanas. Su aparición está ligada al campo magnético solar; por lo tanto, su número pasa de un mínimo a un máximo cada 11 años aproximadamente. Estas zonas corresponden a las zonas activas de la superficie del sol donde las líneas de campo magnético están cerradas (Fig. 2).

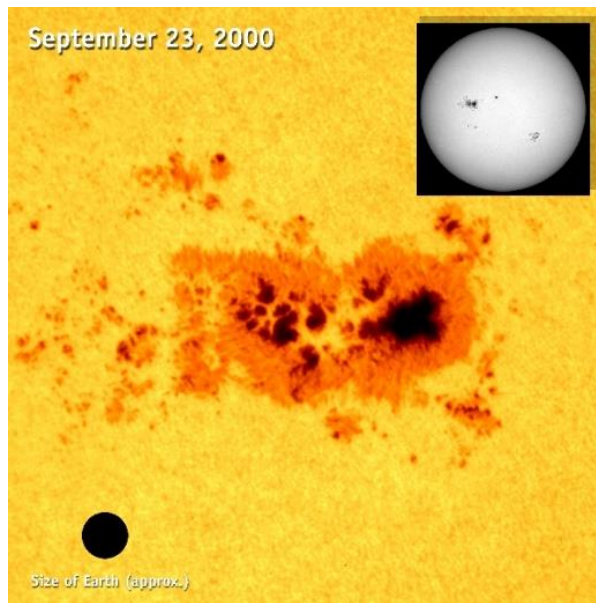


Fig. 5 Imagen detallada de un grupo de manchas solares, en la que se puede ver la parte más central de la mancha más oscura, ya que se encuentra a menor temperatura. Imagen tomada por el satélite SOHO el 23 de septiembre del 2000. Se puede comparar el tamaño de la mancha solar con el tamaño de la Tierra (abajo a la izquierda)

B. Filamentos y protuberancias

Los filamentos son estructuras en forma de hilo que se observan en la cromosfera (Fig. 6). Son nubes de plasma densas y más frías suspendidas sobre la superficie solar atrapadas por las líneas de campo magnético solar. Se pueden observar prácticamente sin variaciones durante días, semanas o incluso meses y suelen aparecer por encima de las manchas solares donde el campo magnético está fuertemente perturbado (Fig. 2). Las protuberancias son lo mismo que los filamentos, pero vistas por su proyección fuera del límite del disco solar en las que se observa su forma de bucle (Fig. 2). Algunas veces, estas estructuras pueden romperse y dar lugar a lo que se conoce como fulguración solar o eyección de masa coronal.

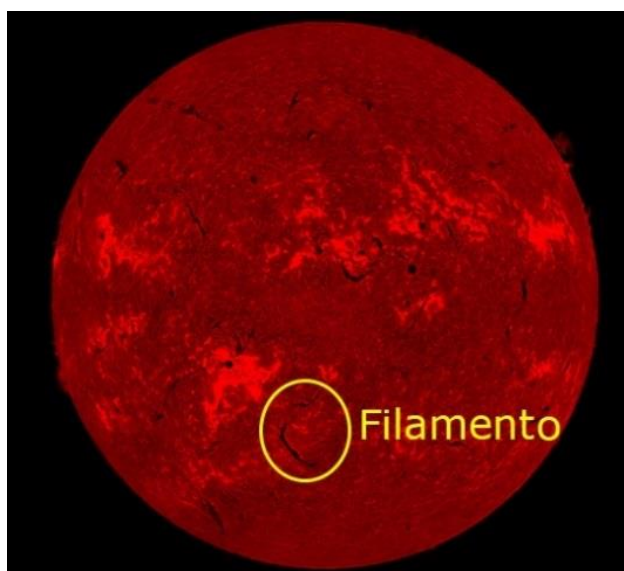


Fig. 6 Cromosfera solar donde se pueden observar varios filamentos (líneas negras). Aparecen de color negro porque son zonas más frías que su entorno. Esta imagen fue tomada el 18 de Julio de 2000 por el telescopio del observatorio solar Big Bear

C. Fulguraciones solares

Las fulguraciones solares son enormes explosiones repentinas y violentas de energía y/o materia (electrones y protones) que tienen lugar cerca de zonas activas en la cromosfera. Ocurren cuando el campo magnético de la superficie solar se vuelve demasiado enredado y se rompe. Se observa como una zona que se ilumina repentinamente con una durada de unos pocos minutos (Fig. 7). Las erupciones solares emiten grandes cantidades de radiación electromagnética, que incluyen rayos X,

radiación ultravioleta, luz visible y ondas de radio. ¡La energía emitida por una fulguración solar es más de un millón de veces mayor que la energía de una explosión volcánica en la Tierra! Las fulguraciones solares a menudo suelen ir acompañadas de una eyección de masa coronal, aunque los científicos todavía están tratando de determinar exactamente cómo se relacionan los dos fenómenos. Debido a que las fulguraciones solares brotan de los campos magnéticos intensos en las cercanías de las regiones activas del Sol, éstas son más comunes durante los períodos del máximo del ciclo solar.

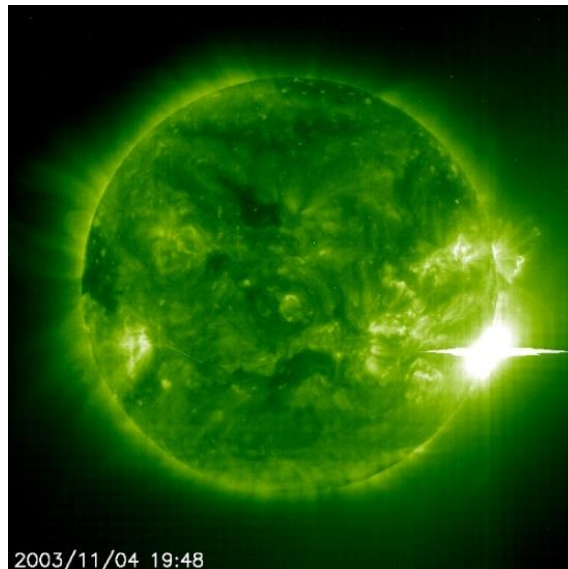


Fig. 7 Fulguración solar ocurrida el 4 de noviembre de 2003. Imagen tomada por el satélite SOHO. La fulguración se observa durante pocos minutos como una zona muy brillante de la cromosfera solar en la que se libera una gran cantidad de energía que llega a la Tierra

D. Viento solar

El viento solar es un flujo continuo de plasma (básicamente formado por protones energéticos y electrones) que sale expulsado hacia el exterior de la superficie del Sol (Fig. 2) y viaja hacia el sistema solar llegando más allá de la órbita de Plutón [5]. La temperatura de la corona solar es tan alta que la gravedad no es capaz de retener este material. Viaja a una velocidad media de 400 km/s en dirección hacia el exterior, pero puede sufrir cambios en su velocidad de manera que puede haber interacciones entre zonas de alta y de baja velocidad. En su paso por el entorno terrestre empuja y da forma a la magnetosfera terrestre de manera que comprime la cara que da al Sol y estira por la parte nocturna (Fig. 8).

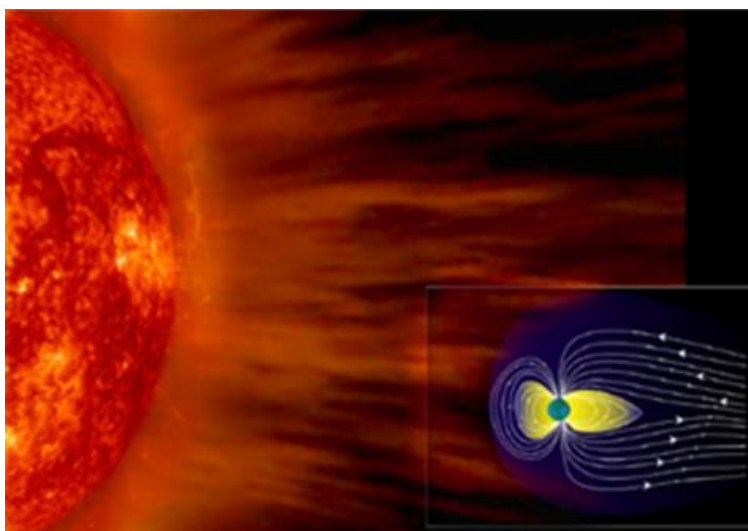


Fig. 8 Composición en la que se ilustra el viento solar que emerge continuamente del Sol y cómo este modela la forma del campo magnético terrestre, comprimiendo las líneas de campo que dan de cara al Sol y alargando las del lado opuesto dando forma de cola a la magnetosfera terrestre

E. Eyecciones de masa coronal

Una eyección de masa coronal (Fig. 9) es una explosión violenta que expulsa millones de toneladas de material de la corona solar hacia el sistema solar en la dirección en la que ha sucedido. Se expulsan partículas energéticas (principalmente protones y electrones) a velocidades que pueden alcanzar los 1000 km/s y potentes campos magnéticos. La mayoría de las eyecciones de masa coronal se forman sobre regiones magnéticamente activas en las proximidades de las manchas solares por lo que son mucho más comunes durante la fase del máximo del ciclo solar cuando abundan las manchas solares y las perturbaciones magnéticas en el Sol. Este tipo de actividad solar no se observó hasta que se empezó a utilizar el coronógrafo, telescopio con un disco que produce un eclipse de Sol artificial. Esto permite una observación continua de la corona solar y no sólo durante los minutos que dura un eclipse. Las eyecciones de masa coronal varían muy bruscamente el flujo normal de viento solar y esto puede llegar a tener efectos importantes en la Tierra y su entorno que se detallarán más adelante. A menudo van asociadas a fulguraciones y protuberancias, pero también pueden tener lugar en ausencia de estos procesos.

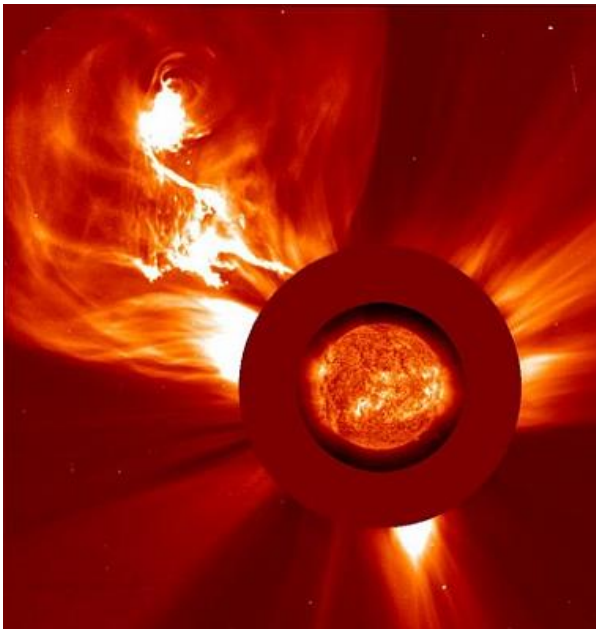


Fig. 9 Eyección de masa coronal ocurrida el 4 de enero de 2002. La imagen fue tomada por el satélite SOHO. Se observa claramente la gran eyección de masa en la parte superior izquierda de la imagen

F. Agujeros coronales

Los agujeros coronales son regiones de la corona solar que, en las imágenes del Sol tomadas en rayos X y ultravioleta, se ven más oscuras comparando con su entorno (Fig. 10). Se observa más oscuro porque el plasma en esas regiones está más frío que en otras partes de la corona solar. En la mayor parte de la corona solar, las líneas de campo magnético se tuercen y vuelven de nuevo hacia el Sol. El plasma solar, está ligado a estas estructuras magnéticas formando lo que ya hemos descrito como filamentos o protuberancias (Fig. 3 derecha y Fig. 6). En aquellos lugares donde las líneas de campo magnético no se tuercen y no vuelven al Sol es donde se observan los agujeros coronales (Fig. 2). En estas zonas, el plasma ligado a estas líneas de campo “abiertas”, puede escapar más fácilmente del Sol pero lo hace sin la violencia de una eyección de masa coronal (fig. 8). Aun así, el plasma se escapa del Sol a una velocidad mayor (aproximadamente el doble) que el viento solar del resto de la corona solar produciendo algunos efectos importantes cuando éste llega a la Tierra y su entorno. Durante un mínimo solar, cuando el campo magnético solar es más estable, los agujeros coronales suelen aparecer cerca de los polos solares (Fig. 2). En cambio, durante los años de máxima actividad solar, cuando el número de manchas solares aumenta y el campo magnético solar está más perturbado, los agujeros coronales pueden aparecer casi en cualquier parte del Sol.

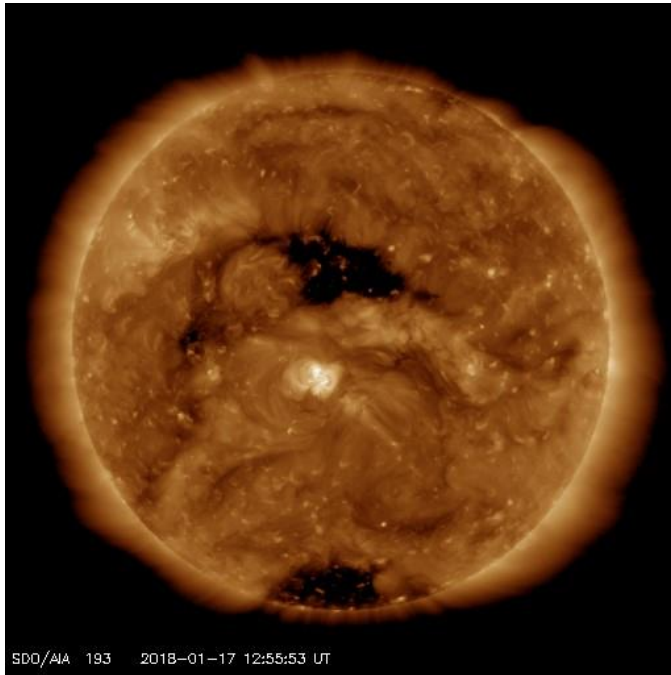


Fig. 10 Corona solar tomada por el satélite SDO (Observatorio Solar Dinámico) de la NASA. En esta imagen se pueden apreciar dos zonas de la corona solar más oscuras que el resto. Corresponden a dos agujeros coronales, por los que el plasma solar escapa más rápidamente que en el resto de la corona solar. Esta imagen fue tomada el 17 de enero 2018

III. INTERACCIÓN SOL-TIERRA

En los periodos de calma solar se produce una salida constante de partículas de plasma procedente de la corona solar; es el llamado viento solar. Este plasma, formado básicamente por electrones y protones, sale a velocidades de 400 km / s, "arrastrando" con él las líneas del campo magnético solar, llamado campo magnético interplanetario y se extiende hasta más allá del sistema solar.

La Tierra tiene el privilegio de tener la protección del campo magnético que hace desviar las partículas cargadas que nos llegan constantemente del Sol. Éste campo magnético se genera en el interior de la Tierra debido a la rotación del núcleo externo rico en hierro y níquel [6]. La existencia del campo magnético es imprescindible para la vida a la Tierra ya que nos protege de la llegada directa de las partículas cargadas que vienen del Sol y evita que el viento solar arrastre la atmósfera terrestre hacia el espacio exterior. La cavidad donde queda confinado el campo magnético terrestre llamada magnetosfera. Todo aquello que está fuera de la magnetosfera está directamente expuesto al espacio interplanetario y por lo tanto puede ser afectado dramáticamente cuando la actividad solar es intensa y especialmente por la ocurrencia de una eyección de masa coronal que es el evento solar más violento.

Cuando una eyección de masa coronal va dirigida hacia la Tierra, puede ser peligrosa para los satélites, las naves espaciales, los astronautas, la tripulación aérea y puede afectar a los sistemas de comunicación y navegación terrestres. Cuando el material expulsado por una eyección de masa coronal colisiona con la magnetosfera terrestre (2-3 días después de salir del Sol), ésta se ve significativamente alterada debido al incremento de presión provocado por la eyección de masa. La magnetosfera se comprime más de lo habitual por la parte del hemisferio diurno y se alarga por el hemisferio nocturno [5]. Esta alteración en el campo magnético de la Tierra da lugar a lo que se conoce como tormenta geomagnética. Además, si el campo magnético interplanetario tiene orientación sur cuando llega a la magnetosfera, estos dos campos magnéticos se reconectan y las partículas cargadas transportadas por el campo magnético interplanetario pueden quedar ligadas al campo magnético terrestre y llegar a la atmósfera por los óvalos aurorales, entre los 68º y los 75º de latitud (variables) [7]. Es allí donde pueden dar lugar a las conocidas auroras, ya sean boreales si hablamos de latitudes norte, como australes, si hablamos de latitudes sur. Estas auroras se producen cuando estas partículas solares entran en contacto con las moléculas de gas de la atmósfera.

IV. EFECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS DE LA ACTIVIDAD SOLAR

Una vez ha ocurrida una eyección de masa coronal y la nube de partículas cargadas ha llegado al entorno terrestre, es importante conocer el impacto que puede tener en nuestros sistemas tecnológicos para que su funcionamiento no se ve afectado; o si más no intentar mitigar lo máximo posible sus efectos. A continuación, presentamos algunos de los efectos más significativos que puede causar una eyección de masa coronal cuando llega a nuestro planeta.

A. Auroras

Las auroras (Fig. 11) son “cortinas” de luz que se pueden ver en el cielo nocturno cerca del polo Norte (auroras boreales) y también cerca del polo Sur (auroras australes). En condiciones de actividad solar elevada, parte de las partículas provenientes del Sol pueden superar la magnetosfera y ser atrapadas por el campo magnético terrestre, que las acelera hacia las regiones polares. Estas partículas van a parar a una zona de la atmósfera en forma de anillo conocida como óvalo auroral situada entre 60º y 70º de latitud tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur. Las auroras se producen por la interacción de las partículas energéticas, generalmente electrones, con partículas neutras de la atmósfera. Los diferentes colores de las auroras dependen de la composición de la atmósfera y de su estado energético: el oxígeno atómico es responsable de los dos colores verde y rojo (630.0 nm); el nitrógeno causa tonalidades azules y rojo intenso.



Fig. 11 Aurora boreal tomada por Tommy Richardsen en Steinsvik, en el norte de Noruega el 8 de febrero de 2014. El evento empezó de súbitamente y duró unos pocos minutos. El color verde ocurre cuando los electrones interactúan con átomos de oxígeno

B. Efectos en las personas

En el espacio, donde no hay protección contra las partículas solares y la radiación solar (lugares sin magnetosfera ni atmósfera), los organismos vivos están directamente expuestos a estas inclemencias y la vida no es posible. En la Tierra, tanto la magnetosfera como la atmósfera nos protegen de estas partículas cargadas y la radiación dañina. Aun así, durante un evento solar significativo hay un grupo de personas que pueden verse afectadas como serían los astronautas, los habitantes de la estación espacial internacional y los viajeros y tripulantes de los aviones que realizan rutas polares. Por lo tanto, es necesario estudiar cual es el efecto que pueden producir las partículas

ionizantes que llegan del Sol y la radiación para poder mitigar estos efectos y sobre todo poder predecir la llegada de estas partículas a la Tierra para poder emitir avisos y poder, en caso necesario, anular ciertos vuelos o cambiar su ruta original. En el caso de la estación espacial internacional (Fig. 12), hay un módulo que está mayormente protegido contra la radiación y las partículas solares que el resto de los habitáculos y los astronautas reciben un aviso cuando hay peligro que una eyección de masa coronal llegue a la Tierra y por lo tanto llegue a la estación internacional. Los astronautas quedan confinados allí unas horas hasta que pasa el peligro. En el caso de los viajeros y tripulantes de los aviones que siguen rutas polares es necesario saber si hay riesgo de recibir una dosis de radiación mayor a la habitual o no (Fig. 13). Las rutas polares son mucho más económicas, pero tienen el inconveniente que, durante épocas de actividad solar, la radiación y las partículas cargadas del Sol pueden penetrar por los polos (en los óvalos aurorales). Esto significa que la dosis de radiación que recibirían las personas en dichos vuelos sería más elevada de lo habitual y para aquellos viajeros habituales y la tripulación, podría ser perjudicial [8]. Es por esta razón que cuando se detecta que va a llegar una gran cantidad de materia solar a la Tierra se anulan o se redirigen las rutas de estos aviones. Esto provoca pérdidas económicas, pero evita un exceso de radiación en las personas que podría convertirse en enfermedades a largo plazo como podría ser el cáncer debido a la mutación que puede sufrir el ADN cuando recibe altas dosis de radiación.



Fig. 12 Laboratorio “Destiny” de la Estación Espacial Internacional. Este módulo es uno de los más protegidos contra la radiación exterior. Aquí es donde los astronautas se refugian para mantenerse a salvo de los efectos de la actividad solar cuando ésta es significativa

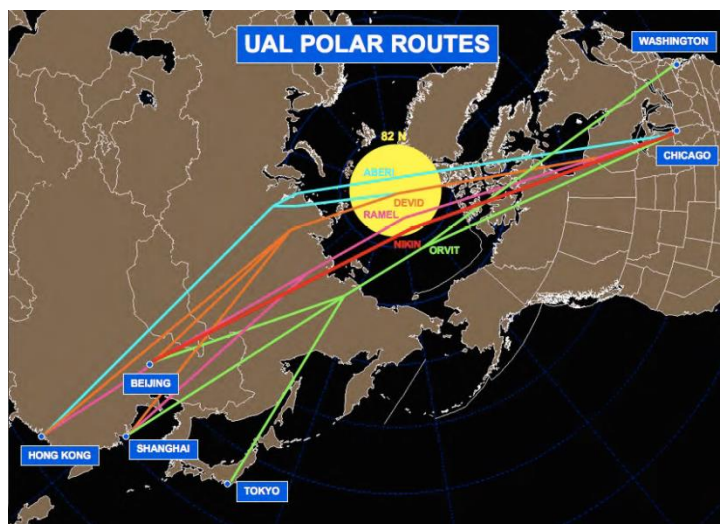


Fig. 13 Esquema de varias rutas polares para ir del este de Estados Unidos hacia al este de Asia y/o Japón. Dichas rutas son más económicas comparando con rutas no polares ya que el tiempo de vuelo es menor. Pero en momento de gran actividad solar, la radiación que puede entrar en el óvalo auroral es mayor que en momentos de calma, y por lo tanto debe anular el vuelo o cambiar la ruta. A parte del peligro por radiación también hay el peligro de que falle la comunicación de alta frecuencia (HF) en esa zona y que el GPS del avión se vuelva inestable. En la zona marcada de amarillo no hay comunicación vía satélite. Razones de más para cambiar la ruta de los vuelos

C. Daños en satélites

Las partículas cargadas que llegan del Sol pueden dañar los componentes de los satélites que hay en el espacio (Fig. 14). Si un satélite es “bombardeado” por pocas de algunas de estas partículas, el satélite se ve dañado, pero puede recuperar su funcionamiento habitual después reiniciar sus funciones. Pero si el bombardeo de partículas cargadas ha sido muy significativo se puede producir un cortocircuito en los sistemas electrónicos del satélite y puede llegar a fallar de manera definitiva [9]. Estos sucesos aumentan el coste de las misiones espaciales, acortan la vida útil de los satélites y en el peor de los casos la pérdida de varios satélites. Una tormenta solar del tamaño de la que ocurrió en 1859 (mucho antes de la era espacial) podría desactivar una gran parte de la flota de satélites (meteorológicos, satélites de navegación (GPS), satélites de comunicaciones), de manera que nuestro día a día se vería significativamente afectado (no podríamos utilizar un navegador, las flotas de transportes aéreos, marítimo y terrestre se vería afectado por la falta de satélites de navegación (GPS), las previsiones meteorológicas, la comunicaciones vía satélite, etc.).

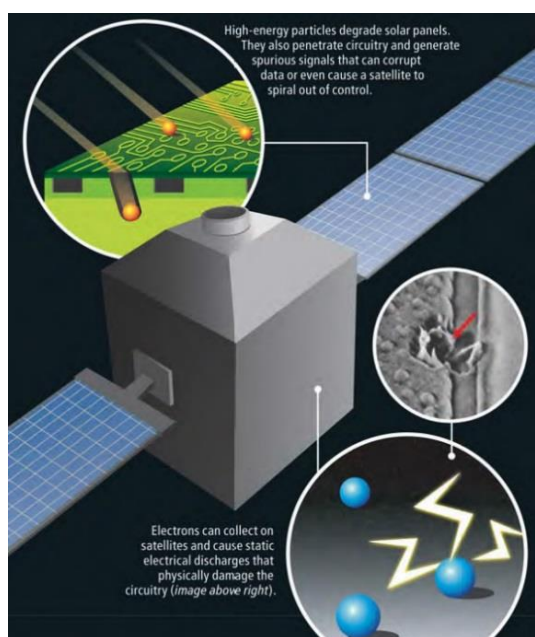


Fig. 14 Esquema de como el “bombardeo” de partículas cargadas puede dañar los satélites. Puede dañar físicamente los paneles solares y pueden penetrar en los circuitos electrónicos dañándolos hasta el punto de dañar completamente el satélite

Por esta razón es tan importante observar continuamente la actividad del Sol para poder prever estos eventos y poder mitigar su efecto sobre los satélites lo máximo posible. Para ello hay varios satélites observando directamente y continuamente el Sol. Cuando se produce una eyección de masa coronal, las imágenes nos dan información de su ocurrencia, pero no nos dan suficiente información sobre la dirección, la cantidad de material expulsado y la orientación del campo magnético interplanetario. No es hasta que llegan al punto en el que se encuentra el satélite DSCOVR (2 a 3 días después) que se mide la cantidad de partículas cargadas, su velocidad, dirección y orientación del campo magnético. Malgradamente, sólo hay unos 40 minutos para que esa nube de plasma llegue a la Tierra. Por lo tanto, es necesario tener un plan de alerta en el que se puedan tomar las medidas necesarias para proteger los satélites contra esa nube de plasma como serían por ejemplo cerrar los paneles solares y apagar los circuitos electrónicos temporalmente.

D. Efectos en los sistemas terrestres

La actividad solar puede provocar impactos severos en los sistemas tecnológicos terrestres. Cuando ocurre una tormenta geomagnética, se generan fuertes corrientes eléctricos a unos 100 km de altitud en las zonas aurales de millones de amperios que también producen en Tierra firme importantes corrientes inducidos conocidos como GIC (corrientes geomagnéticamente inducidos)

[10]. Estas corrientes pueden afectar directamente a los transformadores eléctricos (Fig. 15) y a los conductos (oleoductos o gasoductos) de larga distancia (Fig. 16).



Fig. 15 Transformador eléctrico dañado



Fig. 16 Oleoducto de larga distancia que puede ser dañado por las corrientes inducidas que se generan durante una tormenta geomagnética intensa. El efecto de estas corrientes acelera el proceso de corrosión

Uno de los incidentes más destacados fue el que ocurrió en 1989. En ese caso, las corrientes inducidas en Tierra producidas por la llegada de una eyección de masa coronal provocaron la sobretensión en el sistema de transporte eléctrico de Quebec y 6 millones de personas estuvieron sin electricidad durante más de 8 horas [11, 12]. Durante este evento, también falló un transformador eléctrico de la red Norte-Americana que estaba conectado a una planta nuclear con los problemas de seguridad que esto conlleva. Otro evento parecido, pero no tan severo, ocurrió en 2003 cuando 50000 personas se quedaron sin electricidad en el sur de Suecia por el mismo efecto [13]. Curiosamente, en Norte-América también se registraron fuertes corrientes inducidas, pero no hubo ningún incidente. Se cree que debido a la experiencia adquirida en 1989 tomaron medidas de mitigación [14]. Estos efectos conllevan grandes pérdidas económicas [11].

Por lo que a los oleoductos o gasoductos se refiere, estas corrientes inducidas no son un problema inmediato en sí mismos, pero sí que provocan que estos conductos se erosionen más rápidamente con el tiempo [15]. Esto ocurre con los conductos de cientos o miles de kilómetros. Por lo tanto, es necesario invertir más dinero para conservar dichos conductos.

Los cables de la vía férrea también se pueden ver afectados por estas corrientes inducidas de manera que pueden causar una señalización errónea en cruces críticos aumentando el riesgo de accidentes de tren (Fig. 17) [16]. Los expertos sospechan que el accidente férreo que tuvo lugar en Noruega en enero del 2000 pudo haber sido causado por un error en la señalización producida por estas corrientes inducidas. En ese accidente hubo víctimas mortales.



Fig. 17 Vía férrea que es susceptible de ser afectada en caso de tormenta geomagnética

E. Efectos en las comunicaciones y sistemas de navegación (GPS)

La ionosfera es una parte de la atmósfera en la que sus elementos están ionizados (electrones e iones). Se sitúa entre los 60 y 2000 km de altura con un máximo de concentración electrónica alrededor de los 300 km. La existencia de electrones e iones produce una gran influencia en la propagación de las ondas electromagnéticas [5]. Hay tecnologías que pueden usar su existencia como modo de propagación (comunicaciones de radio a larga distancia) (Fig. 18) pero también hay tecnologías en las que la existencia de la ionosfera introduce un error en su resultado (satélites de navegación como el GPS) (Fig. 19). Por lo tanto, es necesario conocer el estado de la ionosfera para poder usarla correctamente o intentar eliminar su efecto. La ionosfera, pero, depende directamente de la actividad solar. Su formación es básicamente debida a la ionización de los átomos neutros de la atmósfera por la radiación solar, por lo que cuando hay una fulguración solar en la que se emite hacia la Tierra una mayor cantidad de radiación ionizante, el estado de la ionosfera variará de forma brusca en el hemisferio diurno que será el que se verá afectado por la fulguración solar. Este efecto puede producir cortes o interferencias en las comunicaciones de radio y aumentar el error de la posición que proporcionan los satélites de navegación. Cuando ocurre una eyección de masa coronal y las partículas solares penetran en la atmósfera, la ionosfera puede quedar perturbada a nivel global [17]. Empezando por las zonas aurorales y siguiendo a latitudes inferiores. En este caso, debido a que la perturbación es a mayor escala, los efectos en las comunicaciones a larga distancia y en el error de los satélites de navegación pueden ser mayores y durar mucho más tiempo, de manera que puede afectar al transporte aéreo, marítimo y terrestre.

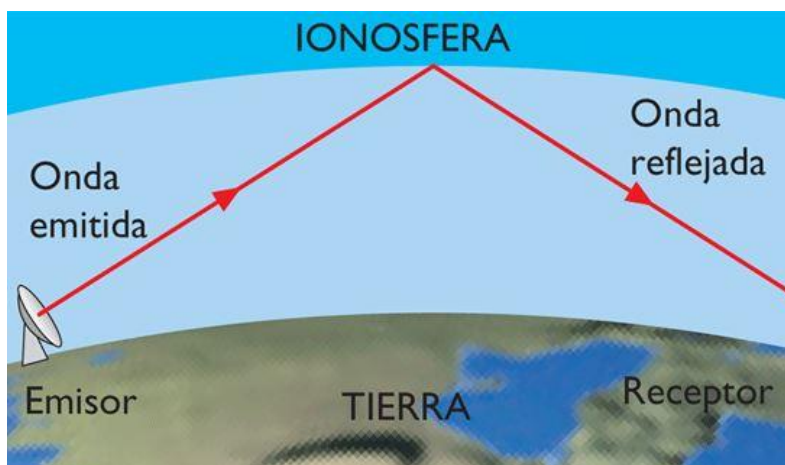


Fig. 18 Esquema de la propagación de las ondas de radio en la atmósfera. La onda de radio sale del emisor, se propaga por la ionosfera en la que se refleja a la altura según la frecuencia que tenga y llega al receptor. Si se conoce el estado de la ionosfera se puede saber dónde se va a reflejar y a que distancia va a llegar. Si la ionosfera queda perturbada a causa de la actividad solar, puede ser que esta propagación quede fuertemente afectada hasta el punto de no llegar al receptor

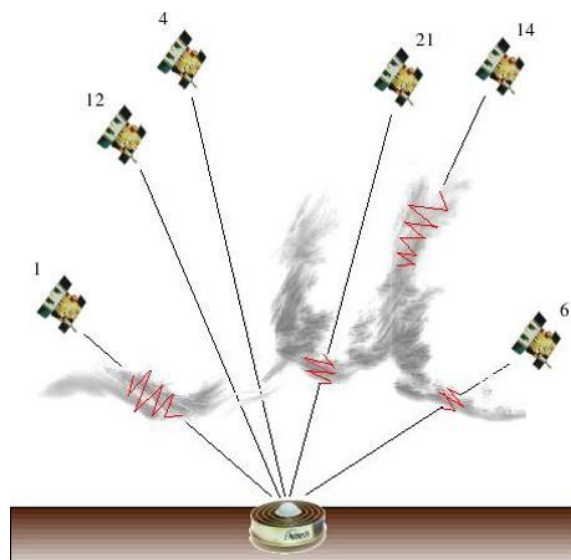


Fig. 19 Esquema de la propagación de las ondas electromagnéticas procedentes de los satélites de navegación (por ejemplo, GPS) en su paso por la ionosfera. La ionosfera introduce un error en la propagación de la señal que llega del GPS. Si la ionosfera está tranquila este error puede ser más o menos cuantificado y corregido. Pero si hay una perturbación significativa, mayor será el error hasta el punto que la señal pueda quedar inservible o no llegue al receptor en tierra

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha dado una visión general de la meteorología espacial, la ciencia que estudia la actividad solar y los efectos que ésta produce en la Tierra y su entorno. La meteorología espacial observa y analiza el estado del Sol y del medio interplanetario para poder predecir posibles impactos en la Tierra y en la vida cotidiana de las personas. La actividad solar ha existido siempre, pero su impacto en la vida de la Tierra y de la persona ha ido aumentando conforme utilizamos la tecnología para nuestra vida cotidiana. Anteriormente a la era espacial y al uso de las tecnologías en la Tierra, el único efecto de la actividad solar sobre la vida de las personas era la observación de las auroras. Actualmente, el efecto de la actividad solar es muy significativo. Hemos visto que puede afectar al funcionamiento de los satélites, por lo tanto, la navegación por satélite (uso del GPS) se puede ver afectado y fallar. Fallando así el transporte aéreo, férreo, marítimo y terrestre. También pueden quedar afectados los satélites de comunicaciones, fallando así las comunicaciones en la Tierra. También se ven afectadas las comunicaciones por radio. Puede haber incidentes en los transformadores eléctricos, de manera que puede fallar el suministro eléctrico en grandes áreas pobladas y puede fallar también la seguridad en el transporte férreo. Los astronautas deben tomar precauciones y los vuelos por rutas polares deben ser desviados o anulados. Estos efectos se pueden dar especialmente en las zonas de latitudes altas pero cuanto mayor sea la tormenta, estos efectos pueden suceder a latitudes más bajas.

Así pues, sabiendo que cada vez somos más vulnerables a los efectos de la actividad solar, se debe invertir en el estudio de la meteorología espacial para poder mitigar lo máximo posible sus efectos en nuestra vida cotidiana. Una buena observación del Sol nos da información de su actividad, pero también nos da las herramientas de avanzar hacia una posible predicción de los fenómenos que pueden suceder. Conocer la cantidad de material solar que se ha eyectado del Sol, su dirección y la configuración del campo magnético interplanetario lo antes posible es imprescindible para conocer con antelación la cantidad de materia que va a llegar y poder predecir el nivel de afectación que va a tener para poder activar los distintos protocolos de mitigación lo antes posible.

El Sol es nuestra estrella, y vamos a convivir con ella. Su actividad puede afectar la vida en la Tierra, por lo tanto, debemos estudiar su actividad y sus efectos. Todo empezó en 1610 cuando Galileo

Galilei observó por primera las manchas solares. En aquel entonces era una indicación de que el Sol no era perfecto. Ahora es una indicación de actividad solar que debe ser vigilada para saber cómo evoluciona.

Antes de terminar este artículo me gustaría comentar que en este trabajo se ha presentado la actividad solar y los efectos en la Tierra más significativos para dar a conocer esta ciencia de manera general. Para todos aquellos que quieran profundizar en el tema les recomiendo visitar la bibliografía y como no el Observatorio del Ebro (www.obsebre.es); un instituto de investigación fundado el 1904 para estudiar las relaciones Sol-Tierra y que hoy en día es un centro referente en el estudio de los efectos de la actividad solar en el campo magnético terrestre y en la ionosfera.

VI. REFERENCIAS

- [1] Lilensten, J. A. Belehaki, M. Messerotti, R. Vainio, J. Waterman, S. Poedts; COST 724 final report (<http://www.senmes.es/pub/03COST724-Short.pdf>).
- [2] Hruska, J., Shea, M., Smart, D., and Heckman, G. [1993]. Geomagnetic disturbances and power system effects. Solar-Terrestrial Predictions.
- [3] Phillips, K.J.H. [1992]. Guide to the Sun. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- [4] Kivelson, M.G. and Russel, C.T. [1995]. Introduction to Space Physics. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- [5] Pröls, G.W. [2004]. Physics of the Earth's Space Environment. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [6] Merrill, R.T., McElhinny, M.W., and McFadden, P.L. [1996]. The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle. International Geophysics Series. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- [7] Dungey, J. W.; Phys. Rev. Let. 6, 47-49, 1961
- [8] Getley, I.L., Duldig, M.L., Smart, D.F., and Shea, M.A. [2005]. Radiation dose along North Amer-
- [9] LaBel, K., Way, S., Stassinopoulos, E., Crabtree, C., Hengemihle, J., and Gates, M. [1993]. Solidstate Tape Recorders: Spaceflight SEU Data for SAMPEX and TOMS/Meteor-3, IEEE Radiation Effects Data Workshop Record.
- [10] Pirjola, R. and Viljanen, A. [1989]. On geomagnetically-induced currents in the Finnish 400 kV power system by an auroral electrojet current. IEEE Transactions on Power Delivery, 4:1239-1245.
- [11] Kappernman, J. and Albertson, V. [1990]. Bracing for the geomagnetic storms. IEEE Spectrum, 27(3):27-33. ISSN 0018-9235.
- [12] NOAA [2004]. Solar storms cause significant economic and other impacts on earth. National Oceanic and Atmospheric Administration Magazine, 131(131).
- [13] Pulkinen, A., Lindahl, S., Viljanen, A., and Pirjola, R. [2005]. Geomagnetic storm of 29-31 October 2003 Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. Space Weather, 3:1-19.
- [14] Bolduc, J. [2002]. GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 64(16):1793-1802.
- [15] Hejda, P. and Bochnicek, J. [2005]. Geomagnetically induced pipe-to-soil voltages in the Czech oil pipelines during October-November 2003. Annales Geophysicae, 23:3089-3093.
- [16] Daglis, I.A., editor [2004]. Effects on Space Weather Technology. Kluwer Academic Publishers in cooperation with NATO Scientific Affairs Division, Dordrecht, The Netherlands.
- [17] M. J. Buonsanto. Ionospheric Storms – A review, Space Science Reviews, 88, 563-601, 1999.

Recursos para ampliar conceptos:

- Servicio Nacional de Meteorología Espacial (<http://www.senmes.es/learn.html>)
- Kepler. Sol, Lunas y Planetas. Biblioteca científica Salvat.
- Nicolson. El Sol. Ed. Herman Blume. Progenza, 1986.
- W. D. Parkinson. Introduction to geomagnetism. Scottish academic press. Edinburgh, 1983.
- UCAR Center for Science Education; <https://scied.ucar.edu/sun-space-weather>
- ACE satellite, <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>
- SOHO satellite, <https://sohowww.nascom.nasa.gov/>
- Space Weather Prediction Center, <http://www.swpc.noaa.gov/>
- <http://www.spaceweather.com/>

VII. AUTORES



ESTEFANIA BLANCH LLOSA, nacida en 1978 en Tortosa y vecina de la Aldea. Recibió su licenciatura en Física por la Universidad de Barcelona en 2002, realizó el máster en Ciencias del Espacio en la International Space University en Estrasburgo en 2006 y recibió el Diploma de Estudios Avanzados y su doctorado en Física por la Universidad Ramon Llull en 2007 y 2009 por los que recibió el premio al mejor trabajo de investigación tutelado de tercer ciclo en Geofísica (2008) y a la mejor tesis doctoral en Geofísica (2010) realizados en una Universidad española y latinoamericana.

En 2009 pasó a formar parte del Grupo de Investigación en Geomagnetismo y Aeronomía del Observatorio del Ebro. Su principal campo de especialización es la física de la ionosfera, concretamente el análisis de las variaciones ionosféricas en condiciones de calma y de tormenta geomagnética; así como su modelización. Dos de los modelos ionosféricos en los que ha trabajado están incluidos en el modelo Internacional de Referencia de la Ionosfera.

Ha participado en 16 proyectos de investigación nacional e internacional (a destacar los proyectos financiados por la Agencia Espacial Europea, la OTAN y la Comisión Europea). Es autora / coautora de 26 trabajos (21 de ellos publicados en revistas SCI) y ha realizado más de 50 comunicaciones en reuniones científicas.



DAVID ALTADILL FELIP, nacido en 1966 en Tortosa. Recibió su licenciatura en Física por la Universidad de Barcelona en 1991, y su Doctorado en Física por la Universidad Ramon Llull en 1997.

En 1994 se incorporó al grupo de investigación del Observatorio del Ebro, es profesor titular de la Universidad Ramón Llull en el instituto universitario Observatorio del Ebro desde 1997 y actual director del Observatorio desde 2013. Su principal campo de especialización es la física de la ionosfera, concretamente monitorización, análisis y modelado de la ionosfera terrestre y, en particular, en el acoplamiento dinámico entre la atmósfera neutra y la ionizada y el forzamiento solar y geomagnético sobre la ionosfera. Ha contribuido con el grupo del Observatorio al modelo Internacional de Referencia de la Ionosfera.

Ha participado más de 20 proyectos de investigación nacional e internacional (a destacar proyectos financiados por la Agencia Espacial Europea, la OTAN y la Comisión Europea). Es autor / coautor de 86 trabajos (72 de ellos publicados en revistas SCI) y ha realizado más de 150 comunicaciones en reuniones científicas (19 invitadas / solicitadas).