

TORMENTAS SOLARES

Las tormentas solares comienzan con una explosión, o una llamarada solar, en la superficie del Sol. Los rayos X y la radiación ultravioleta extrema de la llamarada alcanzan la órbita terrestre minutos más tarde, viajando a la velocidad de la luz. Al ionizar las capas superiores de nuestra atmósfera, se pueden producir apagones de radio y errores de navegación por satélite (GPS). Poco después, una ola de partículas energéticas, electrones y protones acelerados por la explosión cruza la órbita de la Tierra, pudiendo ocasionar un daño real y significativo.

Observando el cielo durante el día, percibimos que el Sol es una esfera amarilla que nos proporciona luz y calor. Aparte de comprobar que su posición varía con las horas y, si somos observadores, que lo hace a lo largo del año, poco más podríamos afirmar. Hoy sabemos que nuestra estrella enteramente gaseosa es un reactor termonuclear donde se fusionan átomos de hidrógeno produciendo helio, que su temperatura alcanza millones de grados y que genera impresionantes campos magnéticos.

Las reacciones de fusión tienen lugar en el **núcleo** (con una densidad estimada de 150 g/cm^3 y una temperatura de unos 15 millones de Kelvin) y en ellas se liberan grandes cantidades de energía; esta energía se transmite mediante dos mecanismos: primero por radiación, a través de la **zona radiante** (de 500.000 km de espesor que envuelve al núcleo); y después por convección, a través de la **zona convectiva** (de 200.000 km de espesor), hasta que alcanza la superficie del Sol o **fotosfera**. Si bien la energía liberada en el núcleo tarda 170 millones de años en abandonar la zona radiante, tarda sólo una semana en atravesar la zona convectiva hasta la superficie del Sol. Si ampliamos la imagen del Sol, veremos sobre su superficie múltiples granos; estos granos son en realidad las crestas de las ondas convectivas: en esa parte, el Sol se asemeja a un líquido en ebullición, el movimiento de las burbujas calientes y frías producen un patrón sobre la superficie del Sol denominado **granulación**. La fotosfera cambia constantemente: una unidad de granulación aparece y desaparece cada 10-15 minutos y mide unos 800 km de diámetro.

Alrededor de la fotosfera se encuentran la cromosfera, de un color rojizo y compuesta principalmente por hidrógeno gaseoso. La capa siguiente es la

corona (con una densidad estimada de $1\text{E-}15 \text{ g/cm}^3$, similar al vacío, y una temperatura de 2 millones Kelvin), es fina en comparación con el tamaño del astro al que pertenece. Esta capa se ve muy bien durante un eclipse total de Sol. Su temperatura es unas 200 veces más caliente que la fotosfera; no se sabe muy bien cuál es la causa de este fenómeno aunque se sospecha que tenga que ver con el intrincado laberinto de campos magnéticos que surgen del interior y se desplazan por la superficie del Sol en complejos arcos y rizos, rozándose o entrelazándose entre ellos; este proceso calentaría la corona y sería el preludio de violentas explosiones.

Una prolongación, o la misma corona solar que está en constante expansión, la constituye el llamado **viento solar** que llega a alcanzar la Tierra en sus regiones más externas donde, además de los gases, hay grandes cantidades de partículas de polvo. El flujo constante de radiación y partículas, principalmente electrones y protones en forma de plasma enclavados en potentes campos magnéticos, que proceden del Sol descarga un millón de toneladas de materia hacia el espacio cada segundo, con una velocidad que varía desde los 350 km/s en las zonas ecuatoriales a 800 km/s por encima de los agujeros coronales, con energías entre 10 y 100 keV y una densidad como el más perfecto vacío: en 1 cm^3 de aire hay más partículas que en 1.000 km^3 de viento solar.

Cerca de la Tierra, el viento solar viaja a una velocidad aproximada de 400 Km/s comprimiendo las áreas del campo magnético terrestre orientadas al Sol. Afortunadamente, nuestro planeta está protegido gracias a nuestra atmósfera y a una capa magnética conocida como **magnetosfera**



SUSANA PEREIRA CUESTA

Consultora independiente, experta en combustible nuclear y protección radiológica

licenciada en Físicas, especialidad Materiales, por la Universidad Complutense de Madrid.



BEGOÑA PEREIRA PAGÁN

Responsable de Análisis de Datos de APS. Departamento de Seguridad.

EMPRESARIOS AGRUPADOS

Ingeniera industrial, especialidad Técnicas Energéticas, por la ETSIM de la Universidad Politécnica de Madrid.

SOLAR STORMS

Solar storms begin with an explosion, or solar flare, on the surface of the sun. The X-rays and extreme ultraviolet radiation from the flare reach the Earth's orbit minutes later – travelling at light speed. The ionization of upper layers of our atmosphere could cause radio blackouts and satellite navigation errors (GPS). Soon after, a wave of energetic particles, electrons and protons accelerated by the explosion crosses the orbit of the Earth, and can cause real and significant damage.

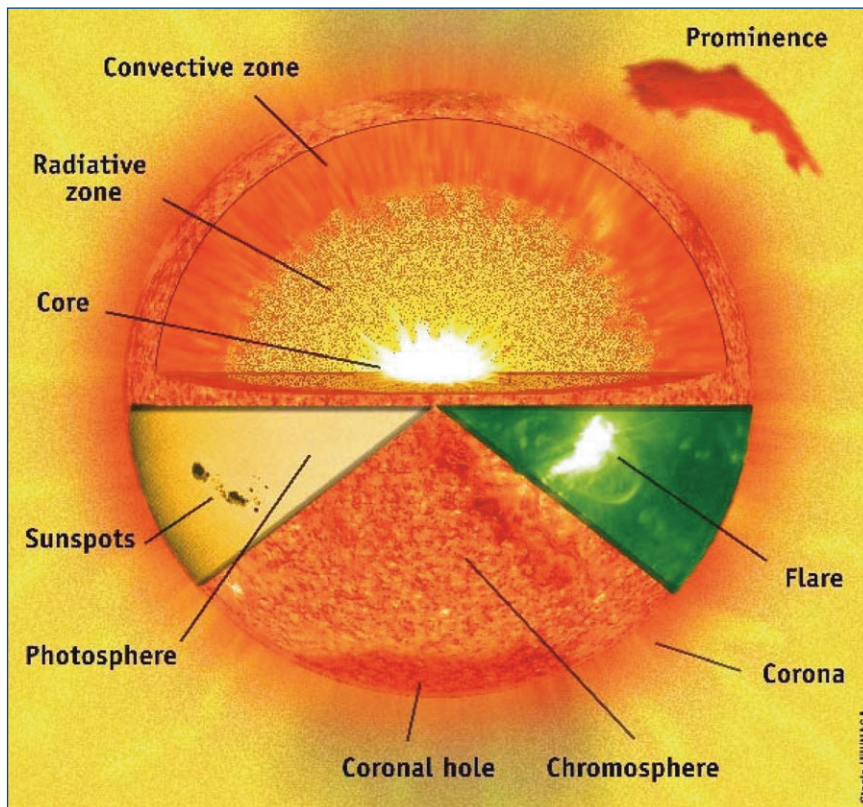


Figura 1.

que, producida por el campo magnético interno de la Tierra, nos protege del 99% del plasma solar desviándolo hacia el espacio.

Pero no siempre es así. Existen síntomas que nos permiten vislumbrar cuando el Sol se encuentra "inquieto": las llamadas **manchas solares**, manchas oscuras -debido a que su temperatura (4.000 °C) es inferior a la de las áreas que las rodean, (6.000 °C)- que aparecen sobre la superficie del Sol y varían, tanto en tamaño como en vida media, desde horas hasta semanas. Su aparición se asocia con uno de los fenómenos más violentos en cuanto a liberación de energía (1.032 erg) que tienen lugar en el Sol: las **llamaradas solares**.

Las llamaradas solares son explosiones en la corona solar que calientan el plasma por encima de 10 millones de grados. La energía magnética contenida en el plasma se convierte en energía cinética de partículas eléctricamente cargadas y radiación (desde ondas de radio hasta rayos X y rayos gamma). Cuando la erupción es una gran burbuja de plasma se denomina **Eyección de Masa Coronal (EMC)**¹ y tienen lugar desde algunas veces a la semana hasta varias veces al día, dependiendo de cuán activo esté el Sol.

La velocidad de una EMC a través del espacio puede llegar hasta 2.500 km/s o incluso superar este valor (las más violentas pueden alcanzar la Tierra en 14-17 horas). Una EMC normal puede transportar más de 10 billones de toneladas de plasma y la nube que forma puede crecer a dimensiones superiores a las del Sol. En el transcurso de su viaje genera una onda de choque que acelera algunas de las partículas del viento solar a velocidades y niveles de energía extremadamente peligrosos creando radiación. Detrás de la onda de choque, la turbulencia de la EMC viaja por el sistema solar de forma violenta.

Cuando una EMC impacta en la magnetosfera terrestre, transfiere parte de su energía: las partículas fluyen a través de las líneas de campo magnético hasta los polos, donde es más

¹En inglés Coronal Mass Ejection (CME). Una de las teorías más recientes apunta a que las fluctuaciones de campos magnéticos en la superficie solar actúan como una especie de red de contención del plasma, impidiendo la salida de la mayoría de las partículas al espacio y, precisamente por ello, acumulando enormes cantidades de energía. Si por cualquier razón, se abre un agujero en esta red magnética, se produce una expulsión repentina de plasma, es decir, una EMC.

débil y la magnetosfera se encuentra parcialmente abierta al espacio. Este flujo es el responsable de las tormentas geomagnéticas, la alteración del campo magnético terrestre y las auroras boreales, es decir, el resplandor causado por las partículas que chocan entre sí en la parte superior de la atmósfera excitándose eléctricamente y emitiendo luz, una deslumbrante danza de colores verdes, azules, blancos y rojos visibles principalmente desde los polos.

Los científicos clasifican las llamaradas solares de acuerdo con el brillo de los rayos X (su flujo se altera cada vez que se produce una llamarada). La escala de la NOAA², identifica cinco categorías: las llamaradas de clase "X", eventos de gran magnitud que pueden desatar apagones de radio en todo el planeta, las de clase "M", que pueden causar ligeros apagones de radio en la zona de los polos, las de clase "C", pequeñas y poco notorias en la Tierra, seguidas de las clase "B" y "A", prácticamente indistinguibles del fondo. Además, a cada clase se le asigna un número del 1 al 9 (de leve a extremo), excepto a las de clase X (que no tiene límite)³. A partir de la categoría M5 se considera importante la llamarada.

¿Qué ocurriría si recibiésemos una llamarada solar geoeffective (es decir, con impacto directo sobre la Tierra)? A los ocho minutos de producirse la llamarada, llegaría el primer pulso de la radiación a la Tierra, y con él, los **bloqueos de radio**, afectando a las comunicaciones (inicialmente afectaría a la zona diurna, pudiendo extenderse a todo el planeta). Pasados 30 minutos y dependiendo de la intensidad, se producirían las **tormentas de radiación**, que incrementarían la radiación ambiental y afectarían a los vuelos en altas latitudes y a los astronautas. Por último, entre 24 y 48 horas tras la llamarada, se producirían **tormentas geomag-**

²National Oceanic and Atmospheric Administration.

³La llamarada solar más intensa registrada y monitorizada con el flujo de rayos-X, se dio el 4 de Noviembre de 2003 y alcanzó la categoría X28, nivel en el que los sistemas de medición se bloquearon, aunque probablemente fue mucho mayor, ya que los análisis ionosféricos posteriores estimaron una categoría X45.

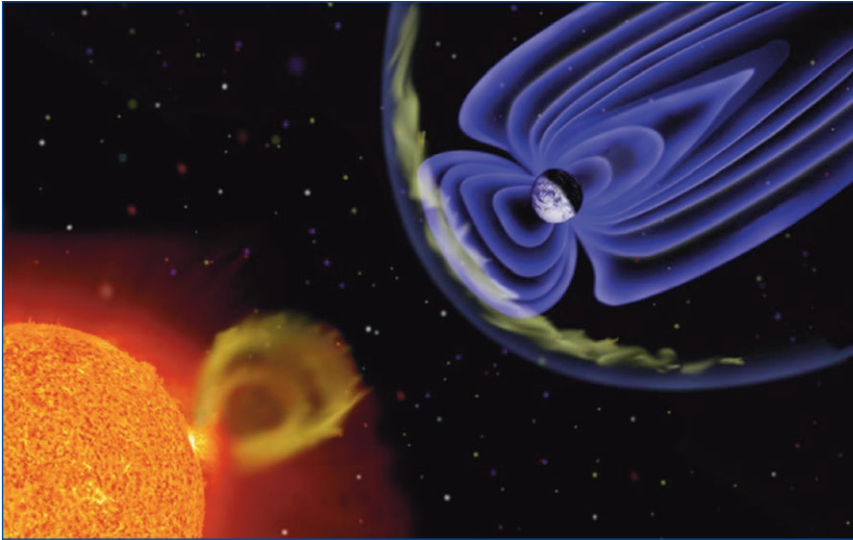


Figura 2.

néticas que podrían causar colapso de redes eléctricas en cualquier punto del planeta.

La NOAA ha establecido también una escala de clasificación para medir el nivel de gravedad de estos fenómenos basada en un código "letra-cifra"; letra para el fenómeno: "G" para Tormentas Geomagnéticas, "S" para Tormentas de Radiación Solar y "R" para los Bloqueos de Radio, y una cifra asociada para la gravedad del mismo: del 1 (leve) al 5 (extremo).

La Tierra ha experimentado fenómenos asociados a la actividad solar a lo largo de su historia. A continuación se repasan los más significativos de los que se tiene constancia.

Conocido como el **Evento Carrington**, numerosas **llamaradas solares** tuvieron lugar entre el 28 de agosto y el 2 de septiembre de 1859. La mayor de

ellas se produjo el día 1, con un área de fulguración asociada que durante un minuto emitió una gran cantidad de energía. El suceso recibió su nombre en honor al astrónomo inglés, Richard Carrington, quien asoció por primera vez una llamarada solar con una tormenta geomagnética. La llamarada debió alcanzar temperaturas de 50 megakelvin, emitiendo radiación visible, radiación gamma y rayos X. La energía de los rayos X calentó la atmósfera alta de la Tierra, produciendo su expansión a cientos de kilómetros. La intensa llamarada liberó dos EMC: la primera tardó entre 40 y 60 horas en llegar a la Tierra mientras la segunda, lo hizo solamente en 17 horas y 40 minutos. La primera eyección, que iba acompañada de un intenso campo magnético helicoidal, quedó registrada en los magnetó-

metros de superficie como un inicio brusco de actividad. Pero fue la segunda EMC la que provocó que la magnetosfera terrestre fuera comprimida hasta unos 7.000 Km (suele estar a 60.000 Km) alcanzando la estratosfera. Gran cantidad de protones y electrones se descargaron hacia la atmósfera causando las auroras boreales observadas en puntos tan al sur como Hawái, México, Cuba e incluso España, registrándose en los periódicos de la época.

Los protones alcanzaron energías de 30 millones de electronvoltios entrando en el ártico hasta unos 50 kilómetros de la superficie terrestre. Este fenómeno depositó una cantidad extra de energía en la ionosfera provocando una reducción del ozono estratosférico en un 5%.

Los cables telegráficos a ambos lados del Atlántico experimentaron corrientes inducidas causando accidentes por electrocución e incendios. Se cree que hasta que el plasma no pasó más allá de nuestro planeta el campo magnético terrestre no recuperó la normalidad, aunque la capa de ozono no se recuperó hasta cuatro años después.

Los análisis llevados a cabo en núcleos de hielo han demostrado que eventos así, con semejante fuerza e intensidad, se han producido en la Tierra con una frecuencia media de una vez cada 500 años, aunque ha habido y hay tormentas solares relativamente fuertes cada cincuenta años.

OTROS SUCESOS RELEVANTES

1921: Llamarada solar (13 de mayo) seguida de una **tormenta geomagnética** (días 14 y 15 de mayo) que produjo corrientes inducidas, de intensidad la mitad que la del Evento Carrington, con daños en telégrafos y teléfonos. Hoy en día un suceso similar provocaría fallos permanentes en unos 350 transformadores en EE.UU. dejando sin suministro a 130 millones de personas.

1972: Tormenta magnética (4 de agosto) que causó problemas en cables y redes eléctricas. Los satélites mostraron una importante compresión del campo magnético terrestre debido al caudal de plasma emitido.

1989: Intensa actividad solar entre marzo y octubre; en particu-



Figura 3.



EVENTO CARRINGTON 1859

■ Auroras en España

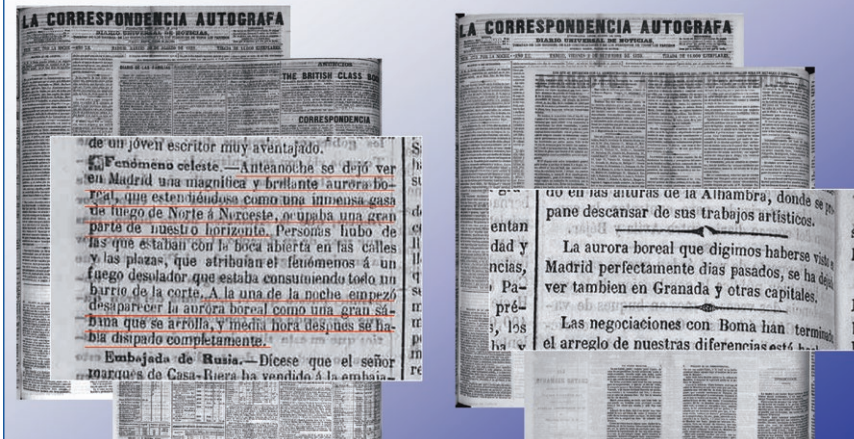


Figura 4.

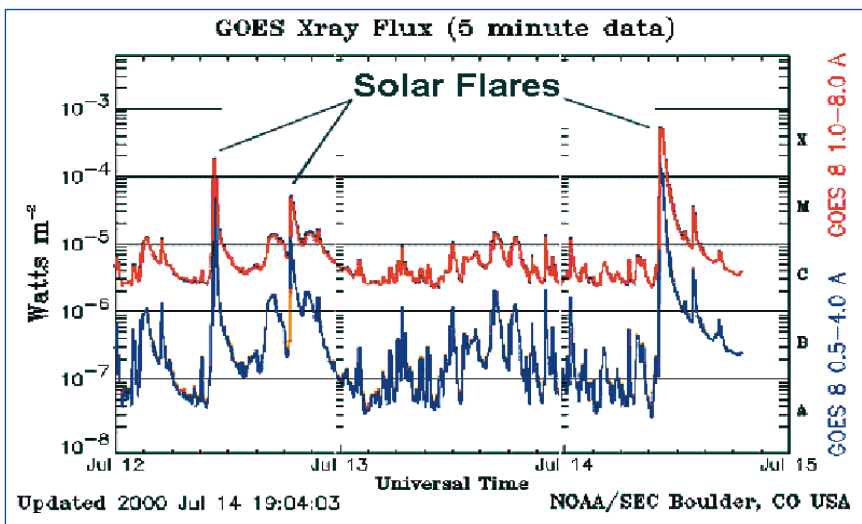


Figura 5.

lar destacó la **tormenta geomagnética** (X15) del 13 de marzo. Provocó caídas de tensión (pérdida de generación de 9,45 MW sobre una carga de red de 21,35 MW) en las redes eléctricas de Québec (Canadá), dejando sin luz a seis millones de usuarios durante nueve horas por un fallo en cadena que tardó tan sólo 90 segundos en propagarse. En la red eléctrica de Estados Unidos se registraron 200 fallos de importancia (fluctuación de tensión del 4%), entre ellos el de un transformador de la central nuclear de Salem, con corrientes inducidas de 80 A (nivel normal de trabajo de 2 a 4 A). Se produjeron problemas similares en las redes suecas. Se alteraron las órbitas de varios satélites y la NASA tuvo problemas de seguimiento. Además se produjeron fallos de radionave-

gación y en las comunicaciones en HF. Se vislumbraron auroras boreales en latitudes casi ecuatoriales.

En los 25 meses siguientes a esta tormenta, 12 transformadores de doce centrales nucleares estadounidenses fallaron (además de Salem, se vieron afectadas Oyster Creek, South Texas, Shearon Harris, Surry 1, Zion 2, WNP 2, Peach Bottom 3, Donald Cook 1, Susquehanna, Maine Yankee y Nine Mile)⁴.

1994: Niveles sostenidos de **alta velocidad en el viento solar**, el 20 de enero. Fallo en el satélite canadiense Anik-E1 durante siete horas como consecuencia de descargas eléctricas inducidas a bordo. El suceso afectó a 100 periódicos y 450 emisoras de radiodifusión canadienses, inte-

rumpiendo además el servicio telefónico en 40 comunidades. Una hora después de la recuperación del Anik-E1, el satélite Anik-E2 quedó fuera de servicio, provocando el corte de servicios de datos y televisión a 100.000 usuarios. No se recuperó el Anik-E2 hasta seis meses después del suceso, con un coste de 120 millones de dólares.

2000: **Tormenta del Día de la Bastilla**, los días 14 y 15 de julio. **Tormenta de radiación solar** (S3) que tardó 15 minutos en llegar a la Tierra, y **tormenta geomagnética de nivel máximo**, ambas causadas por una **EMC** (X5.7) durante el máximo del ciclo solar 23. Se reportaron en Rusia anomalías en los circuitos del ferrocarril y en Alabama y Mississippi, en EE.UU., caídas de red.

2003: **Tormenta de Halloween**, entre los días 27 de octubre y 4 de noviembre. El día 28 se detectó un nivel extremo de actividad solar con apagones de radio (R4, severo). El día 29 se registró una tormenta de radiación solar (S4, severa), asociada a una EMC (X17) que originó una tormenta geomagnética (G5, extrema) en latitudes medias y altas al alcanzar la Tierra en unas 19 horas. La tormenta se mantuvo en niveles G3-G5 durante 24 horas. El satélite coreano KOMPSAT1 sufrió alteraciones en su órbita, y el japonés Kodama tuvo que ser desconectado. Se sospecha que también provocó la pérdida del satélite ADEOS-2, valorado en 640 millones de dólares. La producción eléctrica en el norte de EEUU y Canadá se limitó para evitar los efectos de las corrientes inducidas (alertas emitidas por la NOAA). La tripulación de la Estación Espacial Internacional tuvo que refugiarse en el módulo de servicio. El día 30 se registró una nueva tormenta geomagnética, dejando sin suministro eléctrico a 50.000 usuarios en Suecia. El 4

⁴John G. Kappenman. Impact of Severe Solar Flares, Nuclear EMP and Intentional EMI on Electric Grids. También se menciona en la Petition For Rulemaking de la NRC PRM-50-96 (apdo. 6.1 Risks from Severe Space Weather and Geomagnetic Disturbance).



ANTIGUAS TORMENTAS SOLARES DESCUBIERTAS EN LOS POLOS

Según un estudio publicado en la revista *Nature Communications*, el 26 de octubre de 2015, un grupo de investigadores dirigido por Raimund Muscheler, de la Universidad de Lund (Suecia), ha descubierto que la Tierra recibió el impacto de dos tormentas solares extremas hace más de mil años, concretamente en los años 773-774 y 993-994. Según el científico Muscheler «Si dichos eventos ocurrieren hoy en día podrían tener efectos devastadores en el suministro de energía, en los satélites y en los sistemas de comunicación». Su equipo ha buscado rastros de radiocarbono en los hielos de Groenlandia y de la Antártida, puesto que la presencia de este isótopo del carbono 14 en la Tierra se debe precisamente a los rayos cósmicos procedentes del Sol. De hecho, hace unos años, otro grupo de científicos encontró un rápido incremento del mismo elemento en los anillos de árboles que se correspondían a los periodos mencionados.

Muscheler continúa: «En esta investigación hemos trabajado de forma sistemática para encontrar la causa de esos eventos y hemos encontrado valores parecidos a los de los árboles de hace más de mil años en el hielo de Groenlandia y de la Antártida. Gracias a los nuevos resultados, podemos descartar las demás explicaciones sugeridas hasta ahora y confirmar que las tormentas solares extremas son la causa de los valores del carbono radiactivo observado en las plantas milenarias». Y afirma «Los valores asociados a estas tormentas solares antiguas exceden con creces los de cualquier evento observado gracias a los instrumentos terrestres. Creemos, por tanto, que nuestro hallazgo debería llevar a una reevaluación de los riesgos asociados a este tipo de fenómenos».

de noviembre hubo una nueva EMC (X28), la mayor registrada hasta la fecha por instrumentos electrónicos de observación. Las comunicaciones aeronáuticas y transatlánticas en HF se vieron seriamente afectadas. El desvío de vuelos transpolares, para evitar daños por radiación, tuvo un coste de entre 10.000 y 100.000 dólares. Hubo interferencias en sistemas de radionavegación Loran-C y fallos de GPS en latitudes altas. En China, las corrientes inducidas fueron responsables de vibraciones y ruidos en transformadores de la subestación de Shanghe y de la central nuclear de Ling'ao. En Rusia, se observaron anomalías en los circuitos de control de trenes.

2010: Incremento de la actividad solar, entre los días 3 y 5 de mayo, posible causa de que el 5 de mayo el satélite de comunicaciones Intelsat Galaxy 15 comenzase a fallar en el envío de telemetría y recepción de comandos, siendo sustituido por el Galaxy 12.

La NRC⁵, consciente de la posible vulnerabilidad de la red eléctrica por las perturbaciones geomagnéticas y las corrientes resultantes de una tormenta solar significativa (como la acontecida el 13 de marzo de 1989), emitió la Information Notice 90-42, "Failure of Electrical Power Equipment Due to Solar Magnetic Disturbances" de fecha 19 de junio de 1990, con el fin de informar a las centrales nucleares del potencial de daño a sistemas

de transmisión y otros componentes de la red eléctrica en caso de actividad solar severa.

El 15 de marzo de 2011, la NRC formalizó una petición de reglamentación (PRM-50-96⁶, enmienda al 10CFR50); los requisitos propuestos, 50.155(b)(1) y (c), y el borrador de la Regulatory Guide asociada, propuesta como RG 1.228 Integrated Response Capabilities for Beyond-Design-Basis Events, tienen como objetivo garantizar a largo plazo la refrigeración tanto del núcleo como de las piscinas de combustible gastado de los reactores nucleares de EEUU, en caso de una pérdida generalizada de larga duración de la red de ener-

⁵ Nuclear Regulatory Commission, U.S.

gía eléctrica, por causas relacionadas con el clima espacial severo, tales como una EMC y la perturbación geomagnética consecuente. Su argumentación se basa en que los medios de energía de respaldo, situados en el emplazamiento, están diseñados para funcionar unos días, mientras que las piscinas de combustible gastado requieren un enfriamiento de duración muy superior. La NRC forma parte de un grupo de trabajo entre distintas agencias de EEUU para desarrollar una National Space Weather Strategy con un plan para reducir el riesgo asociado con el clima espacial; una vez finalizados los planes que surjan de dicho grupo, reevaluará el impacto que puedan tener las tormentas geomagnéticas en las centrales nucleares.

Nuestro conocimiento y comprensión de las vulnerabilidades de la moderna infraestructura tecnológica frente al clima espacial y las medidas desarrolladas para mitigar esas vulnerabilidades se basan en la experiencia y el conocimiento adquirido durante los últimos 30 años, durante los cuales se han producido episodios solares de carácter severo. Debido a que actualmente mucha información es transmitida por satélites y otras tecnologías avanzadas, desde cajeros automáticos y señales de radiodifusión hasta el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y sistemas de señales de emergencia,

⁶ La petición y otros documentos relacionados para la revisión de PRM-50-96 están disponibles en <http://www.regulations.gov> bajo expediente ID NRC-2011-0069.

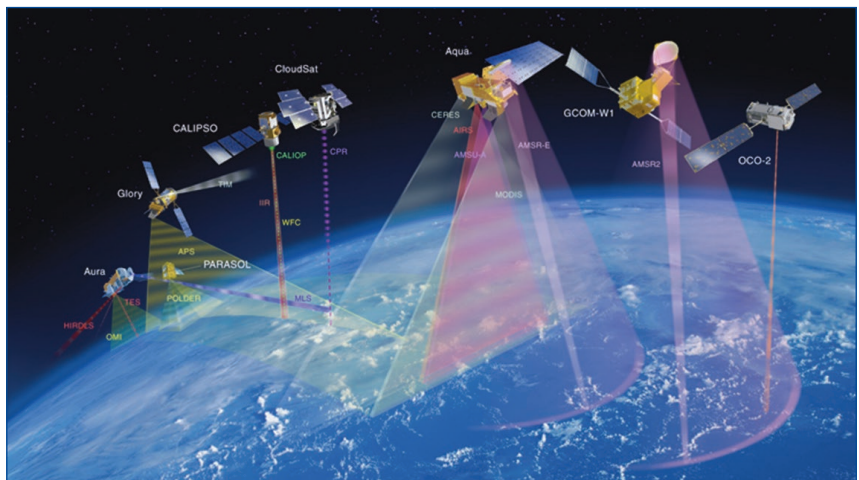


Figura 6.



TORMENTA SOLAR DE JULIO DE 2012

El 23 de julio de 2012, se produjo una tormenta solar extrema, la más potente registrada en los últimos 150 años. En realidad, la nube de plasma fue expulsada en dos EMC separadas por sólo unos minutos (de 10 a 15), viajando a través de una región del espacio "barrida" por otra EMC, apenas cuatro días antes; debido a ello no sufrió una desaceleración significativa, como habría ocurrido en otras circunstancias, en su tránsito a través del medio interplanetario. Las EMC alcanzaron una velocidad de 3.000 km/s, cuatro veces más rápido que una eyección típica. La tormenta atravesó la órbita de la Tierra con todo su esplendor, pero por suerte nuestro planeta no estaba allí; si impactó sobre la nave espacial STEREO-A (una de las naves gemelas de la NASA lanzadas en 2006 para ayudar en las mediciones de velocidad de las EMC). "Si nos hubiera dado, todavía estaríamos recogiendo los pedazos", afirmó Daniel Baker, de la Universidad de Colorado. Baker, junto con expertos de la NASA y de algunas universidades, publicó un estudio sobre la tormenta en la edición de diciembre de 2013 de la re-

vista *Space Weather*. Su trabajo, denominado *El Principal Evento de Erupción Solar en julio de 2012* (*The Major Solar Eruptive Event in July 2012*) describe con detalle lo que sucedió. Si la erupción hubiera ocurrido una semana antes, las EMC habrían apuntando hacia nuestro planeta, en vez de hacerlo hacia un lado; de modo que escapamos por poco.

Tres naves espaciales ofrecieron datos sobre las EMC: las dos naves espaciales STEREO y el Observatorio Solar y Heliosférico, SOHO, de la NASA y la ESA. SOHO se encuentra entre la Tierra y el Sol, mientras que las dos naves STEREO tienen órbitas que les permite observar la parte del Sol que no se puede ver desde la Tierra. Cada nave espacial observó las EMC desde un ángulo diferente, y juntas han ayudado a trazar una imagen tridimensional de lo que ocurrió.

La clave para entender las altas velocidades de las dos EMC, velocidades que llevarían a circundar la Tierra cinco veces en un minuto, fue la conjunción de dos aspectos: el primero fue el hecho de que, apenas cuatro días antes, se hubiera producido una EMC que apartó las partículas del camino, facilitando el desplazamiento

de las siguientes EMC; y el segundo, que la espiral normal de los campos magnéticos alrededor del Sol se transformó en un patrón recto por encima de la región originaria de estas EMC, permitiendo así una mayor libertad de movimiento.

El Ciclo Solar N° 24 ha sido de los más tranquilos en los últimos 100 años. El mínimo solar entre los ciclos 23 y 24 fue el más relajado y largo desde el inicio de la era espacial, con el número de tormentas geomagnéticas anual más pequeño desde 1932. La ausencia de las tormentas geomagnéticas fuertes continuó en el año 2012 y se debía a que las EMC eran relativamente lentas y de campos magnéticos débiles. Sin embargo, el suceso del 23 de julio del 2012 se salió de lo esperado. No sólo fue la eyección más rápida jamás detectada en el espacio interplanetario, sino que también tenía un potente campo magnético de 109 nT. Se cree que de haber alcanzado la Tierra, podría haber tenido unos efectos catastróficos, incluso superiores a lo que podría causar un evento de Carrington (1859).

las EMC suponen hoy en día un riesgo importante a tener en cuenta.

Los satélites que observan el Sol permiten detectar de forma temprana una tormenta, alertar de su llegada a la Tierra con varias horas de antelación, estimar su intensidad y facilitar que los sistemas se adecuen (por ejemplo, apagando satélites de

comunicaciones o cortando la conexión entre ciertos nudos de la red eléctrica) para minimizar sus efectos. La prevención es clave y, aunque aún hace falta investigar sobre estos fenómenos, se han realizado importantes avances desarrollando enfoques de ingeniería que disminuyen el riesgo y su impacto en nuestro planeta.

El llamado "tiempo meteorológico espacial" al igual que el tiempo de la troposfera (convencional) es episódico y difícil de predecir pero no por ello hay que dejar de prevenirlos: los eventos extremos ocurren, y hay que estar preparados para mitigar los daños y minimizar sus consecuencias. ■

- <http://www.ign.es/ign/layoutln/ultFormGeomagMay.do> (Instituto Geográfico Nacional).
- <http://prensahistorica.mcu.es>. Biblioteca Virtual de Prensa Histórica. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- Information Notice No. 90-42: Failure of Electrical Power Equipment Due to Solar Magnetic Disturbances. NRC. June 1990.
- PRM-50-96. Petition for Rulemaking Regarding Amendment of 10 CFR Part 50, "Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities". March 2011.
- Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid. John Kappenman. Metatech Corporation, prepared for Oak Ridge National Laboratory. January 2010.
- <http://sunearth.gsfc.nasa.gov/>
- <http://spaceweather> (Noticias de las condiciones del tiempo en el espacio)
- <http://www.sec.noaa.gov> (NOAA's Space Environment Center)
- http://es.wikipedia.org/wiki/Tormenta_solar_de_1859#mw-head#mw-head
- <http://www.scientificamerican.com/article/bracing-for-a-solar-superstorm/>
- "A History of Solar Activity over Millennia". Ilya G. Usoskin Sodankylä Geophysical Observatory (Oulu unit). Finlandia. October 2008 (revisado: April 2010).
- Occurrence of Extreme Solar Particle Events: Assessment from Historical PROXY Data. Ilya G. Usoskin and Gennady A. Kovaltsov. The Astrophysical Journal, 757:92 (6pp). September 2012.
- U.S. Power Grids Prepping for Solar Storms. John Kemp. February 2014. (<http://www.claimsjournal.com/news/national/2014/02/20/244916.htm>).
- IFP/WKP/FGS(2011)4. "Geomagnetic Storms". OECD/IFP Futures Project on "Future Global Shocks". January 2011.
- Geomagnetic Disturbances (GMD). Causes and Effect on the North American Grid. Warren Whitson. Southern Company Transmission. NERC (North American Electric Reliability Corporation). April 2012.
- The Major Solar Eruptive Event in July 2012. Space Weather Journal, July 2012. D.D: Baker.
- NATIONAL SPACE WEATHER STRATEGY. National Science and Technology Council. October 2015.
- <http://www.investigacionyciencia.es/noticias/indicios-de-antiguas-tormentas-solares-en-el-hielo-de-los-polos-terrestres-13806>
- Mekhaldi, F. et al. Multifiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of AD 774/5 and 993/4. Nat. Commun 6:8611 doi:10.1038/ncomms9611 (2015).