



LA METEOROLOGÍA ESPACIAL

El 13 de marzo de 1989 una gran emisión de masa procedente del Sol originó un fallo en la central eléctrica de Quebec, privando de electricidad a seis millones de personas en Canadá y EE.UU. durante más de nueve horas. Ese mismo día, varios satélites de comunicación y defensa fallaron y sus órbitas resultaron modificadas. Este hecho, entre otros, ha dado lugar a una nueva línea de investigación conocida como «meteorología espacial». Esta disciplina no sólo abarca aspectos científicos y tecnológicos, sino también sociales, y es la encargada de predecir con suficiente antelación cuándo ocurrirán y cuán intensos serán los efectos de estas «tormentas del espacio».

→ Aurora observada en Muonio (Finlandia) el 29 de septiembre de 2007. Sauli Koski

Aunque el Sol parezca un disco amarillo de brillo constante, la realidad es muy diferente. En sus estructuras magnéticas y el plasma que sostienen se producen esporádicamente fenómenos explosivos y violentos, originando distintos tipos de fenómenos solares como fulguraciones, prominencias, emisiones de masa coronal, etc. En ellos se liberan grandes cantidades de energía (del orden de 10^{25} J, equivalentes a 40.000 millones de bombas atómicas de Hiroshima), partículas (del orden de 10^{12} kg) y campo magnético que viajan por el medio interplanetario y que afectan de forma importante al entorno terrestre cuando se dirigen hacia la Tierra.

Bajo estas condiciones perturbadas se producen cambios importantes en todas las escalas espaciales del entorno terrestre: magnetosfera, ionosfera, atmósfera, etc., y los efectos son detec-

tables también en la superficie. Es lo que se conoce como **tormentas geomagnéticas**, análogas a los tornados o huracanes de la meteorología terrestre.

En condiciones de «tiempo en calma» el Sol emite un flujo continuo de partículas cargadas, conocido como **viento solar**, que interacciona con el campo magnético dipolar terrestre, distorsionándolo. La interacción conduce a un sistema complicado de movimientos de convección de plasma y corrientes eléctricas que dan lugar a la estructura completa que adquiere la magnetosfera terrestre, en la que pueden distinguirse diferentes zonas.

Aproximadamente a unos 12 radios terrestres (R_T) en el lado diurno se encuentra el primer escudo protector terrestre, el **frente de choque**, que separa la magnetosfera del medio interplaneta-

rio. Esta distancia se ve modificada dependiendo del grado de actividad dentro del ciclo solar (de unos 11 años). En el caso de grandes emisiones de masa solar, puede llegar a acercarse hasta una distancia menor de $6 R_T$. Esta compresión es consecuencia del encuentro con un plasma de viento solar que tiene mayor presión dinámica (mayor velocidad y densidad) que en condiciones en calma.

Algo más próximos a la Tierra se encuentran los **cinturones de radiación de Van Allen**, formados por partículas atrapadas en las líneas del campo magnético dipolar terrestre. Se extienden desde una altitud de $1,15 R_T$ (1.000 km) hasta alrededor de $10 R_T$, zona utilizada por las misiones desde órbitas bajas hasta órbitas geoestacionarias. El cinturón más externo (con un máximo de densidad de partículas entre los $4,5$ y $5,0 R_T$) fue descubierto por el físico esta- ➞

Aunque el Sol parezca un disco amarillo de brillo constante, la realidad es muy diferente

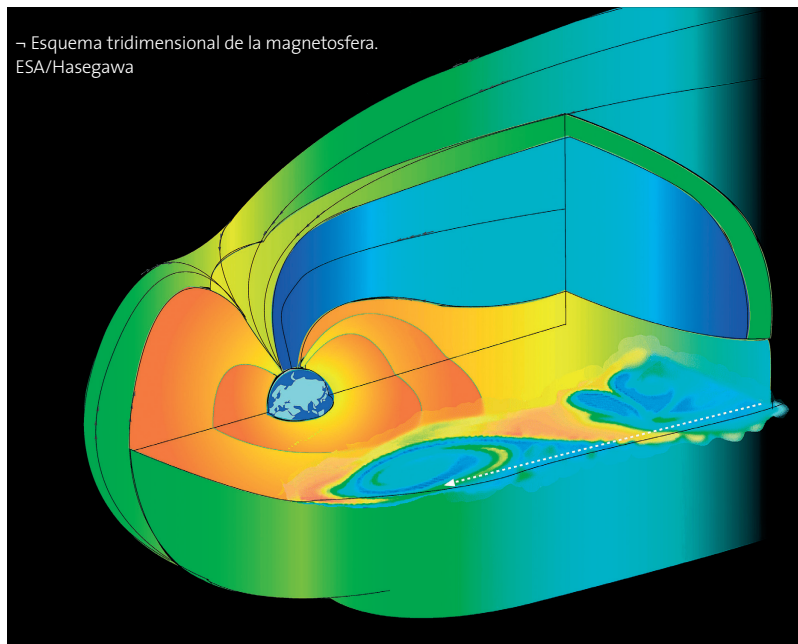
dounidense Van Allen con el lanzamiento del Explorer 1 en 1958, y el más interno (con máximo de densidad de partículas a 2 R_T) por las sondas Pioneer 3 y 4. La región comprendida entre 2,5 y 3,5 R_T se considera «zona segura», por lo que existe gran número de satélites orbitando en dicha zona del espacio. Sin embargo, como consecuencia de una emisión solar en marzo de 1991, la instrumentación a bordo del satélite *CRRES* detectó la existencia de un tercer cinturón de radiación ubicado entre los dos anteriores, en el que la densidad de partículas se mantuvo alta durante meses.

Otro elemento importante a tener en cuenta en la magnetosfera es el **anillo de corriente**. Las partículas de los cinturones, lejos de estar en reposo, experimentan derivas debido a las características del campo magnético terrestre, como son el gradiente y la curvatura de las líneas. Ello hace que los iones y electrones deriven en sentidos contrarios, hacia el oeste los primeros y hacia el este los segundos, dando lugar a una corriente eléctrica neta conocida como corriente del anillo.

La **magnetocola**, que se encuentra en la zona nocturna de la magnetosfera, se extiende más allá de los 300 R_T . En ella se encuentra la lámina de plasma o línea neutra. En esta región, igual que ocurre en el frente de choque cuando el campo magnético del plasma procedente del Sol y el terrestre tienen sentidos opuestos, se produce el fenómeno de reconexión magnética.

Este fenómeno favorece una entrada importante de energía y de nuevas partículas a la magnetosfera, aceleradas hacia el interior por los intensos campos eléctricos que se generan. Muchas de estas partículas quedan atrapadas en los cinturones de radiación,

→ Esquema tridimensional de la magnetosfera.
ESA/Hasegawa



lo que conlleva un aumento de densidad de partículas derivantes, por lo que también la corriente del anillo se ve reforzada.

A muy altas latitudes norte y sur se encuentran las zonas más desprotegidas de la magnetosfera, que responden rápidamente a las condiciones perturbadas del viento solar: las **cúspides polares**. A través de estas «ventanas» las partículas del viento solar pueden penetrar directamente a la magnetosfera hasta altitudes correspondientes a la alta atmósfera. Aunque dañinas para las órbitas polares, tienen su belleza en las auroras que, siendo habituales a altas latitudes, durante las tormentas geomagnéticas más severas son observables en latitudes menores, como sucedió en 1909 en Singapur.

Ya en la atmósfera terrestre se encuentra la **ionosfera**, región comprendida entre los 60-80 km hasta aproximadamente 1.000 km por encima de la superficie. Su carácter fuertemente conductor hace que en ella existan importantes sistemas de corrientes como

son los electrojets ecuatorial y auroral. En condiciones perturbadas por esos sucesos solares violentos, su grado de ionización aumenta y se produce un aumento importante de dichas corrientes (el electrojet auroral puede llegar a medir del orden de un millón de amperios). El mayor calentamiento que ello supone produce una expansión radial de la ionosfera en su conjunto. Este hecho puede perturbar las órbitas de los satélites, pues al encontrarse con una mayor densidad de partículas que en condiciones normales, aumenta la resistencia al avance, decelerándolos e incluso haciendo que pierdan altura en la órbita. En 1979, tras 6 años de funcionamiento, la estación *Skylab* se desintegró sobre el Océano Índico, presumiblemente por esta razón.

Finalmente, en la superficie terrestre aparecen intensas corrientes eléctricas inducidas. Efectivamente, los cambios en los sistemas de corrientes, tanto ionosféricas como magnetosféricas, originan cambios en los campos magnéticos que generan. Las corrientes inducidas en superficie son el

En el espacio, los astronautas están sometidos a dosis potencialmente letales de radiación

resultado de estas variaciones del campo geomagnético.

Las perturbaciones geomagnéticas en la superficie terrestre se registran mediante magnetómetros colocados en observatorios repartidos por el globo terrestre. A partir de dichas medidas se elaboran los índices geomagnéticos, como el índice Dst, elaborado por el centro de Kyoto, que mide la desviación promedio de la componente horizontal del campo magnético ecuatorial respecto al tiempo en calma. Entre uno y cuatro días después de originarse un suceso en el Sol (dependiendo de la velocidad del viento solar) el índice Dst disminuye acusadamente, alcanzando un valor mínimo. Posteriormente, aparece una fase de recuperación y vuelta a las condiciones normales.

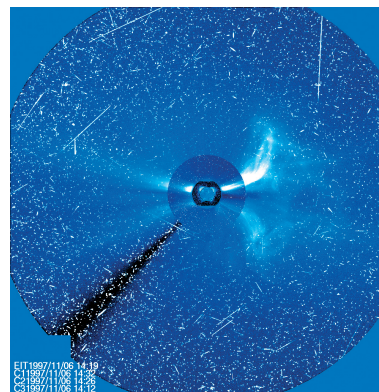
Efectos de las tormentas geomagnéticas

Son muchos los acontecimientos que han quedado en los registros históricos que ponen de manifiesto los efectos que se producen cuando los eventos de emisiones de masa solar están convenientemente dirigidos hacia la Tierra. Esto, a su vez, pone de manifiesto la vulnerabilidad de nuestros sistemas tecnológicos.

Entre los principales sistemas tecnológicos con base en tierra afectados seriamente por el tiempo espacial se pueden citar los estudios geomagnéticos para interpre-

taciones geológicas, las redes eléctricas de alta tensión, los gasoductos y oleoductos, los cables de telecomunicación a larga distancia e incluso el sistema de señalización ferroviario. Mientras que los primeros están relacionados directamente con la interferencia directa sobre las medidas del campo magnético, los cuatro últimos lo están con los efectos que producen las corrientes inducidas en materiales conductores.

Los sistemas de comunicaciones y navegación también pueden verse seriamente afectados por los cambios imprevistos de densidad de partículas cargadas de la ionosfera, que modifican la fase y amplitud de las ondas electromagnéticas. Esto origina fluctuaciones de la intensidad de la señal, distorsión y pérdida gradual de potencia, lo que hace que en casos extremos se pierda la comunicación con el satélite. Asimismo, esta degradación de señal causa errores de posicionamiento en los sistemas de posicionamiento global (GPS) o en sistemas de navegación terrestre por ondas radio. Sin embargo, no todos los satélites se encuentran en el interior de la magnetosfera. Algunos satélites científicos son diseñados para misiones en Marte o la Luna; otros, como *SOHO* o *ACE*, que sirven precisamente como centinelas para detectar la llegada de emisiones solares a la Tierra, tienen órbitas en torno al punto lagrangiano L₁ (punto

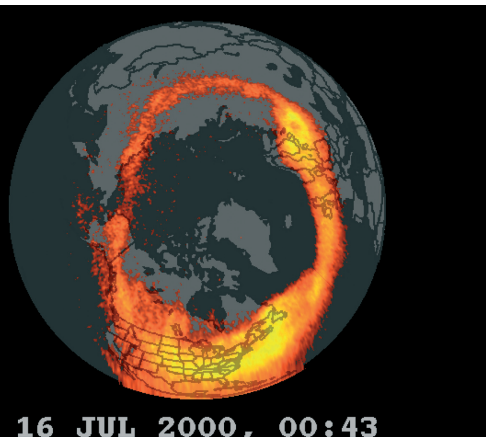


→ Gran emisión de masa coronal (CME) observada el 6 de noviembre de 1997. La imagen es una composición de imágenes procedentes de los instrumentos EIT y LASCO (ambos observando en la región del ultravioleta) embarcados en el satélite *SOHO*. El Sol, en el centro de la imagen, se oculta artificialmente mediante coronógrafos para producir eclipses artificiales que permiten observar la corona solar. *SOHO/LASCO*

estable entre la Tierra y el Sol). Estos satélites no disponen de la protección que proporciona el frente de choque, por lo que se ven seriamente afectados por la llegada de las partículas energéticas procedentes del Sol. Cuando protones con energías del orden de varios MeV alcanzan una nave espacial pueden producir degradación de los paneles solares (reduciendo el área disponible para captar la energía solar) y de los detectores ópticos (haciéndolos menos eficientes con el tiempo). Este último aspecto es especialmente importante en misiones como la de *SOHO*, que ha utilizado varios años detectores CCD mirando al sol directamente.

Además, las partículas cargadas que alcanzan la nave pueden generar también descargas eléctricas que atraviesan los componentes electrónicos, dañándolos e inutilizándolos. Toda esta dosis de radiación ionizante en la vida útil ⇨

Los sistemas de comunicaciones y navegación también pueden verse seriamente afectados



→ Imagen generada a partir de los datos procedentes del instrumento VIS (*Visible Imaging System*) a bordo del satélite *Polar* de NASA. Muestra una estimación de la localización, extensión e intensidad de la aurora boreal para el día 16 de julio de 2000. NASA

del satélite produce degradación de los materiales como: corrientes de fuga, ruido en sensores, cambios en los tiempos de respuesta, etc., o incluso cambia los comandos de software en los computadores a bordo de los mismos.

No podemos olvidar tampoco que aunque la atmósfera y magnetosfera terrestres permiten, en condiciones normales, la adecuada protección para los humanos en la superficie, sin embargo, en el espacio, los astronautas están sometidos a dosis potencialmente letales de radiación. La penetración de partículas de alta energía en las células de los tejidos conduce a cambios cromosómicos y, potencialmente, cáncer. Si las dosis de radiación recibidas son grandes, pueden ser fatales de forma inmediata.

Presente y futuro de la meteorología espacial

A día de hoy, la ciencia ha dado respuesta a muchas incógnitas sobre

el conocimiento de nuestro entorno más próximo y nuestra relación con la estrella de la que dependemos. Sin embargo, muchos de los detalles de cómo este ambiente terrestre responde a las variaciones en la radiación y el viento solar, y sus implicaciones para los humanos y la tecnología, permanecen todavía sin resolver.

A partir de 1994 se toma conciencia de la necesidad de estudiar los diferentes aspectos de la meteorología espacial y cómo afectan a la sociedad. Sin embargo, el desarrollo de modelos teóricos que permitan explicar las observaciones en épocas de gran actividad solar está aún en sus inicios. La ayuda experimental de que se dispone es, por una parte, los observatorios espaciales permanentes que proporcionan medidas continuas de los parámetros del viento solar (velocidad, densidad del plasma, temperatura de los protones) así como campo magnético interplanetario. *SOHO*, *ACE* o *WIND*, en L1, llevan ya varios años proporcionando esa información. Los dos satélites gemelos *STEREO*, lanzados en octubre de 2006, pretenden ser un observatorio tridimensional del Sol. Por otra parte, de medir los cambios producidos en la magnetosfera terrestre, campo magnético y flujos de partículas, se encargan misiones como *Cluster*, que con cuatro naves formando entre sí un tetraedro, cuyas distancias se han ido cambiando desde su lanzamiento en el año 2000, permite estudiar fenómenos de la magnetosfera con visión tridimensional y a distintas escalas espaciales.

Es necesario continuar e intensificar los servicios de alerta y predic-

ción del «tiempo espacial» para dirigir la salud, la seguridad y las necesidades comerciales. El número de satélites con fines comerciales, científicos o militares es cada vez mayor, por lo que es necesario mejorar el estado de predicción con objeto de minimizar las pérdidas económicas y reducir los riesgos. Las misiones encaminadas a tales fines necesitan datos en tiempo casi real, con objeto de permitir a los usuarios de la información tomar la acción preventiva apropiada si un evento es predicho/detectado. Muestra de esta preocupación por parte de la Unión Europea es la existencia de un portal web (<http://spaceweather.eu>) en el que colaboran los distintos grupos de investigación europeos, suministrando datos, modelos teóricos o sus propios resultados de predicción, como es el caso de nuestro equipo de la Universidad de Alcalá.

Para el futuro es fundamental también avanzar en el conocimiento de los niveles de radiación, puesto que el número de misiones espaciales tripuladas irá en aumento. Es importante saber no sólo la dosis de radiación a tolerar por los astronautas sino también sus efectos a largo plazo, puesto que en estas misiones la exposición a la radiación será mantenida por mucho tiempo (una misión a Marte, por ejemplo, puede durar del orden de dos años). ■

Elena Saiz, Consuelo Cid y Yolanda Cerrato son doctoras en Ciencias Físicas. Pertenecen al Departamento de Física y al Grupo de Investigación Espacial de la Universidad de Alcalá.

Las partículas cargadas que alcanzan la nave pueden dañar los componentes electrónicos