

ANÁLISIS DE LA AURORA BOREAL OBSERVADA DESDE LA FRAGATA ÁLVARO DE BAZÁN (F-101), 6-7 DE MARZO DE 2016

Miguel HERRÁIZ SARACHAGA
Catedrático de Física de la Tierra
Universidad Complutense de Madrid

Roberto CABIECES DÍAZ
Jefe de Sismología del ROA



El pasado 7 de marzo la dotación de la fragata *Álvaro de Bazán* (F-101) fue testigo de un fenómeno natural de gran belleza y que en pocas ocasiones se puede tener el privilegio de observar; estamos hablando de una aurora boreal.

La observación tuvo lugar durante el período de integración del buque en la agrupación de la OTAN SNMG-1, cuando realizaba maniobras en las proximidades de las costas de Noruega. Aproximadamente a las 23:00A comenzó a brillar el cielo con colores verdosos en forma de nubes afiladas que se movían como agua brillante en el cielo. La aurora pudo contemplarse durante más de tres horas.

La presencia de este fenómeno, además de un espectáculo de gran belleza, nos ofrece la oportunidad de reflexionar sobre su contenido físico y su posible efecto sobre la navegación.

¿Qué es una aurora boreal?

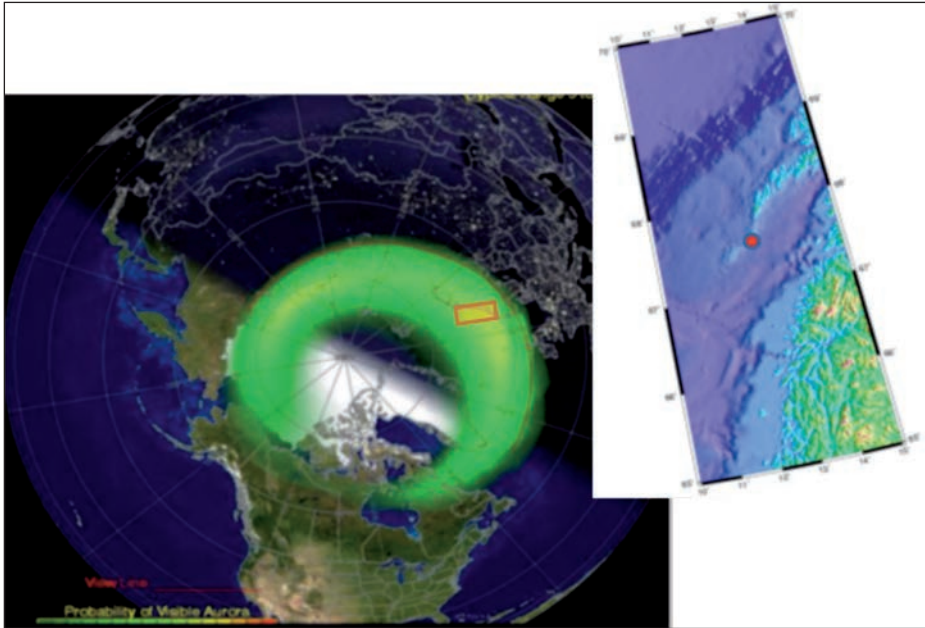
Lo mismo que las australes que se observan en el hemisferio sur, las auroras boreales son el resultado del choque entre partículas muy energéticas procedentes del espacio exterior y átomos con moléculas de nitrógeno y oxígeno presentes en la alta atmósfera terrestre (González, 1994). Estas partí-



Aurora boreal observada desde el castillo de la fragata *Álvaro de Bazán*.

culas energéticas, electrones en su mayoría, penetran en la alta atmósfera por las zonas de menor densidad de líneas del campo terrestre situadas a muy altas latitudes. Los electrones adquieren su energía gracias a que son acelerados por el viento de cola de la magnetosfera en el lado no iluminado de la Tierra. Estos electrones acelerados siguen las líneas del campo magnético terrestre hacia las zonas polares, donde colisionan con los átomos y moléculas de la alta atmósfera, llevándolos a estados de energía más elevados. Cuando los átomos excitados se relajan, vuelven a estados de energía más bajos y liberan la anteriormente absorbida en forma de fotones (cuantos de luz). La frecuencia de la radiación emitida, es decir, su color, depende de la energía liberada. Esto explica la gran variación espacial y temporal del fenómeno y la gama de colores que pueden contemplarse; el oxígeno emite radiaciones en dos colores preferentes: rojo y verde, mientras que las radiaciones del nitrógeno son, sobre todo, azules y rojo púrpura. El ojo humano ve una síntesis limitada de todos los colores emitidos, por lo que la observación directa del fenómeno no coincide con la que se registra mediante recursos fotográficos. Sin embargo, esto no disminuye la belleza del espectáculo.

La distribución en altura de las auroras depende de la energía de las partículas que excitan los átomos, porque las más energéticas pueden penetrar más



Óvalo asociado a la aurora boreal observada por la fragata *Álvaro de Bazán*. Mapa ampliado de la posición del buque.

en nuestra atmósfera. Por ello, la localización vertical se extiende, normalmente, desde 80-100 km hasta 200. En algunos casos el fenómeno puede alcanzar 300 km, aproximándose a la órbita de la Estación Espacial Internacional. La distribución geográfica también depende de la energía en juego.

El campo magnético de la Tierra guía los electrones de tal forma que el resultado de la aurora es un óvalo (ilustración anterior) centrado en torno al polo magnético y que en condiciones de tranquilidad magnética se sitúa a una distancia de 2.000-2.500 km del mismo. Durante la mayoría de las tormentas geomagnéticas, que como veremos enseguida son las causantes en última instancia de las auroras, un óvalo se expande a latitudes geográficas más bajas, pudiendo llegar a los 35 grados.

Este fenómeno ha permitido ver auroras en la península Ibérica originadas por grandes tormentas geomagnéticas, como el «Evento de Carrington» en 1859 (Carrington, 1859), que constató la influencia del Sol en el campo magnético de la Tierra, o la que tuvo lugar el 25 de enero de 1938. Esta última fue claramente observada en el noroeste peninsular y sus resplandores rojizos movieron a pensar en incendios en zonas del horizonte provocados por el conflicto bélico en la región.

En cuanto a su aspecto, las auroras frecuentemente tienen la forma de una cortina de rayos doblada. Durante el atardecer, estos rayos llegan a estirarse y ocupan todo el horizonte. Más adentrada la noche, los arcos de rayos empiezan a retorcerse y ondular como si el viento agitase una cortina de luz. En ocasiones las auroras se expanden para ocupar todo el cielo, moviéndose los rayos de luz rápidamente y de forma muy brillante.

¿Cuál es su origen?

El lector se podría preguntar: ¿de dónde proceden estos electrones tan energéticos capaces de producir las auroras? La respuesta se encuentra en la actividad del Sol, que genera una energía gigantesca que acaba llegando a nuestro planeta perturbando su campo magnético y originando las auroras (Parkinson, 1983). Esta actividad solar tiene una componente cíclica relacionada con las manchas solares (regiones activas), que tiene un período de once años (22 si se considera el cambio de polaridad de los campos magnéticos de dichas manchas) y que constituye el Ciclo Solar. A ella se añade una actividad esporádica que produce fenómenos muy intensos en estructuras solares como los agujeros coronales, las manchas ya citadas y los filamentos. Las primeras son regiones oscuras que expulsan al espacio viento solar de gran velocidad. Las manchas solares y los filamentos pueden producir gigantes tormentas solares (fulguraciones) capaces de generar eyecciones de masa coronal (CME). En ellas, la continua emisión de plasma que constituye el viento solar se intensifica formando inmensas llamaradas que superan la atracción gravitatoria del Sol y se expanden en el espacio. Estas masas de plasma solar viajan por el espacio a velocidades que oscilan entre 300 y 3.000 km/s. Las más rápidas están asociadas a enormes manchas solares activas y energizadas por una gran concentración del campo magnético del Sol, y alcanzan la Tierra en 14-17 horas. Una característica muy importante es que las CME que viajan con más velocidad que el modo más rápido de las ondas del plasma del viento solar forman una onda de choque en el espacio equivalente a la ruptura de la barrera del sonido en la Tierra. Estas ondas de choque aceleran las partículas cargadas que se encuentran en su avance hacia nuestro planeta, y de este modo van creando una tormenta de radiación asociada a las grandes erupciones en el Sol. Cuando las CME impactan contra la magnetosfera de la Tierra perturban la estructura de esta cavidad que protege nuestro planeta y pueden provocar tormentas geomagnéticas. En el caso de la aurora observada el 7 de marzo, el origen fue debido al alcance en el espacio de viento solar lento por otro más rápido generado por un agujero coronal. Este fenómeno dio lugar a una región en el espacio llamada CIR (*Co-rotating Interaction Region*), caracterizada por la formación de campos magnéticos intensos y la acumulación de plasma con la consiguiente presencia de fuertes

gradientes de densidad. Estas condiciones son propicias para la formación de tormentas y auroras.

Si se cumplen unas condiciones físicas, que se comentan más adelante, la llegada de este plasma sobre la Tierra origina una tormenta geomagnética (también llamada «tormenta magnética»), que se define como una perturbación del campo magnético de la Tierra, de carácter global, que puede durar varios días. En este contexto, es posible la generación de los fenómenos energéticos descritos anteriormente, que dan lugar a las auroras. Ellas son, por tanto, la expresión luminosa y sorprendente de las tormentas magnéticas. Pero si la tormenta alcanza un nivel importante, sus efectos sobre los recursos tecnológicos, de los que depende críticamente nuestra sociedad, pueden ser muy peligroso. Por una parte afectan a la trayectoria y el funcionamiento de los satélites, y con ellos a las telecomunicaciones y los sistemas de posicionamiento y navegación satelital, como el GPS. Por otra, pueden generar corrientes superficiales de cientos de amperios, capaces de destruir los transformadores de una central eléctrica y producir grandes apagones. Esto es lo que ocurrió el 13 de marzo de 1989 en Quebec, Canadá, cuando una tormenta geomagnética produjo el incendio de un transformador que dejó a cerca de seis millones de habitantes sin corriente eléctrica durante nueve horas. Para la navegación, el efecto puede ser crítico, ya que una tormenta geomagnética dificulta las comunicaciones de radio HF y durante horas las de baja frecuencia, y degrada el posicionamiento por GPS produciendo grandes errores durante numerosas horas. La tormenta que se trata en este artículo no originó ningún fallo en los sistemas de posicionamiento y de comunicaciones de la fragata *Álvaro de Bazán*, pero la amenaza de este tipo de fenómenos debe ser tenida en cuenta.

Medida de las tormentas magnéticas

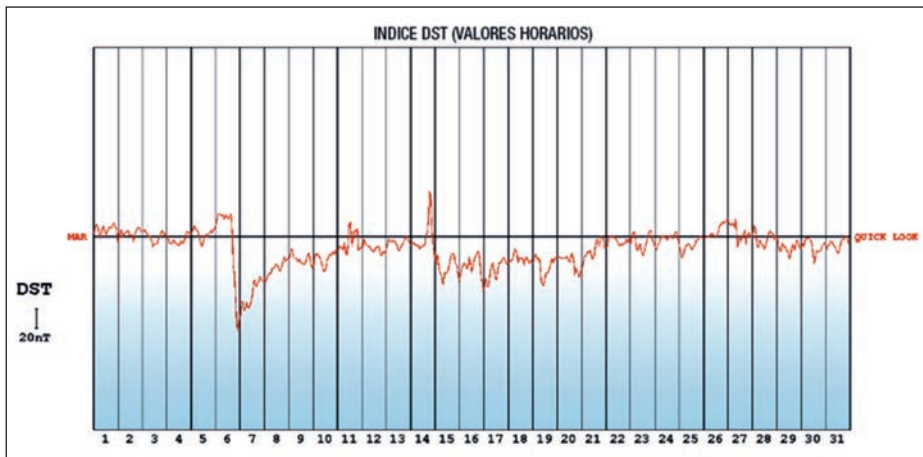
El tamaño de las tormentas geomagnéticas se mide mediante índices geomagnéticos, de los que el más utilizado es el índice global Dst (*Disturbance Storm Time*), que mide la actividad magnética mediante una red de cuatro observatorios geomagnéticos situados cerca del ecuador y distribuidos a lo largo del perímetro terrestre. Da una medida de la variación del campo magnético debida al anillo de corriente ecuatorial y se calcula a partir de la media de los valores de la componente horizontal del campo magnético.

El valor de Dst es estadísticamente cero en los días considerados tranquilos por los organismos internacionales. Durante una tormenta geomagnética, su valor desciende en unas horas desde cero hasta su valor mínimo, a partir del cual comienza a recuperarse lentamente hasta alcanzar el valor inicial próximo a cero.

Podemos clasificar las tormentas magnéticas según los datos de la siguiente tabla:

Categoría	Valor Dst (nT)
Débiles	$-30 \geq \text{Dst} > -50$
Moderadas	$-50 \geq \text{Dst} > -100$
Intensas	$-100 \geq \text{Dst}$

A continuación se muestra el gráfico del índice Dst del mes de marzo del 2016, donde se puede observar la tormenta geomagnética entre los días 6 y 7.



Evolución del índice Dst en el mes de marzo de 2016. La tormenta geomagnética que dio lugar a la aurora observada desde la fragata *Álvaro Bazán* aparece claramente señalada en el día 6.

¿Es posible predecir las tormentas geomagnéticas?

La respuesta a esta pregunta es negativa, porque actualmente no existe ningún modelo que permita predecir la aparición de los fenómenos solares violentos que están en el origen de las tormentas geomagnéticas. Sin embargo, sí podemos paliar buena parte de los efectos dañinos de dichas tormentas gracias a la observación directa del Sol y a la información facilitada por diferentes satélites situados en el espacio Tierra-Sol. La observación directa del Sol nos permite conocer los fenómenos ocurridos en él ocho minutos antes y detectar así la aparición de CME potencialmente peligrosas. El seguimiento

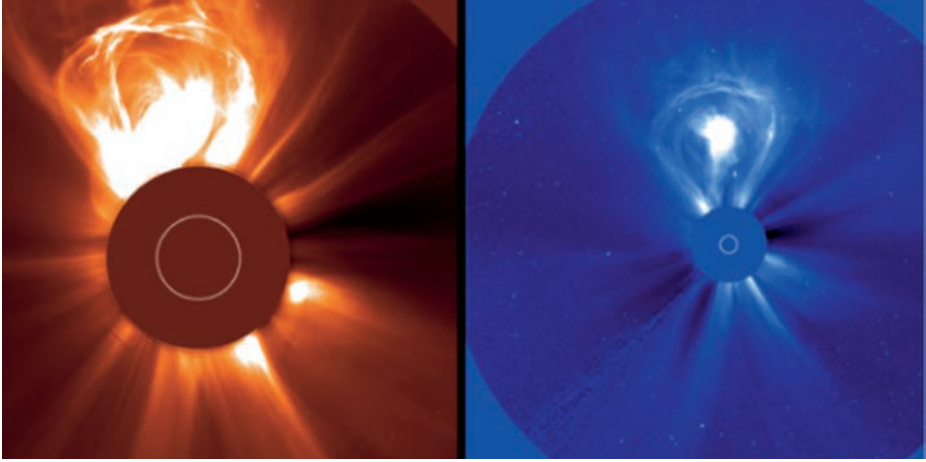
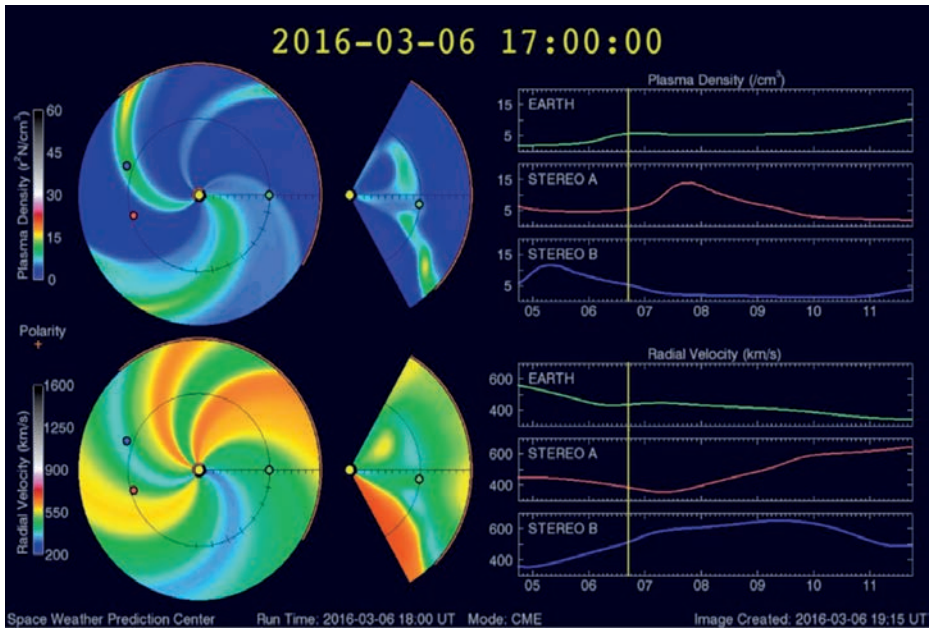


Imagen obtenida del satélite SOHO.

de estas eyecciones de masa coronal se realiza mediante diversos navíos espaciales, entre los que destacan los satélites SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) y ACE (*Advanced Composition Explorer*) situados a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra, en la dirección al Sol, en la región que constituye el Punto L1 de Lagrange. El satélite SOHO proporciona imágenes detalladas del Sol (ilustración superior), y el ACE datos sobre la densidad y temperatura del viento solar y las características del IMF. Su distancia a la Tierra hace que esta información llegue unos 40 minutos antes que la perturbación, intervalo que permite la toma de medidas de protección para satélites y otros sistemas tecnológicos de particular importancia. La velocidad, la dirección y la densidad de una CME son los parámetros más importantes para determinar si la eyección impactará en la Tierra y, en caso afirmativo, estimar cuándo lo hará. Podemos evaluar estos parámetros utilizando los datos proporcionados por ACE y las observaciones de un instrumento a bordo del satélite SOHO «llamado coronógrafo» que bloquea el brillo de luz del disco solar (como si se tratara de un eclipse), permitiendo observar su atmósfera exterior (cromosfera y corona). De este modo, las CME se distinguen como nubes brillantes de plasma escapando hacia el espacio interplanetario. Por su parte, ACE permite evaluar la intensidad del campo magnético interplanetario arrastrado por el viento solar y su dirección. Si esta es contraria a la del campo magnético dipolar de la Tierra, y si la CME cumple un valor umbral de intensidad y lleva la dirección adecuada, el riesgo de tormenta es elevado. El seguimiento de las tormentas desde el espacio se completa con datos aportados por otros dos satélites más modernos llamados STEREO (*Solar Terrestrial Relations Observatory*) A y B, situados en la órbita de la Tierra, uno por delante

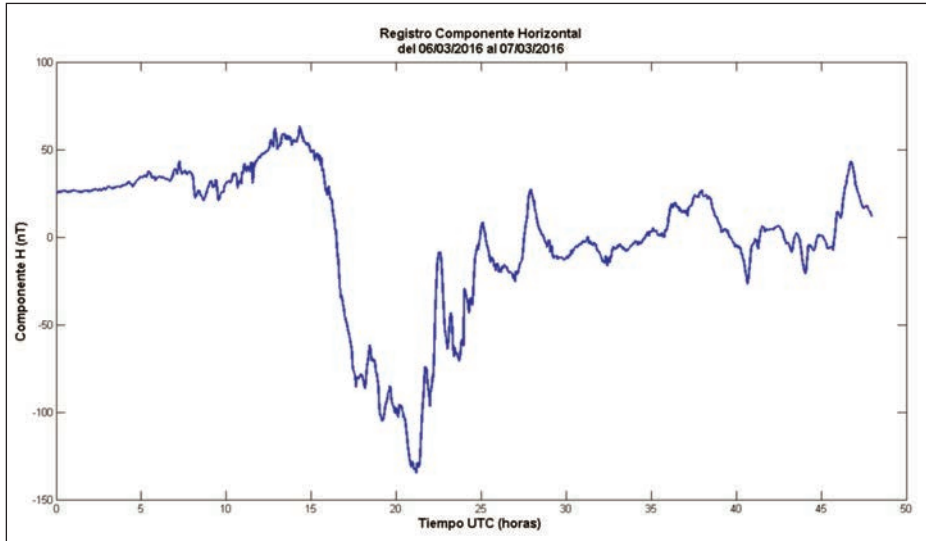
(*Ahead*) y otro por detrás (*Behind*), que proporcionan una imagen total del Sol. Toda esta información se ve enriquecida por los GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), que se mueven en órbitas estacionarias (35.790 km) e informan sobre las características del viento solar en las cercanías de la tierra.

La siguiente ilustración muestra la predicción de la evolución en el espacio de la CME generada por la erupción solar. Para ello se ha utilizado el modelo WSA-Enlilcone de la NOAA. En la imagen se observa el choque del plasma con la Tierra. Puede apreciarse en la gráfica de la derecha que los valores del plasma se disparan con la llegada de la CME.

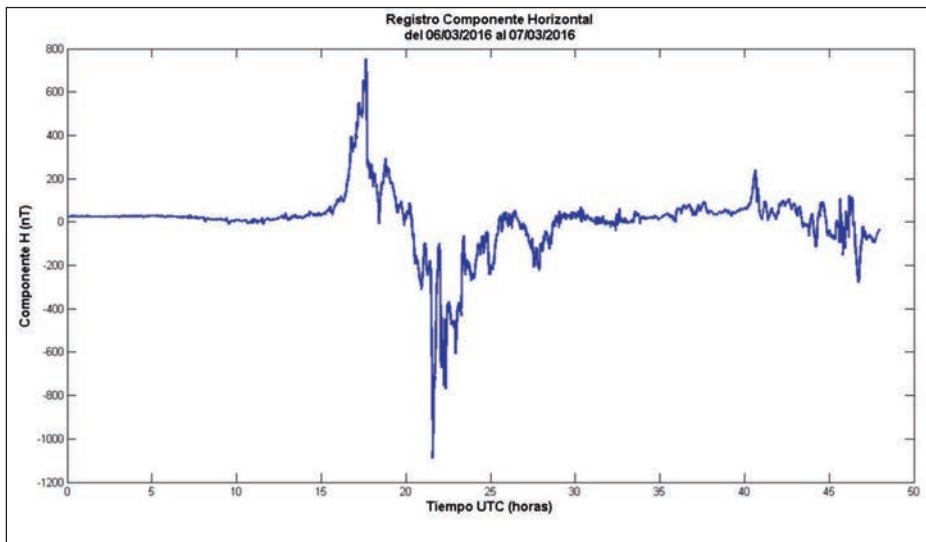


Izquierda: predicción de la trayectoria del viento solar y su posible impacto sobre la Tierra (punto amarillo pequeño) para la situación de calma (arriba) y para la eyección solar del 6 de junio (abajo). Derecha: gráficas de la densidad de plasma (arriba) y la velocidad radial del viento solar (abajo) registradas por los satélites STEREO A y B.

También podemos ver cómo se registró la tormenta en el Observatorio de Marina de San Fernando y paralelamente en un Observatorio del Geological Survey of Sweden en Lycksele Suecia, ambos pertenecientes a la red INTERMAGNET (ilustraciones siguientes). La comparación de ambas figuras, que muestran la evolución de la componente horizontal del campo magnético de la Tierra, pone de manifiesto su diferente respuesta según la latitud considerada.



Registro en San Fernando, Longitud 5.9E Latitud 36.6N.



Registro en Lycksele, Longitud 18.8E Latitud 65.6N.

Las condiciones geomagnéticas en el Observatorio de Suecia son próximas a las experimentadas por la fragata *Álvaro de Bazán*.

Conclusiones

Las auroras polares, además de un espectáculo de gran belleza, constituyen la expresión de numerosos fenómenos físicos, como la interacción Sol-Tierra, la excitación energética de átomos y moléculas, la emisión de luz por el regreso de sus electrones a niveles más estables o la misma existencia del campo magnético de la Tierra.

Pero en el caso de la navegación son también interesantes en cuanto que ponen de manifiesto perturbaciones importantes del campo magnético terrestre que pueden afectar los sistemas de posicionamiento por satélites y la transmisión de ondas de alta frecuencia que utilizan la ionosfera como medio de reflexión.

Por todo ello, las auroras, y las tormentas geomagnéticas que las originan, son fenómenos dignos de ser estudiados con detenimiento y de ser tenidos en cuenta en la navegación en altas latitudes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración inestimable de la dotación de la fragata *Álvaro de Bazán*, en especial la ayuda ofrecida por el teniente de navío Baró Martín. Los autores agradecen a las siguientes instituciones la información facilitada: INTERMAGNET, Kyoto World Data Center for Geomagnetism, NASA CDAW Data Center y NOAA Space Weather Prediction Center.

BIBLIOGRAFÍA

- Carrington, RC. *Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1. Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1859, (20) 13-15.
- GONZÁLEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M.: «What is a geomagnetic storm?». *Journal of Geophysical Research*, 1994, (99) 5771-5792.
- PARKINSON, W. D.: «Introduction to Geomagnetism», *Scottish Academic Press*, 1983.
- <http://www.intermagnet.org/> [Accedido, 5 de abril de 2016].
- http://sohodata.nascom.nasa.gov/cgi-bin/data_query [Acceso 4 de abril 2016].
- <http://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction> [Acceso 4 de abril de 2016].
- <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/> [Acceso 8 de abril de 2016].