

Publicacions de l'Observatori de l'Ebre
Miscel·lània nº 45

GEOMAGNETISMO
TENDENCIAS ACTUALES Y RETOS FUTUROS

JOAN MIQUEL TORTA

Roquetes (Tarragona)
2010

Publicacions de l'Observatori de l'Ebre
Miscel·lània nº 45

GEOMAGNETISMO
TENDENCIAS ACTUALES Y RETOS FUTUROS

JOAN MIQUEL TORTA

Roquetes (Tarragona)
2010

Geomagnetismo. Tendencias actuales y retos futuros

J. Miquel Torta

Publicacions de l'Observatori de l'Ebre. Miscel·lània n° 45

ISSN 1579-8933

Edita: Observatori de l'Ebre – Roquetes (Tarragona)

Esta publicación puede obtenerse en <http://www.obsebre.es/php/biblioteca/publicacions.php>



Geomagnetismo

Tendencias actuales y retos futuros

J. Miquel Torta

Observatorio del Ebro, CSIC – Universitat Ramon Llull, 43520 Roquetes (Tarragona), jmtorta@obsebre.es

RESUMEN

En este documento se examinan los avances recientes en el ámbito general del Geomagnetismo a finales de la primera década del siglo XXI. Dada la amplitud y multidisciplinareidad de esta Ciencia, la revisión no es exhaustiva, incidiéndose más en los campos magnéticos internos y en lo que se refiere a la observación y modelización del campo magnético próximo a la Tierra, y tratando de detallar al final de cada apartado los grupos y las respectivas actividades desarrolladas desde España. La revisión se ha dividido en cuatro grandes áreas y en diversas subdisciplinas dentro de las mismas, finalizando con una visión sobre las posibles líneas de evolución que se auguran para algunas de ellas.

1. INTRODUCCIÓN

De las Ciencias de la Tierra, el Geomagnetismo es quizás la disciplina que ha tenido una trayectoria más larga, no sólo por la curiosidad que suscitó en la antigüedad la habilidad de la calamita para apuntar al norte, sino por la importancia histórica que ha tenido para la navegación, primero, y para la exploración del interior de la Tierra y la de la relación de ésta con la actividad solar, después. Ello lo ha convertido hoy en día en un tema extremadamente amplio y multidisciplinar, por lo que la pretensión de este artículo, es decir, resumir y estructurar sus líneas de actividad actuales, no es una tarea fácil.

En otras áreas del saber, y quizás precisamente en otras ramas de la Geofísica, tal vez no exista tanta relación entre cómo está organizada la Asociación Internacional de referencia y los caminos por los que transcurren los avances o los intereses científicos en cada momento. Eso no es así para el caso particular del Geomagnetismo, y un ejemplo es que, a pesar de que el número de investigadores dedicados al Geomagnetismo y la Aeronomía suele ser una minoría dentro del ámbito general de la Geofísica, las Asambleas de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA) acostumbran a ser multitudinarias y casi siempre su participación es la mayoritaria cuando se celebran conjuntamente con otras Asociaciones de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG), cuyos delegados tienden a diversificar más su presencia en otros foros o trabajan más al margen de la disciplina o los dictámenes de sus Asociaciones Internacionales. Por lo tanto, una buena forma de estructurar esta revisión es hacerlo del mismo modo que está estructurada la IAGA.

Esa estructura es completa pero, para evitar presentar un documento excesivamente largo, no van a tratarse todos los apartados con la misma intensidad. Se pasará más someramente por las líneas que tienen más relación con la física de la atmósfera, la heliofísica o la astrofísica en general. La División II, que se ocupa de la física, y hasta cierto punto, también de la química de la ionosfera, la termosfera y la atmósfera media es el ejemplo más claro. Incluye la parte de la IAGA que trata, pues, con la Aeronomía; y, aunque es evidente que no puede concebirse al margen de la existencia del campo magnético de la Tierra, debería ser objeto de un análisis semejante por separado, y no va a considerarse en esta revisión. De la misma forma, el espacio dedicado a las Divisiones III y IV será muy inferior al dedicado a la I y V, en las que se detallará, además, las actividades de las distintas subdisciplinas, coincidentes a menudo con determinados *Working Groups* creados para promocionar y organizar su desarrollo.

La División I se ocupa de los campos magnéticos internos, cubriendo en buena medida toda la investigación sobre el origen del campo magnético de la Tierra y de los planetas, e incluyendo asimismo los estudios y las aplicaciones de la inducción electromagnética, y del paleomagnetismo y el magnetismo de las rocas. Las Divisiones III y IV versan sobre el geomagnetismo de origen externo y las fuentes que lo originan, es decir, de los fenómenos magnetosféricos, y del viento solar y el campo interplanetario, respectivamente. Finalmente, la División V trata de promocionar una estandarización de los sistemas de adquisición de datos geomagnéticos y de su diseminación, de la programación de los levantamientos, de los índices geomagnéticos, y de los análisis de las observaciones geomagnéticas en su sentido más amplio.

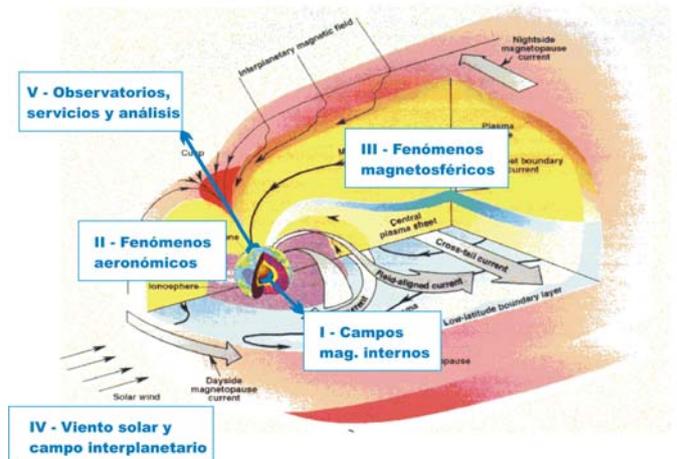


Figura 1 - Las cinco Divisiones de la IAGA, según la región del sistema Sol-Tierra donde se ubican. Adaptada de Fischbach et al. (1994).

La revisión que sigue a continuación se divide, pues, en esas últimas cuatro grandes áreas y en sus diversas subdisciplinas dentro de las mismas, incidiendo en aquellos aspectos que el autor mejor cree conocer, y tratando de detallar al final de cada apartado los grupos y las respectivas actividades desarrolladas desde España. Finalmente se discuten las posibles líneas de evolución de algunas de las temáticas revisadas.

2. CAMPOS MAGNÉTICOS INTERNOS

2.1 Teoría de la geodínamo y el magnetismo planetario: El salto más importante en los estudios de la dínamo nuclear autoinducida en los últimos años se produce con la aparición de soluciones numéricas para las ecuaciones magnetohidrodinámicas (MHD) que describen la convección térmica y la generación del campo magnético en un fluido rotando en un capa esférica con un

Este artículo supone una revisión actualizada y ampliada de Torta (2003), que fue presentada en el Ciclo de Conferencias sobre la Geofísica en España, en ocasión del Centenario del Observatorio Geofísico de Toledo, 28-29 de Septiembre de 2009.



núcleo interno sólido y conductor (Glatzmaier and Roberts, 1995). Hacia el final de la simulación aparecía hasta una inversión del campo, con un tiempo de transición de unos 1.000 años. Resultados posteriores por parte de esos mismos autores (Roberts and Glatzmaier, 2000) hablaban de 300.000 años de simulación y la aparición de hasta cuatro inversiones espontáneas. Estas simulaciones numéricas están proporcionando, pues, resultados razonables acerca de la morfología y la intensidad del campo en la frontera manto-núcleo, son capaces de generar inversiones y excursiones que pueden compararse con las observaciones paleomagnéticas y predicen una rotación diferencial entre el núcleo y el manto. Sin embargo todavía no se ajustan a las condiciones planetarias reales en un buen número de aspectos. Concretamente, giran demasiado despacio, son mucho menos turbulentas, y usan una viscosidad y difusividad termal excesivamente grandes en comparación con la difusividad magnética (Christensen et al., 2009). Para un repaso de los logros y de los fallos de los resultados más recientes de la modelación de la geodinamo ver Christensen and Wicht (2007).

En esta primera división encontramos la mayor interrelación entre la IAGA y otras asociaciones de la IUGG que promueven el estudio de la tierra sólida, como la de Geodesia (IAG), la de Sismología y Física del Interior de la Tierra (IASPEI) y la de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI). En particular, toda la comunidad científica dedicada al estudio de la evolución y el estado actual del interior profundo de la Tierra, y los efectos que dicho interior tiene en las estructuras y procesos observados en la superficie, se organiza en torno a la Comisión conocida como SEDI (*Study of the Earth's Deep Interior*), con el ánimo de promover estudios desde distintos enfoques (<http://www.sedigroup.org/>).

Por lo que respecta al magnetismo planetario, se detecta que las técnicas para analizar los datos magnéticos para la exploración de nuestro sistema solar generalmente provienen de los grupos que estudian las anomalías geomagnéticas de origen litosférico (Arkani-Hamed, 2007), y los que diseñan las misiones e instrumentos a bordo de satélites orbitales como la *Mars Global Surveyor* (MGS) son los mismos (Acuña et al., 1999) que lo hacen para las misiones espaciales para la observación magnética terrestre. Los magnetómetros instalados en las sondas espaciales han viajado hoy en día suficientemente cerca de todos los planetas, con excepción de Plutón, para detectar la presencia o ausencia de un campo magnético intrínseco. De ellos, sólo Venus y Marte parecen no tener en el presente una dínamo interna como la Tierra, aunque la tuvieron en sus orígenes (Christensen et al., 2009).

Sin embargo, los campos magnéticos medidos por la MGS a altitudes comparables con las observaciones en la Tierra revelan que la corteza de Marte es entre uno y dos órdenes de magnitud más magnética que la de la Tierra. Se trata, pues, de un magnetismo remanente, puesto que no debe haber magnetizaciones inducidas, en ausencia de campo magnético principal. Se han publicado modelos, bien basados en análisis en armónicos esféricos (Arkani-Hamed, 2002), bien en modelos de fuentes equivalentes (Langlais et al., 2004). Las anomalías más fuertes aparecen en el hemisferio sur. Las grandes provincias volcánicas y los mayores cráteres de impacto carecen de señal magnética, por lo que se deduce que estos eventos destructivos tuvieron lugar después de que cesara la dínamo. Gracias, pues, a los datos proporcionados por la MGS (en órbita desde septiembre de 1997 hasta noviembre de 2006), en los últimos años se han producido notables avances en el conocimiento de Marte en términos de su historia magnética (para una revisión exhaustiva ver Langlais and Quesnel, 2008). Sin embargo, esas medidas fueron tomadas a alturas demasiado altas (a 90 Km durante un corto periodo inicial y a 400 Km durante la mayor parte del tiempo) para permitir una caracterización precisa.

Últimamente se está también investigando Mercurio de forma notoria, gracias a las dos recientes aproximaciones de la sonda MESSENGER, la cual ha revelado que a gran escala la morfología del campo magnético interno de Mercurio es similar a la de Tierra,

aunque en superficie sea 2 órdenes de magnitud más débil (Anderson et al., 2008).

2.2 Inducción electromagnética: En los últimos años se ha obtenido un progreso significativo en la obtención de predicciones precisas y detalladas de los campos magnéticos inducidos en la Tierra, especialmente en los océanos, pero también en la tierra sólida, gracias al aumento de la disponibilidad de datos de satélite y a la obtención de modelos (3-D) de conductividad eléctrica realistas (Kuvshinov, 2008). Ello ha de servir para la construcción de modelos más precisos para investigaciones de la geodinamo, así como para la cartografía de la magnetización de la litosfera y su interpretación geológica, pues esos modelos exigen una extracción acertada no sólo de los campos originados en la magnetosfera y la ionosfera, sino también de los inducidos en la Tierra por esas corrientes eléctricas externas, al ser variables en el tiempo. Se han podido detectar campos eléctricos en las costas debidos a las mareas oceánicas, que pueden usarse para sondear la litosfera (Kuvshinov et al., 2006). Otra fuente de señales magnéticas detectables debido al movimiento del agua del mar es la circulación oceánica global. La región donde esas señales son mayores se produce en el Océano Índico y en el Sur del Pacífico, debido a la combinación de la Corriente Circumpolar Antártica y la proximidad con el polo sur geomagnético. Aunque la parte estática de esas señales es difícil de distinguir del campo producido por la magnetización de la corteza, las medidas magnéticas de satélite podrían llegar a proporcionar una medida independiente de la variabilidad oceánica (Manoj et al., 2006a). Asimismo, tras el devastador tsunami de Sumatra del 26 de diciembre de 2004, la detección y monitorización de señales geomagnéticas generadas por las oscilaciones oceánicas producidas por tsunamis ha recibido una importante atención (Tyler, 2005; Manoj et al. 2006b).

Por otro lado, se están desarrollando multitud de técnicas electromagnéticas para la caracterización de la conductividad eléctrica del subsuelo para exploración mineral o para aplicaciones medioambientales, fundamentalmente mediante la caracterización de acuíferos (Tezkan, 1999; Pellerin, 2002; Slater, 2007), las cuales se están mostrando esenciales hoy en día para la detección de plumas contaminantes o la exploración de vertederos.

En nuestro país se realizan estudios magnetotélúricos en el Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada, básicamente con la realización e interpretación de perfiles en distintas regiones (p.e. Pedrera et al., 2009), y en el Departamento de Geodinámica y Geofísica de la Universidad de Barcelona (UB), también con estudios magnetotélúricos, en Canadá (Ledo and Jones, 2005) o en la Cordillera Bética (Martí et al., 2005), aunque también trabajan en aspectos metodológicos (p.e. Marcuello et al., 2005)) y han obtenido proyectos para el desarrollo de métodos de exploración electromagnética aplicados a la hidrogeología para la caracterización, control y seguimiento de problemas medioambientales (Falgàs et al., 2005).

Dentro de este mismo apartado, no podemos olvidar el *boom* que está suponiendo en estas últimas décadas la búsqueda de efectos magnéticos, eléctricos o electromagnéticos relacionados con eventos sísmicos y volcánicos. Se ha producido un incremento remarcable en la cantidad y calidad de los datos registrados antes y durante numerosas erupciones y terremotos (Uyeshima, 2007), y cada vez más este tema suscita interés, hasta el punto que se hace unos años se creó una comisión conjunta entre la IASPEI, la IAVCEI y la IAGA, cuyo objetivo es el estudio de todos los potenciales precursores sísmicos y volcánicos, incluyendo los efectos magnéticos, geoelectrónicos e ionosféricos (<http://www.emsev-iugg.org/emsev/>). El grupo de magnetismo del Departamento de Vulcanología del Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN, CSIC) ha trabajado en diversas ocasiones en estas disciplinas, en épocas recientes en los volcanes activos de la Isla Decepción (García et al., 1997) y Teide (Sánchez et al., 2006). Desde 2004 el Instituto Geográfico Nacional (IGN) es el Organismo con competencias para la observación, vigilancia y comunicación de la actividad volcánica y determinación de riesgos asociados y, aunque incipiente, ha empezado a desarrollar una red



de vigilancia volcánica en la isla de Tenerife que incluye el emplazamiento de varios magnetómetros de medida continua, así como campañas de medida del potencial espontáneo.

2.3 Paleomagnetismo y magnetismo de las rocas: Puesto que cualquier explicación convincente de la variación del campo magnético en el tiempo debe basarse en una base de datos global y de calidad, en la actualidad diversos grupos repartidos por todo el mundo están inmersos en la preparación de bases de datos paleomagnéticos con el objeto de mejorar por un lado la resolución de dichos datos y, por otra, de extender su expansión temporal (Pisarevsky, 2005). Ello está permitiendo una mejor definición de la curva de deriva polar aparente para estudios tectónicos globales o regionales, sobre todo en lo que respecta a los datos más antiguos. Sin embargo, las evidencias son todavía insuficientes para delimitar la estructura del campo geomagnético para épocas más allá de aproximadamente 300 Ma., lo que impide una reconstrucción precisa de las masas de tierra más antiguas (Merrill and McFadden, 2007). Por otro lado, mientras que el conocimiento de la dirección del campo en el pasado es hoy en día bastante detallado, y aunque se está avanzando mucho gracias a programas internacionales como el *Ocean Drilling Program* (p.e. Lund et al., 2006), todavía queda mucho camino por recorrer por lo que respecta a la intensidad del campo, dado que las medidas de paleointensidad son mucho más difíciles de obtener. En cualquier caso, se está empezando a ver cómo se interpretan esas nuevas bases de datos en términos de la dinámica del núcleo externo (Leonhardt and Fabian, 2007).

Por lo que respecta al arqueomagnetismo, que estudia la historia de las variaciones en dirección e intensidad del campo sirviéndose de materiales arqueológicos que han sufrido procesos de calentamiento, ha registrado un gran auge en los últimos años gracias sobre todo a la publicación de nuevas bases de datos (Donadini et al., 2009) y modelos globales (Korte et al., 2009) y regionales (Pavón-Carrasco et al., 2009). Estos modelos son utilizados como método de datación arqueológica o, sencillamente, para mejorar el conocimiento del campo magnético en el pasado. A raíz de ellos, se está suscitando un intenso debate sobre la posibilidad de que el decrecimiento del momento dipolar (un 10% desde la época de Gauss) pueda indicar una futura transición de polaridad (p.e., Gubbins et al., 2006; Constable and Korte, 2006; De Santis, 2007), o de que pueda existir una conexión entre el geomagnetismo y el clima (Courillot et al., 2007, 2008; Bard and Delaygue, 2008).

Otra relativamente novedosa línea de investigación es el magnetismo ambiental, que estudia la correlación de características medioambientales y paleoclimáticas con las propiedades magnéticas de los minerales. Esta línea de investigación está, además, fuertemente ligada a la de paleointensidad y a la del magnetismo de las rocas. Es decir, se trata de medir las propiedades de los materiales ferromagnéticos, no con el ánimo de investigar sobre rotaciones o cualquier otro movimiento tectónico, sino para detectar esos posibles cambios climáticos o contaminaciones, puesto que las propiedades magnéticas de las rocas cambian con las variaciones climáticas o medio-ambientales (p.e. Maher, 2007).

En España existen diversos grupos de investigación en paleomagnetismo con laboratorios adaptados para el tratamiento detallado de la débil señal magnética de las rocas. En la actualidad hay laboratorios de paleomagnetismo en: la Universidad Complutense de Madrid, la Universidad de Barcelona-Instituto Jaume Almera (CSIC), en el Instituto Volcanológico de Canarias (CSIC), la Universidad de Burgos, la Universidad de Vigo y en la Universidad del País Vasco en Bilbao. Además, hay un grupo de reciente formación en la Universidad de Zaragoza y en el IGME que aún no disponen de laboratorio. Por último, se está instalando un nuevo laboratorio en el Centro de Evolución y Comportamientos Humanos, que basa sus investigaciones en las excavaciones de Atapuerca. La mayoría de estos laboratorios disponen de magnetómetros criogénicos y demás equipamiento

habitual en los laboratorios de paleomagnetismo. Uno de los grupos pioneros es el de la UCM, que pusieron en marcha su laboratorio en 1986. Trabajan en temas relacionados con tectónica de placas (reconstrucciones jurásicas), rotaciones de bloques (Béticas y México), magnetoestratigrafía (Jurásico), arqueomagnetismo, paleointensidad, magnetismo planetario, magnetismo ambiental y modelado del campo magnético terrestre (últimos 10.000 años). El grupo de la Universidad de Barcelona trabaja fundamentalmente en magnetoestratigrafía de materiales terciarios, paleomagnetismo y tectónica en Pirineos. Y, actualmente, también en paleointensidad. El grupo de la Universidad de Burgos trabaja en paleomagnetismo y tectónica de la Cordillera Ibérica y está especializado en el estudio de reimanaciones asociadas a eventos tectónicos. También trabaja en paleointensidad y de forma secundaria en magnetismo ambiental. El grupo de la Universidad de Vigo trabaja fundamentalmente en magnetismo ambiental y, de forma ocasional, en magnetoestratigrafía del Triásico y en arqueomagnetismo. El grupo de Zaragoza en estudios de anisotropía magnética, magnetismo de rocas y paleomagnetismo y tectónica de Pirineos. El grupo de Canarias orienta sus trabajos al estudio de materiales ígneos (variación paleosecular, excursiones, paleointensidades). Vale la pena mencionar el congreso MAGIBER que desde 2001 reúne cada 2 años a los investigadores españoles y portugueses (aunque éstos son minoría). En 2004 se creó la Comisión de Paleomagnetismo dentro de la Sociedad Geológica de España, a la que se adscriben todos esos grupos. Puede hallarse información sobre las actividades y bibliografía de cada uno de esos grupos en (<http://www.ub.es/paleomag/compaleomag.htm>).

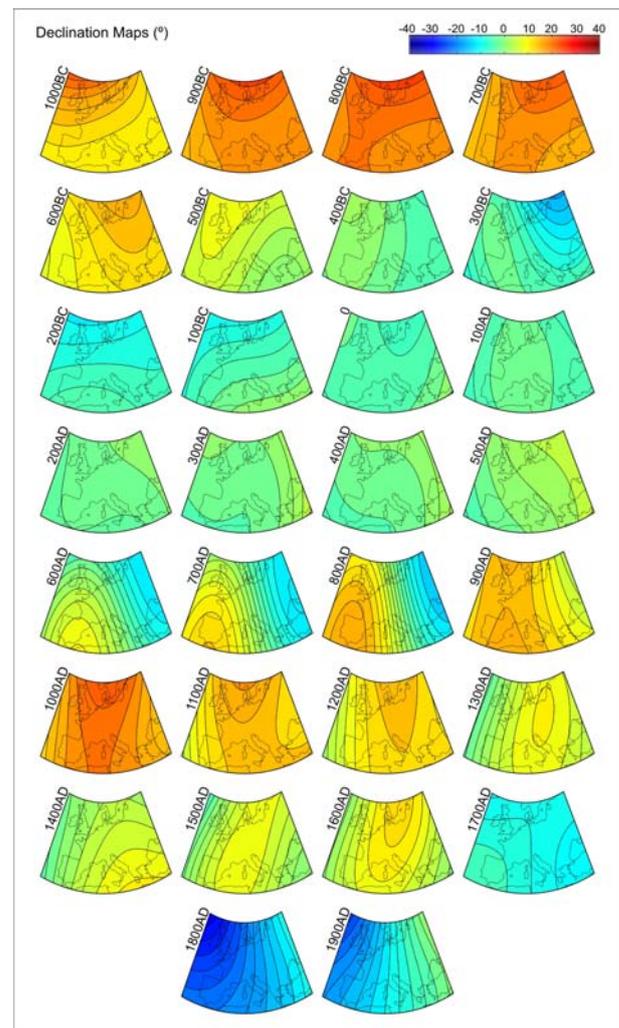


Figura 2 – Evolución de la declinación magnética en Europa a partir del modelo arqueomagnético de Pavón-Carrasco et al. (2009)



3. FENÓMENOS MAGNETOSFÉRICOS

Desde los años ochenta el estudio de la magnetosfera terrestre se ha revolucionado gracias a la creciente flota de vehículos espaciales equipados con multitud de instrumentos que se encuentran en órbita. Para coordinar todas esas misiones en los años noventa se creó el ISTP (*Internacional Solar-Terrestrial Physics Science Initiative*) para unir los esfuerzos de la NASA, la ESA y la ISAS, junto con redes de observatorios y radares en tierra e investigaciones teóricas (<http://pwg.gsfc.nasa.gov/istp/>). Gracias, pues, al uso creciente de observaciones multipunto de alta calidad se están estudiando de forma muy activa los procesos dinámicos de fenómenos a gran escala en los constituyentes del plasma magnetosférico, sus interrelaciones y sus evoluciones temporales, durante diferentes condiciones de actividad solar. Por un lado se están describiendo esos procesos (como por ejemplo la dinámica de la magnetopausa, de la magnetocola o la de los anillos de radiación durante tempestades magnéticas) mediante representaciones analíticas y modelos fenomenológicos (Dunlop, 2007; Nakamura, 2007; Goldstein; 2007), y los nuevos modelos e ideas se están validando mediante observaciones en el interior de la magnetosfera durante condiciones de extrema actividad (p.e. Baker et al., 2005), que incluyen los efectos de las partículas energéticas solares, sus concentraciones, los rayos X, la cinemática del viento solar, etcétera.

Por otro lado se está representando la dinámica de la magnetosfera en tres dimensiones mediante modelos MHD (Baker et al., 2007). Los resultados de estas simulaciones muestran como la magnetosfera terrestre actúa como una lente que focaliza las fluctuaciones del viento solar en una región al otro lado de la Tierra donde se origina la mayor parte de la actividad magnética.

Cabe resaltar también la creciente actividad (p.e. Vassiliadis et al., 2007) en todo aquello relacionado con el estudio de los mecanismos de excitación, propagación, atenuación y detección de ondas ULF en la magnetosfera. Estas ondas se excitan a través de una gran variedad de procesos relacionados con la física del plasma y su importancia es básica, sobre todo, por su relación con las subtormentas, con el acoplamiento magnetosfera-ionosfera, y con la producción y pérdida de iones y electrones en los anillos de radiación.

4. VIENTO SOLAR Y CAMPO INTERPLANETARIO

Las erupciones solares, gracias de nuevo a las misiones espaciales, se están pudiendo seguir hoy en día a través de todo su recorrido, desde la eyección de masa coronal (CME) en el Sol a través del espacio interplanetario, hasta que golpea la magnetosfera terrestre, causando las tempestades geomagnéticas y las auroras. Con el coronógrafo instalado en el SOHO se visualizan las CMEs. Con otros instrumentos a bordo del propio SOHO, del ACE o del WIND se miden las propiedades del plasma del viento solar; por ejemplo, la velocidad de su flujo, su dirección y la distribución de las energías de los electrones e iones positivos. Receptores de ondas de radio monitorizan las emisiones del Sol y del plasma espacial y diversos magnetómetros miden el campo magnético interplanetario hasta 44 veces por segundo.

Los grupos punteros en estos campos (como el *Goddard Space Flight Center* de la NASA o el *Center for Integrated Space Weather Modeling*, que integra diversos grupos de investigación norteamericanos, incluyendo ocho universidades y organizaciones como el NOAA) se dedican a ensamblar toda esa información para configurar la anatomía de determinados eventos, desde el principio hasta el fin (Baker et al., 2007). Ello incluye su estructura y evolución tridimensional y cómo modifican el estado de la magnetosfera.

En el campo de la predicción es dónde mayores esfuerzos y recursos se están destinando últimamente, dentro del ámbito general de lo que se conoce como la meteorología espacial (*Space Weather*) que engloba el estudio de las condiciones en el espacio que puedan afectar a la actividad humana (National Academy of

Sciences, 2008). Se han desarrollado diferentes servicios de alertas geomagnéticas y predicciones de actividad solar dirigidas a una amalgama de usuarios potenciales.

En España existen trabajos en magnetismo solar por parte de astrofísicos del Instituto de Astrofísica de Canarias (Sánchez Almeida, 2009) y de meteorología espacial por parte del Grupo de Investigación Espacial de la Universidad de Alcalá (Saiz et al., 2008) y del Departamento de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Barcelona (Aran et al., 2008). También en el ámbito de la física solar-terrestre, el Observatorio del Ebro siempre ha tenido una gran tradición en el estudio de las perturbaciones del campo geomagnético debidas a la actividad solar (Curto et al, 2007a). En la época reciente se ha trabajado, entre otros, en los efectos magnéticos de las fulguraciones solares (Gaya-Piqué et al., 2008) y de los eclipses (Curto et al, 2006).

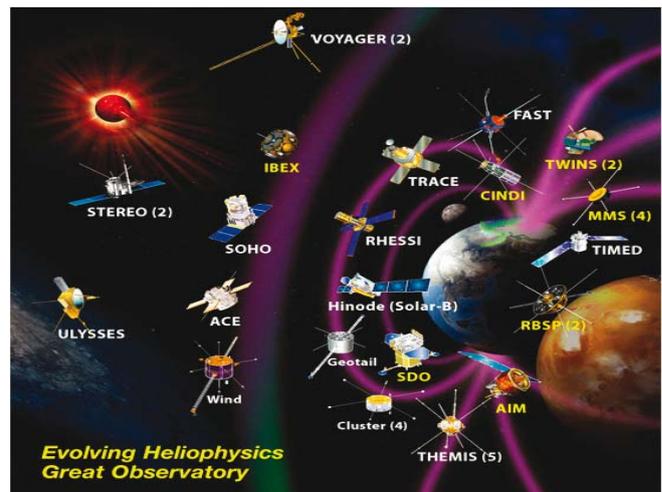


Figura 3 – Misiones espaciales que registran datos heliofísicos (extraída de <http://www.nap.edu/catalog/12507.html>)

5. OBSERVATORIOS GEOMAGNÉTICOS, LEVANTAMIENTOS Y ANÁLISIS

5.1 Observatorios geomagnéticos, instrumentos y estándares:

Uno de los logros a destacar en el ámbito general de la instrumentación geomagnética es la creación a principios de la década de los noventa de la red INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org/>), que agrupa buena parte de los observatorios magnéticos con registro digital, con el objeto de facilitar el intercambio de datos en tiempo real o casi real. Ello, además, está facilitando la adopción de estándares modernos para la instrumentación.

Los sensores de los variómetros digitales modernos se basan bien en magnetómetros de núcleo saturado (*fluxgates*), preferiblemente suspendidos, o bien en magnetómetros escalares rodeados por bobinas de Helmholtz (magnetómetro vector). Por lo que respecta a las mediciones absolutas, éstas vienen realizándose mediante magnetómetros de protones para el campo total y mediante teodolitos amagnéticos con un sensor fluxgate montado sobre su telescopio para la medida de los elementos angulares (*DI-flux*). De las intercomparaciones de instrumentos que se realizan en los *Workshops* que se organizan cada dos años sobre observatorios magnéticos (el último se celebró en 2008 en Boulder, Colorado, USA), podemos concluir que los mejores *DI-flux* permiten medir con precisiones de unos pocos segundos de arco, mientras que la de los magnetómetros protones es de unas pocas décimas de nanoTesla.

Es obvia la irregular distribución de observatorios, estando su densidad claramente correlacionada con la distribución de continentes y océanos, pero apreciándose asimismo una asimetría Norte-Sur, indicando una influencia económica. Con el objeto de mejorar su cobertura global han apareciendo diversas iniciativas



(p.e. (De Santis et al., 2006; Toh et al., 2006)) para emplazar instrumentos en el fondo marino. Ello unido al despliegue de estaciones automáticas en islas remotas puede ayudar a mejorar esa cobertura. Pero no se ha descubierto la estación automática perfectamente estable, con lo que seguimos necesitando visitar a menudo los emplazamientos para realizar medidas absolutas. Se están investigando soluciones, como el prototipo del laboratorio del Observatorio de Dourbes en Bélgica, mediante el uso de un *DI-flux* automático (Van Loo and Rasson, 2006; 2007), o el dispositivo que se está ensayando en el de Niemegk en Alemania, basado en la rotación de un magnetómetro *fluxgate* de tres componentes alrededor de ejes monitorizados con precisión (Auster et al., 2007).



Figura 4 – Magnetómetro triaxial suspendido, basado en sensores fluxgate, en operación en el observatorio de la Isla Livingston.

En España están funcionando actualmente cuatro observatorios geomagnéticos (todos ellos con los estándares antes mencionados): San Pablo de los Montes (Toledo) y Güimar (Tenerife) por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), San Fernando (Cádiz) por el Real Observatorio de la Armada (ROA), y el Observatorio del Ebro en Roquetes (Tarragona) por una Fundación multi-institucional de carácter científico con su mismo nombre. Este último, desde 1996, se ocupa también del mantenimiento de un observatorio en la Isla Livingston, en la Base Antártica Española. La operación de la red de estaciones seculares y la elaboración de las cartas magnéticas nacionales corre a cargo del IGN.

Nuestros observatorios no han estado exentos de la progresiva contaminación provocada por el crecimiento urbano y la electrificación de las líneas ferroviarias. Ello ha ocasionado muchos problemas en todos ellos, obligando hace ya bastantes años a cerrar algunos y a trasladar el resto. Tras los traslados de Toledo a San Pablo y de Las Mesas a Güimar, el año 2002 el Observatorio del Ebro, con el soporte del IGN, empezó a operar una nueva estación automática en Horta de Sant Joan (a unos 20 Km en línea recta del Observatorio), aunque numerosos problemas técnicos no han permitido un registro continuo hasta estos momentos; y en San Fernando, tras haberlo trasladado ya 8 Km a finales de los setenta, en 2004 efectuaron un nuevo traslado, situando el nuevo observatorio a casi 60 Km al NE de San Fernando.

5.2 Campañas mediante satélites artificiales: A pesar de que desde la época de los Sputnik ya se empezaron a poner magnetómetros en ciertos satélites artificiales, hasta el Magsat (1979-1980) no tuvimos la precisión necesaria en la medida de la

dirección del campo para producir datos vectoriales de suficiente calidad para la modelización global del campo geomagnético; y no la volvimos a tener hasta el 1999 cuando se lanzó el Oersted.

A finales de los 90, ante el anuncio del lanzamiento de hasta tres satélites (el mencionado Oersted, el SAC-C y el CHAMP) que estuvieran operacionales el tiempo suficiente para proporcionar información acerca de los procesos en el núcleo y de las interacciones Sol-Tierra, se decidió establecer una Década para la Investigación Geopotencial. El solapamiento de todas esas misiones no sólo ha permitido analizar el campo interno, su variación secular y los campos de origen externo con una precisión y extensión hasta el momento inéditas (un resumen de esos avances puede encontrarse en (Friis-Christensen et al., 2009)), sino que, además, se ha demostrando cómo la interpretación conjunta de datos de más de un satélite proporciona una mejor corrección para los campos magnetosféricos, cuando estos son considerados como ruido, al tratar de aislar la contribución nuclear o litosférica (Olsen et al., 2006).

Los nuevos datos, el desarrollo de la teoría asociada, y los esfuerzos en mejorar la modelización, han conducido al descubrimiento de procesos inéditos, o que sólo se han podido detectar gracias a las señales magnéticas que pueden ser observadas por satélites. Ello incluye las ya mencionadas mareas oceánicas (Kuvshinov, 2008), corrientes ionosféricas de origen gravitatorio (Maus and Lühr, 2006), campos magnéticos asociados con regiones de plasmas densos (Lühr et al., 2003), irregularidades en la ionosfera ecuatorial (Stolle et al., 2006), o la detección de capas magnetizadas en el manto superior sobre determinadas zonas de subducción (Blakely et al., 2005).

5.3 Datos, índices y aplicaciones: El *Working Group* con este título se ocupa de establecer los estándares y los formatos para la diseminación de los datos, de la producción de los índices geomagnéticos, y de la búsqueda de aplicaciones para agencias o fines industriales de esos datos e índices, lo que entronca en gran medida de nuevo con el *Space Weather*.

Las necesidades actuales exigen que esa información aparezca en tiempo real o casi real, de manera que la preparación y la definición de muchos de esos índices se ha tenido que replantear (p.e. Curto et al., 2007b). Para un determinado índice, generalmente existe un compromiso entre rapidez en el suministro del mismo y precisión, de manera que una de las preocupaciones de los grupos que nos ocupamos de la preparación de estos índices o listas de eventos es averiguar si los que se están actualmente produciendo realmente se ajustan a las necesidades de los usuarios potenciales. En este sentido, están apareciendo nuevos índices para, por ejemplo, separar el índice *Dst* en sus partes externa e interna (Maus and Weidelt, 2004), caracterizar la actividad geomagnética polar resultante de las interacciones viento solar-magnetosfera (Stauning et al., 2008), u obtener una extensión temporal más larga que la proporcionada por el índice *aa*, para estudios de tendencias a largo término (Martini et al., 2009).

5.4 Análisis global y regional del campo geomagnético y su variación secular: El *Working Group* dedicado a la modelización tiene como principal cometido el generar cada aproximadamente cinco años el modelo de campo geomagnético internacional de referencia o IGRF (Macmillan and Maus, 2005). También da cabida a los que nos dedicamos al análisis regional, y mantiene un catálogo sobre los servicios magnéticos globales y regionales, y los distintos modelos y cartas.

Los modelos que están apareciendo últimamente (Lesur et al., 2008) son definitivamente más precisos, no sólo por poder disponer de datos de satélite con cobertura global, sino también por el hecho de tener acceso a todos los datos de muchos de los observatorios con relativa facilidad y premura. Ello permite seleccionar los periodos de mayor calma magnética, evitando la tradicional costumbre de utilizar medias anuales o mensuales de todos los días y horas, que están todavía moduladas por variaciones estacionales y undecenales de origen externo y, por tanto, adulterando cualquier análisis del campo nuclear.



La iniciativa reciente más ambiciosa, impulsada hace una década por el *Goddard Space Flight Center*, para modelar campos debidos no sólo a las fuentes del núcleo terrestre sino también a las de la litosfera hasta un determinado grado y orden, a las ionosféricas en días de calma y a las magnetosféricas, se conoce como el modelo integral (o completo) del campo magnético próximo a la Tierra (*Comprehensive model*). Se trata de coestimar a la vez los campos de todas esas fuentes, en cada caso utilizando las funciones base y las longitudes de las expansiones en serie más adecuadas. De esta manera, la última versión (Sabaka et al., 2004) utiliza más de dos millones de datos, incluyendo los de los satélites POGO, MAGSAT, Oersted y Champ y valores medios horarios y anuales de observatorios magnéticos, resultando en más de 25000 parámetros. Ello se traduce en ajustes generalmente superiores a cualquier modelo previo y una separación de los campos aparentemente razonable o realista.

5.5 Análisis de anomalías magnéticas: Para el análisis de las anomalías magnéticas en escalas continentales u oceánicas, han sido y están siendo fundamentales de nuevo los datos de satélite (especialmente cuando las órbitas son de baja altura, como las que ha proporcionado el CHAMP durante los últimos años de operación), generando modelos para la definición precisa de las anomalías litosféricas de larga y media longitud de onda, mediante expansiones en armónicos esféricos que, por ejemplo, en el de Maus et al. (2007) van del grado 16 al 100. Cuando estos se combinan con datos aéreos y marinos se llega hasta expansiones de grado 720 (Maus, 2008). Para estudios de más detalle están resultando igualmente de gran utilidad las compilaciones recientes de levantamientos magnéticos aéreos y marinos, que empezaron a nivel regional del Atlántico (Verhoef et al., 1996) o de la Antártida (Kim et al., 2007), y que están culminando con un ingente proyecto a nivel global, el *World digital Magnetic Anomaly Map* (WMAM, Korhonen et al., 2007).

Los grupos españoles dedicados a la realización de levantamientos magnéticos y al análisis de los datos de anomalías magnéticas derivados de los mismos van desde el Servicio de Geomagnetismo del IGN, responsable por tanto de la realización de los mapas en el territorio nacional (su última publicación ha sido el mapa geomagnético de España para la época 2005.0, (Instituto Geográfico Nacional, 2006), a los grupos dedicados a la geofísica marina, como el ROA, que tiene encargada la cartografía de la Zona Económica Exclusiva (Grupo de Trabajo ZEE, 2006) y extienden sus actividades a levantamientos magnéticos en la Antártica o el Caribe, y ha participado también recientemente en la compilación de las anomalías marinas para el WMAM (Quesnel et al., 2007). Asimismo, desde el MNCN y la Universidad de Burgos, se están desarrollando análisis y modelizaciones de anomalías magnéticas aplicadas al estudio de la corteza en áreas con presencia de volcanismo activo, bien en Canarias (García et al, 2007, Blanco-Montenegro et al., 2008) o en las Islas Eólicas (Blanco-Montenegro et al., 2007).

6. LÍNEAS DE EVOLUCIÓN

El Geomagnetismo, una de las disciplinas científicas que emergieron desde más antiguo, sigue en constante evolución, aprovechando los avances en las técnicas de computación, las nuevas posibilidades de la exploración espacial o los desarrollos instrumentales. Hemos visto, por ejemplo, que las simulaciones recientes de la dinámica del núcleo terrestre suponen un avance realmente espectacular en un tema que, el propio Einstein, consideraba uno de los problemas más importantes no resueltos de la Física. Otros ejemplos, de cómo se prevé que puedan evolucionar algunas de las diferentes subdisciplinas mencionadas en el texto, se resumen a continuación.

El futuro de la Física Solar-Terrestre pasa indudablemente por atender a la importancia que está representando la predicción de los efectos derivados de la actividad solar. Cuando se empezó a trabajar en este campo, se asumía que cuando sucedía una eyección de masa en el Sol, debería aparecer con toda probabilidad una

perturbación magnética en la Tierra al cabo de determinadas horas o días. Hoy en día sabemos que eso no es siempre así, sino que dependiendo de cómo los campos magnéticos de las nubes de plasma están orientados determina si tendrá lugar el fenómeno de la reconexión magnética o no. De esta forma, para saber qué ocurrirá en la Tierra debemos saber no sólo qué ocurrió en el Sol sino también la naturaleza de los campos que viajan con el viento solar. Por tanto el futuro pasa por ubicar más satélites entre el Sol y la Tierra.

Las investigaciones para mejorar esas predicciones se mueven en dos áreas mayoritarias. Por un lado, en tratar de refinar la correlación entre los fenómenos o síntomas observables con los efectos en la Tierra, puesto que, en general, todavía no se puede predecir esos efectos con la precisión que se desearía. Por el otro lado, en la construcción de un modelo completo del medio solar-terrestre. Esta modelización, como la de la dinámica del núcleo de la Tierra y la generación del campo geomagnético, es un problema muy complejo puesto que la física del mismo incluye no sólo la dinámica de fluidos sino también las ecuaciones de Maxwell. Además, el problema incluye tres dominios diferentes, es decir, el Sol, el medio interplanetario y la magnetosfera, con sus numerosas regiones y sistemas de corriente. Esos dominios no están en absoluto separados, y cualquier cambio en uno de ellos puede tener consecuencias en la Tierra.

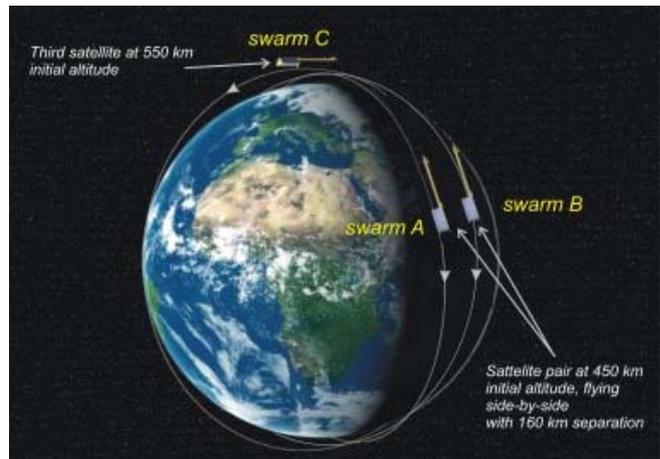


Figura 5 – Constelación de satélites para la misión SWARM (Friis-Christensen et al., 2009)

Por lo que respecta a la instrumentación, se está deseando que el automatismo prometido para los *DI-flux* se haga realidad. Ello comportaría que los observatorios magnéticos pudiesen trabajar de manera completamente automática. En cuanto a las observaciones en el fondo marino donde, debido a la opacidad del agua salada, no pueden usarse métodos astronómicos o mediante satélites para determinar el Norte geográfico. Para ello deberán incorporarse sensores de la rotación de la Tierra mediante giroscopios. Mientras que, para el *DI-flux* automático ya se han podido construir decodificadores de ángulos y motores paso a paso completamente amagnéticos, los giroscopios todavía no lo son hoy en día. Resultaría asimismo interesante la instalación de instrumentos con *fluxgates* triaxiales perfectamente acoplados con cámaras de seguimiento estelar, lo que proporcionaría una alternativa a considerar para la automatización de observatorios con una buena proporción de noches despejadas.

Un punto de intenso debate en la actualidad es el relacionado con la recomendación de que los observatorios produzcan datos de calidad a una frecuencia de muestreo de 1 segundo. Al menos, de la misma calidad que las cadenas de magnetómetros ya existentes para el estudio de variaciones rápidas de origen externo, que permitirían la sincronización con los satélites de las nuevas misiones espaciales, determinadas aplicaciones para el *space weather*, o la derivación de mejores índices geomagnéticos. Con la



precisión temporal de los actuales observatorios, por ejemplo, el comienzo brusco de una tempestad magnética no se registra de manera perfectamente simultánea. Así pues, se está recomendando una precisión temporal de 10 ms y una resolución de 10 pT, lo cual no está exento de numerosas dificultades pues al retardo en la respuesta del magnetómetro, hay que sumar la del conversor A/D y la del sistema de adquisición de datos.

Finalmente, el progreso en la exploración del campo geomagnético desde el espacio deberá venir no sólo de la obtención de más y mejores datos, sino también del refinamiento de los métodos de análisis y modelización. Así, una de las limitaciones de los modelos como el *Comprehensive Model* es que son estacionarios, es decir, no tienen en cuenta, por ejemplo, la variabilidad día a día de las corrientes ionosféricas. La obtención un modelo "dinámico" sería sólo posible si dispusiéramos de mediciones simultáneas (en Tierra y en el espacio) en distintos emplazamientos. La monitorización multipunto en el espacio más próximo es pues imprescindible si se quieren separar con precisión las variaciones espaciales de la temporales y sacar verdadero partido de la precisión con la que se puede medir hoy en día el campo geomagnético (Olsen et al., 2002). Ello va a conseguirse a partir del 2011, cuando está previsto el lanzamiento de la misión SWARM de la ESA, basada en una constelación de tres satélites que deberán proporcionar medidas en dos diferentes planos orbitales, entre 400 y 550 km de altitud (Friis-Christensen et al., 2009), por lo que la continuidad de esas medidas de satélite, incluso mejores que las que hemos tenido en esta última década, están garantizadas.

7. AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a los miembros de la Sección de Geomagnetismo de la Comisión Española de Geodesia y Geofísica el haber facilitado los datos de sus actividades recientes y su producción científica, a partir de los cuales se ha elaborado parte de este artículo. Asimismo, Isabel Blanco, Manuel Calvo y María Luisa Osete contribuyeron en lo que respecta al apartado que hace referencia a las actividades españolas en el ámbito del paleomagnetismo y el magnetismo de las rocas.

8. REFERENCIAS

- Acuña, M.H., et al., Global Distribution of Crustal Magnetization Discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment. *Science*, 284, 790-793, 1999.
- Anderson, B.J., M.H. Acuña, H. Korth, M.E. Purucker, C.L. Johnson, J.A. Slavin, S.C. Solomon and R.L. McNutt, The structure of Mercury's magnetic field from MESSENGER's first flyby. *Science*, 321, 82–85, 2008.
- Aran, A., B. Sanahuja and D. Lario, Comparing proton fluxes of central meridian SEP events with those predicted by SOLPENCO. *Advances in Space Research*, 42, 9, 1492-1499, 2008.
- Arkani-Hamed, J., An improved 50-degree spherical harmonic model of the magnetic field of Mars derived from both high-altitude and low-altitude data, *Journal of Geophysical Research*, 107, 13-1, 13-8, 2002.
- Arkani-Hamed, J., Magnetic Field of Mars. In: Gubbins, D. and E. Herrero-Bervera, Eds., *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, 502-505. Springer, 2007.
- Auster, H.U., M. Manda, A. Hemshorn, E. Pulz and M. Korte, Automation of absolute measurement of the geomagnetic field, *Earth Planets Space*, 59, 1007–1014, 2007.
- Baker, D.N., R.L. McPherron and M.W. Dunlop, Cluster observations of magnetospheric substorm behavior in the near- and mid-tail region, *Advances in Space Research*, 36, 1809-1817, 2005.
- Baker, D.N., M.J. Wiltberger, R.S. Weigel and S.R. Elkington, Present status and future challenges of modeling the Sun–Earth end-to-end system, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69, 3–17, 2007.
- Bard, E. and M. Delaygue, Comment on "Are there connections between Earth's magnetic field and climate?" by Courtillot, V., Gallet, Y., LeMouél, J.-L., Fluteau, F., and Genevey, A. *EPSL* 253, 328–339, 2007, *Earth and Planetary Science Letters*, 265, 302–307, 2008.
- Blakely, R.J., T.M. Brocher and R.E. Wells, Subduction-zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle, *Geology*, 33, 445–448, 2005.
- Blanco-Montenegro, I., I. Nicolosi, A. Pignatelli, et al., Magnetic imaging of the feeding system of oceanic volcanic islands: El Hierro (Canary Islands), *Geophysical Journal International*, 173, 339-350, 2008.
- Blanco-Montenegro, I., R. De Ritis and M. Chiappini, Imaging and modelling the subsurface structure of volcanic calderas with high-resolution aeromagnetic data at Vulcano (Aeolian Islands, Italy), *Bulletin of Volcanology*, 69, 643-659, 2007.
- Christensen, U.R. and J. Wicht, Numerical dynamo simulations. In: G. Schubert (editor-in-chief), *Treatise on Geophysics*, Vol. 8, Elsevier (Amsterdam), p. 245–282, 2007.
- Christensen, U.R., D. Schmitt and M. Rempel, Planetary Dynamos from a Solar Perspective, *Space Science Reviews*, 144, 105–126, 2009.
- Constable, C. and M. Korte, Is Earth's magnetic field reversing?, *Earth and Planetary Science Letters* 246, 1–16, 2006.
- Courtillot, V., Y. Gallet, J.-L. LeMouél, F. Fluteau and A. Genevey, Are there connections between Earth's magnetic field and climate?, *Earth and Planetary Science Letters*, 253, 328–339, 2007.
- Courtillot, V., Y. Gallet, J.-L. LeMouél, F. Fluteau and A. Genevey, Response to comment on "Are there connections between Earth's magnetic field and climate?" *EPSL* 253, 328–339, 2007 by Bard, E. and Delaygue, M., *Earth and Planetary Science Letters*, 265, 308–311, 2008.
- Curto, J.J., B., Heilig and M. Piñol, Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August, 1999. *Journal of Geophysical Research*, 111, A07312, doi:10.1029/2005JA011499, 2006.
- Curto, J.J., J.O. Cardús, L.F. Alberca and E. Blanch, Milestones of the IAGA International Service of Rapid Magnetic Variations and its contribution to geomagnetic field knowledge, *Earth, Planets and Space*, 59, 463-471, 2007a.
- Curto, J.J., T. Araki and L.F. Alberca, Evolution of the concept of Sudden Storm Commencements and its operative identification, *Earth Planets and Space*, 59, i-xii, 2007b.
- De Santis, A., How persistent is the present trend of the geomagnetic field to decay and, possibly, to reverse?, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 162, 217–226, 2007.
- De Santis, A., D. Dimauro, L. Cafarella, R. D'anna, L.R. Gaya-Pique, P. Palangio, G. Romeo and R. Tozzi, Deep seafloor magnetic observations under GEOSTAR project, *Annals of Geophysics*, 49 (2/3), 681-693, 2006.
- Donadini, F., M. Korte and C.G. Constable, Geomagnetic field for 0–3 ka: 1. New data sets for global modeling, *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, 10, Q06007, doi:10.1029/2008GC002295, 2009.
- Dunlop, M., Co-ordinated, multi-scale studies of dayside reconnection and the magnetopause boundary layer, IUGG XXIV General Assembly Abstracts Book, 3101, 2007.
- Falgás, E., J.J. Ledo, T. Teixidó, A. Gabàs, F. Ribera, C. Arango, P. Queralt, J.L. Plata, F. Rubio, J. A. Peña, A. Martí and A. Marcuello, Geophysical characterization of a Mediterranean coastal aquifer: Baixa Tordera fluvial deltaic aquifer unit, *Groundwater and saline intrusion*, 15, 395-404, 2005.
- Fischbach, E., H. Kloor, R.A. Langel, A.T.Y. Lui and M. Peredo, New geomagnetic limits on the photon mass and on long-range forces coexisting with electromagnetism, *Physical Review Letters*, 73, 514–517, 1994.
- Friis-Christensen, E., H. Lüher, G. Hulot, R. Haagmans and M. Purucker, Geomagnetic Research from Space, *Eos*, 90, 25, 213-215, 2009.
- García, A., I. Blanco, J.M. Torta, M. Astiz, J. Ibáñez and R. Ortiz, A search for the volcanomagnetic signal at Deception Volcano (South Shetland I., Antarctica), *Annali di Geofisica*, Vol. XL, N.2, 341-359, 1997.
- García, A., M. Chiappini, I. Blanco-Montenegro, et al., High resolution aeromagnetic anomaly map of Tenerife, Canary Islands, *Annals of Geophysics*, 50, 689-697, 2007.
- Gaya-Piqué, L.R., J.J. Curto, J.M. Torta and A. Chulliat, Equivalent ionospheric currents for the 5 December 2006 solar flare effect determined from Spherical Cap Harmonic Analysis, *Journal of Geophysical Research*, 113, A07304, doi: 10.1029/2007JA012934, 2008.
- Glatzmaier, G.A. and P.H. Roberts, A Three-Dimensional Self-Consistent Computer Simulation of a Geomagnetic Field Reversal, *Nature*, 377, 203-209, 1995.
- Goldstein, J., Plasma coupling in the inner magnetosphere, IUGG XXIV General Assembly Abstracts Book, 3104, 2007.
- Grupo de Trabajo ZEE, Mapa General de Anomalías Magnéticas. Islas Canarias. (1:500.000), Edited by Ministerio de Defensa – Real Instituto y Observatorio de la Armada. N.I.P.O.: 076-04-150-5, 2006.



- Gubbins, D., A.L. Jones and C.C. Finlay, Fall in Earth's magnetic field is erratic. *Science*, 312, 900–902, 2006.
- Instituto Geográfico Nacional, Mapa Geomagnético de España. Época 2005.0, 2006.
- Kim, H.R., R.R.B. von Frese, P.T. Taylor, A.V. Golynsky, L.R. Gayá-Piqué and Ferraccioli, F., Improved magnetic anomalies of the Antarctic lithosphere from satellite and near-surface data. *Geophysical Journal International*, 171, 119–126, 2007.
- Korhonen, J. V., J.D. Fairhead, M. Hamoudi, K. Hemant, V. Lesur, M. Manda, S. Maus, M. Purucker, D. Ravat, T. Sazonova and E. Thébault, Magnetic Anomaly Map of the World; Map published by Commission for Geological Map of the World, supported by UNESCO, 1st Edition, GTK, Helsinki, ISBN 978-952-217-000-2, 2007.
- Korte, M., F. Donadini and C.G. Constable, Geomagnetic field for 0–3 ka: 2. A new series of time-varying global models, *Geochemistry, Geophysics, and Geosystems*, 10, Q06008, doi:10.1029/2008GC002297, 2009.
- Kuvshinov, A.V., 3-D Global Induction in the Oceans and Solid Earth: Recent Progress in Modeling Magnetic and Electric Fields from Sources of Magnetospheric, Ionospheric and Oceanic Origin. *Surveys in Geophysics*, 29, 139–186, 2008.
- Kuvshinov, A.V., A. Junge and H. Utada, 3-D modelling the electric field due to ocean tidal flow and comparison with observations, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2005GL025043, 2006.
- Langlais, B. and Y. Quesnel, New perspectives on Mars' crustal magnetic field, *Comptes Rendus Geoscience*, 340, 791–800, 2008.
- Langlais, B., M. Purucker and M. Manda, Crustal magnetic field of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 109, doi: 10.1029/2003JE002048, 2004.
- Ledo, J. and A.G. Jones, Temperature of the upper mantle beneath the Intermontane Belt, northern Canadian Cordillera, determined from combining mineral composition, electrical conductivity laboratory studies and magnetotelluric field observations, *Earth and Planetary Science Letters*, 236, 258–268, 2005.
- Leonhardt, R. and K. Fabian, Paleomagnetic reconstruction of the global geomagnetic field evolution during the Matuyama/Brunhes transition: iterative Bayesian inversion and independent verification, *Earth and Planetary Science Letters*, 253, 172–195, 2007.
- Lesur, V., I. Wardinski, M. Rother and M. Manda, GRIMM: the GFZ Reference Internal Magnetic Model based on vector satellite and observatory data, *Geophysical Journal International*, 173, 2, 382–394, 2008.
- Lühr, H., M. Rother, S. Maus, W. Mai and D. Cooke, The diamagnetic effect of the equatorial Appleton anomaly: Its characteristics and impact on geomagnetic field modeling, *Geophysical Research Letters*, 30(17), 1906, doi:10.1029/2003GL017407, 2003.
- Lund, S., J.S. Stoner, J.E.T. Channell and G. Acton, A summary of Brunhes paleomagnetic field variability recorded in Ocean Drilling Program cores, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 156, 194–204, 2006.
- Macmillan, S. and S. Maus, International Geomagnetic Reference Field – the tenth generation, *Earth, Planets and Space* 57, 1135–1140, 2005.
- Maher, B.A., Environmental magnetism and climate change, *Contemporary Physics*, 48, 247–274, 2007.
- Manoj, C., A.V. Kuvshinov, S. Maus and H. Lühr, Ocean circulation generated magnetic signals, *Earth, Planets and Space*, 58, 429–437, 2006a.
- Manoj, C., S. Neetu, A.V. Kuvshinov and T. Harinarayana, Magnetic fields, generated by the Indian ocean Tsunami. In: *Proceedings of the first swarm international science meeting*, Nantes, France, 2006b.
- Marcuello, A., P. Queralt and J. Ledo, Applications of dispersion relations to the geomagnetic transfer function, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150, 85–91, 2005.
- Martí, A., P. Queralt, A.G. Jones and J.J. Ledo, Improving Bahr's invariant parameters using the WAL approach, *Geophysical Journal International*, 163 38–41, 2005.
- Martini, D., K. Mursula and S. Alex, The new digital A(h) index of geomagnetic activity at Alibag and other stations, *Current Science*, 96, 280–283, 2009.
- Maus, S., The geomagnetic power spectrum, *Geophysical Journal International*, 174, 135–142, 2008.
- Maus, S. and H. Lühr, A gravity- driven electric current in the Earth's ionosphere identified in CHAMP satellite magnetic measurements, *Geophysical Research Letters*, 33, L02812, doi:10.1029/2005GL024436, 2006.
- Maus, S., H. Lühr, M. Rother, K. Hemant, G. Balasis, P. Ritter and C. Stolle, Fifth generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite measurements, *Geochemistry, Geophysics, and Geosystems*, 8, Q05013, doi:10.1029/2006GC001521, 2007.
- Maus, S. and P. Weidelt, Separating the magnetospheric disturbance magnetic field into external and transient internal contributions using a 1D conductivity model of the Earth, *Geophysical Research Letters*, 31, L12614, doi:10.1029/2004GL020232, 2004.
- Merrill, R.T. and P.L. McFadden, Paleomagnetism. In Gubbins, D. and Herrero-Bervera, E., Eds., *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, 776–780. Springer, 2007.
- Nakamura, R., Dynamics of the magnetotail, IUGG XXIV General Assembly Abstracts Book, 3102, 2007.
- National Academy of Sciences, Severe Space Weather Events—Understanding Societal and Economic Impacts Workshop Report, [http://www.nap.edu/catalog/12507.html], 2008.
- Olsen, N., E. Friis-Christensen and T. Moretto, New Approaches to Explore the Earth's Magnetic Field, *Journal of Geodynamics*, 33, 29–41, 2002.
- Olsen, N., H. Lühr, T. J. Sabaka, M. Manda, M. Rother, L. Tøffner-Clausen and S. Choi, CHAOS - a model of Earth's magnetic field derived from CHAMP, Ørsted, and SAC-C magnetic satellite data. *Geophysical Journal International*, 166, 67–75, 2006.
- Pavón-Carrasco, F.J., M.L. Osete, J.M. Torta and L.R. Gayá-Piqué, A regional archeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3K: Applications to archeomagnetic dating, *Geochemistry, Geophysics, and Geosystems*, 10, Q03013, doi:10.1029/2008GC002244, 2009.
- Pellerin, L., Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations, *Surveys in Geophysics*, 23, 101–132, 2002.
- Pedreira, A., J. Galindo-Zaldívar, A. Ruiz-Constan, et al., Recent large fold nucleation in the upper crust: Insight from gravity, magnetic, magnetotelluric and seismicity data (Sierra de Los Filabres-Sierra de Las Estancias, Internal Zones, Betic Cordillera), *Tectonophysics*, 463, 1–4, 145–160, 2009.
- Pisarevsky, S., *Geomagnetism and Paleomagnetism: New Edition of the Global Paleomagnetic Database*, *Eos Transactions AGU*, 86(17), 2005.
- Roberts, P.H. and G. A. Glatzmaier, A test of the frozen-flux approximation using a new geodynamo model, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 1109–1121, 2000.
- Quesnel, Y., M. Catalán and T. Ishihara, A new global marine magnetic anomaly data set, *Journal of Geophysical Research*, 114, B04106, doi:10.1029/2008JB006144, 2009.
- Sabaka, T.J., N. Olsen and M. Purucker, Extending comprehensive models of the Earth's magnetic field with Ørsted and CHAMP data, *Geophysical Journal International*, 159, 521–547, doi: 10.1111/j.1365–246X.2004.02421.x, 2004.
- Saiz, E., C. Cid and Y. Cerrato, Forecasting intense geomagnetic activity using interplanetary magnetic field data, *Annales Geophysicae*, 26, 12, 3989–3998, 2008.
- Sánchez, N., A. García, S. Marsal, M. Tárraga, B.J. Casas and F. García, Red Volcanomagnética del Teide-VOLMAGTEGETEIDE. *Proceedings of the 5ª Asamblea Hispano-Lusa de Geodesia y Geofísica. Sesión Geomagnetismo y Aeronomía*. Public. Electr. Ministerio de Medio Ambiente, ISBN: 84-8320-373-1, 2006.
- Sánchez Almeida, J., The dynamic magnetic quiet Sun: physical mechanisms and UV signature, *Astrophysics and Space Science*, 320, 1–3, 121–127, 2009.
- Slater, L., Near Surface Electrical Characterization of Hydraulic Conductivity: From Petrophysical Properties to Aquifer Geometries—A Review, *Surveys in Geophysics*, 28, 169–197, 2007.
- Stauning, P., O. Troshichev and A. Janzhura, The Polar Cap (PC) indices: Relations to solar wind parameters and global magnetic activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, 2246–2261, 2008.
- Stolle, C., H. Lühr, M. Rother and G. Balasis, Magnetic signatures of equatorial spread *F* as observed by the CHAMP satellite, *Journal of Geophysical Research*, 111, A02304, doi:10.1029/2005JA011184, 2006.
- Tezkan, B., A review of environmental applications of quasi-stationary electromagnetic techniques, *Surveys in Geophysics*, 20, 279–308, 1999.
- Toh, H., Y. Hamano and M. Ichiki, Long-term seafloor geomagnetic station in the northwest Pacific: A possible candidate for a seafloor geomagnetic observatory, *Earth, Planets and Space*, 58, 697–705, 2006.
- Torta, J.M., Una Visión sobre el Estado Actual de la Investigación en Geomagnetismo, *Revista Española de Física*, 17, 6, 47–51, 2003.
- Tyler R.H., A simple formula for estimating the magnetic fields generated by tsunami flow. *Geophysical Research Letters*, 32, L09608, doi:10.1029/2005GL022429, 2005.



- Uyeshima, M., EM Monitoring of Crustal Processes Including the Use of the Network-MT Observations, *Surveys Geophys.*, 28, 199–237, 2007.
- Van Loo, S.A. and J.L. Rasson, Development of an automatic DI-Magnetometer. In: *Geomagnetics for Aeronautical Safety: a Case Study in and Around the Balkans*, edited by J.L. Rasson and T. Delipetrov (NATO Science Series Publication), pp. 177-186, 2006.
- Van Loo, S.A. and J.L. Rasson, Presentation of the Prototype of an Automated DIFlux. Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, C-99 (398), 2007.
- Vassiliadis, D., I.R. Mann, S.F. Fung and X. Shao, Ground Pc3–Pc5 wave power distribution and response to solar wind velocity variations, *Planetary and Space Science*, 55, 6, 743-754, 2007.
- Verhoef, J., W.R. Roest, R. Macnab, J. Arkani-Hamed and Members of the Project Team, *Magnetic Anomalies of the Arctic and North Atlantic Oceans and Adjacent Land Areas, VOL II: Data processing and merging*, Geol. Survey of Canada, Open file Rep. 3125b, 1996.



Observatori
de
l'Ebre



Universitat Ramon Llull



CSIC