

Geomagnetismo y Cartografía: la Declinación Magnética ¹

1. Introducción

Una de las propiedades físicas de la Tierra que interesa a la Cartografía es su magnetismo (Geomagnetismo). Y es que la Tierra se comporta como un gigantesco imán cuyo eje sigue la línea que une los polos magnéticos norte y sur. Ambos puntos no coinciden con los polos geográficos, por lo que según la localización en que nos encontremos, variará el ángulo que forma la alineación de la aguja imantada de una brújula con la vertical al polo geográfico, dando lugar al fenómeno de la *Declinación Magnética*. Su conocimiento es fundamental, por tanto, para la navegación marítima y aérea, debiéndose confeccionar mapas magnéticos (isogónicos², isodinámicos³ e isóclinos⁴) para resolver los problemas de dirección sobre el globo que se crean. Pero, en los desplazamientos terrestres, en itinerarios a pie, o cuando una persona se quiere orientar en el campo respecto a los puntos cardinales es también imprescindible conocer esa declinación.

Igualmente, el magnetismo terrestre se orienta con diferente *Inclinación* con respecto a la horizontal, lo que nos indica la existencia de otro foco magnético en el interior de la Tierra. Expresado de una manera vulgar pero sencilla, es como si a su vez la aguja de la brújula tendiera a “inclinarse” hacia el suelo con un ángulo determinado.

Por otro lado, la fuerza magnética, en los diferentes puntos de la superficie terrestre, no se manifiesta con la misma intensidad, sufriendo alteraciones ligeras tanto en la inclinación como en la declinación, debido al magnetismo propio de masas de rocas subyacentes. Esta es la razón por la cual las líneas magnéticas que se dibujarían en un mapa siguiendo los puntos de igual declinación o inclinación (isógonas e isoclinas) aparecerían con trazados sinuosos, cuando aparentemente no debiera ser así.

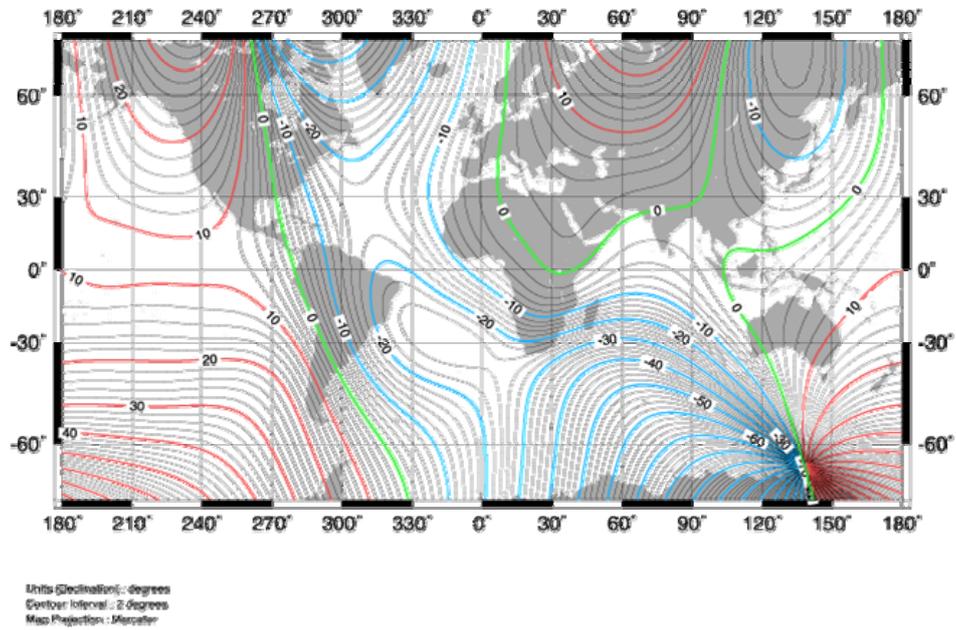
¹ Este documento tiene fines docentes. Ha sido elaborado a partir de diversas fuentes que se reseñan al final, empleando en muchas ocasiones extractos e ilustraciones de las mismas. Éstos han sido seleccionados, compuestos y estructurados, añadiendo entre ellos comentarios y efectuando una ordenación de ideas con objeto de facilitar la adecuada comprensión de los contenidos en relación con los fines cartográficos y ambientales de la asignatura.

² Las isógonas son las líneas que unen los puntos con el mismo valor de la declinación magnética, siendo agónicas aquellas que marcan la ausencia de declinación y, por tanto, no debe corregirse la indicación de la brújula.

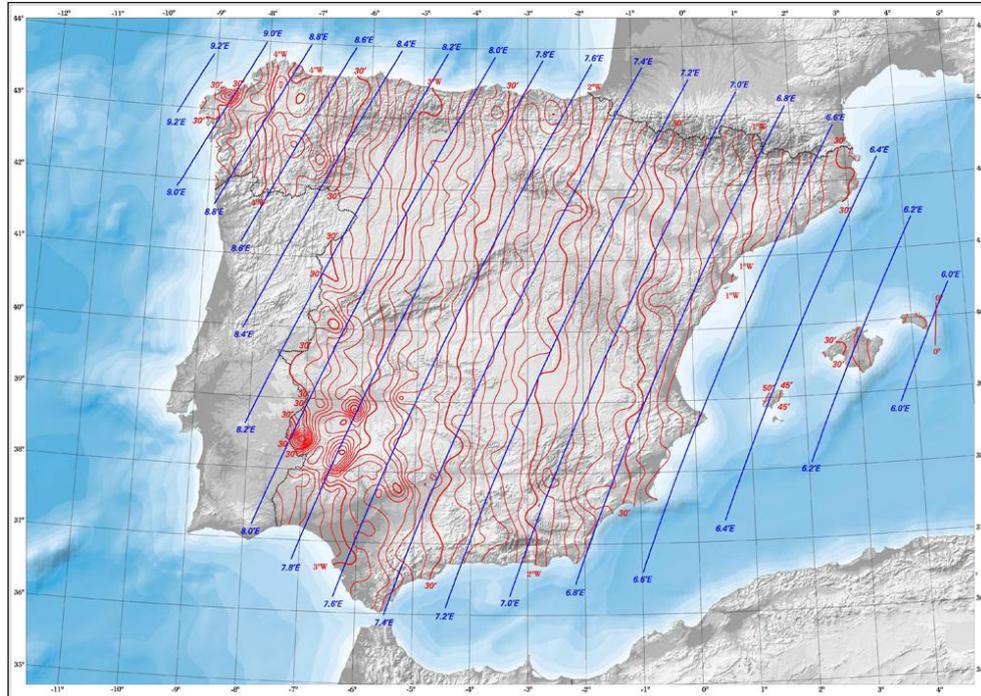
³ Los que indican por medio de isoclinas los puntos en donde la variación de la declinación magnética es la misma. A esas isoclinas también se les llama isóporas.

⁴ Los que indican el valor de la Inclinación Magnética.

US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000 Declination - Main Field (D)



Fuente: <http://ourworld.compuserve.com/homepages/dp5/declination1.gif>



Mapa de Declinaciones Magnéticas (ISÓGONAS 2005,0). Fuente: Ministerio de Fomento

http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/Geomagnetismo/cartografia_magnetica/map_decli_2005_0.htm

Además, el geomagnetismo es variable en el tiempo y, por tanto, la localización de esos polos magnéticos cambia, así como el valor de esa declinación. Los cambios varían accidentalmente, debido a tormentas magnéticas del Sol; también, diariamente, por efecto de la electrización de la Ionosfera, que se modifica del día a la noche. Pero, las variaciones más importantes son las de carácter secular, cuyas causas son aún controvertidas, aunque sí percibimos y sabemos sus efectos:

- Paulatina deriva o desplazamiento de los polos magnéticos. Así, por ejemplo, el Polo Norte Magnético (PNM) estaba a $78,6^{\circ}$ N - $70,1^{\circ}$ W, en 1945; mientras que en 1955 se había desplazado a $73,5^{\circ}$ N - 100° W.
- Cambio o inversión de la polaridad. En periodos muy largos (de millones de años) se han constatado por el magnetismo fósil (o paleomagnetismo) no menos de 100 cambios en esa polaridad.

2. Breve reseña histórica

La existencia del campo magnético de la Tierra es conocida desde muy antiguo por sus aplicaciones a la navegación mediante la *brújula*. El uso de ésta aparece por primera vez en Occidente hacia el S. XII, aunque es posible que en China se conociera algunos siglos antes y que allí ya la emplearan para orientarse. El primer documento escrito que la menciona es el de Alejandro Neckam, monje de S. Albano, en 1187.

La *declinación* magnética y su variación de un lugar a otro fue observada por los navegantes, en especial españoles y portugueses, de los S. XV y XVI, y se encuentra ya descrita con detalle en una obra de Martín Cortés, publicada en 1551, en la que se distinguen los polos magnéticos de los geográficos. De hecho, la brújula empezó a considerarse indispensable para la navegación sólo a partir de finales del S. XV, cuando a raíz de los descubrimientos de Cristóbal Colón, comenzó la era de las grandes exploraciones.

El descubrimiento de la *inclinación* fue obra de R. Norman, que describió este fenómeno en un opúsculo publicado en Londres, en 1576. En 1600 aparece la obra de W. Gilbert (1540-1603), titulada *De magnete*, que es considerada el primer tratado de magnetismo, aunque en ella se refiere a un trabajo anterior titulado *Epistola de magnete* de Pedro Peregrino de Picardy, del S. XIII (1269), en las que hablaba de las propiedades del imán. Gilbert describe sus experimentos con una esfera de magnetita que construyó como modelo de las propiedades magnéticas de la Tierra, y afirma por primera vez que el globo de la Tierra es un inmenso imán.

En los S. XVII y XVIII se desarrollan los principios fundamentales del geomagnetismo. Al respecto conviene destacar a H. Gellibrand, quien observa en 1635 la variación del campo magnético; a E. Halley (1656-1742), que publica entre 1698 y 1700 los primeros mapas magnéticos⁵; y a Poisson (1781-1840), que definió el concepto de dipolo y la

⁵ Precisamente, la confección de estos mapas donde mostraba la distribución, tal y como se conocían entonces, de las variaciones de la brújula, la hizo uniendo puntos de igual variación o declinación con líneas. Estas líneas *halleyanas* (llamadas posteriormente isogónicas), o “líneas de curva” como las llamó su autor, condujeron a la masiva utilización de isolíneas similares en otras muchas aplicaciones temáticas de la Cartografía, siendo el origen de la implantación de esta técnica de representación.

intensidad de magnetización, contribuyendo a la teoría general del potencial y su aplicación al campo magnético. W.F. Gauss (1777-1855) establece el primer observatorio propiamente geomagnético en 1832, en Göttingen (Suecia), y publica su obra sobre el magnetismo terrestre en 1839.

La primera cartografía magnética de España se remonta a 1858. Fue realizada por el Dr. Lamont de la Universidad Luis-Maximiliano de Baviera. A partir de 1924 el Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.) comienza a publicar mapas magnéticos de España, en 1939, 1960 y 1975 (publicaciones históricas). A continuación de este último se publican, según recomendaciones de la I.A.G.A (International Association Geomagnetism and Aeronomy), cada cinco años en el caso de la declinación y cada diez para el resto de las componentes, siendo los últimos en ser publicados los correspondientes a 2005. En 1987 son publicados los primeros mapas aeromagnéticos de España peninsular y en 1995 el del archipiélago canario. Para poder representar mediante curvas isomagnéticas el valor del campo magnético terrestre de una determinada zona (valores medios correspondientes a una época o momento), es necesario el densificar el número de estaciones en las cuales se realiza la observación de las componentes magnéticas necesarias. Estos levantamientos pueden efectuarse a partir de estaciones en tierra (puntos de mapa) o realizando un vuelo aeromagnético (www.ign.es).

3. Fundamentos físicos

El campo magnético terrestre es en su mayor parte de origen interno (campo magnético interno), sin embargo existe también un campo externo producido fuera de la Tierra (campo magnético externo), principalmente por la actividad del Sol, que se manifiesta en variaciones cortas en el tiempo. Las estructuras externas forman la Magnetosfera, de dimensiones de aproximadamente entre 10 y 100 radios terrestres; y la Ionosfera, más cercana, entre 50 u 500 km de altitud. En estos tiempos modernos de observaciones desde satélites artificiales, el estudio de este campo magnético externo ha recibido un gran impulso, obteniéndose medidas directas de la estructura del campo magnético externo.

La Ionosfera o capa ionizada de la atmósfera implica la existencia de una capa de partículas con carga eléctrica. A su vez, se puede dividir en una serie de capas ionizadas a distintas alturas, entre 60 y 500 km, de las que las más importantes son cuatro⁶. En su totalidad es neutra eléctricamente.

Las características del campo magnético se obtienen a través de la medición de los siguientes elementos del campo:

- La Declinación. Se define como el ángulo que una aguja imantada que puede girar libremente alrededor de un eje vertical forma con el meridiano geográfico que pasa por el lugar de medición.

⁶ D (60-85 km), con iones positivos, en su mayoría NO^+ , y negativos: electrones y algún tipo de iones negativos. E (85-140 km) y F_1 (140-200 km), con iones positivos NO^+ y O^+ . Y F_2 (200-500 km) solamente con O^+ . En las tres capas últimas, las partículas negativas casi en su totalidad son electrones libres.

- La Inclinación. Corresponde al ángulo que una aguja imantada que puede girar libremente alrededor de un eje horizontal forma con el plano del horizonte.
- La intensidad del campo.

4. Causas del magnetismo terrestre interno

Como se dijo ante, la cuestión es controvertida. Una de las primeras teorías sobre el origen del magnetismo es la imanación de la Tierra por magnetización permanente, aunque no se sabía por qué ésta es siempre en el mismo sentido y por qué el eje del dipolo resultante coincide, aproximadamente, con el de rotación terrestre. Por ello, de algún modo, se pensaba que los procesos generadores del campo magnético deben estar relacionados con la rotación de la Tierra. Después, otras teorías se basaron en rotación de cargas eléctricas, que suponía la existencia de corrientes eléctricas en la Tierra de intensidad muy elevada.

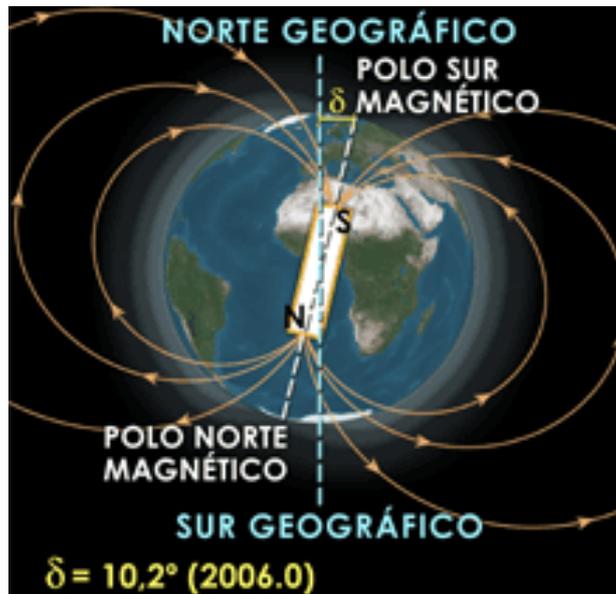
Pero, todas estas teorías han sido actualmente abandonadas por las que postulan la existencia en el núcleo de la Tierra de fenómenos semejantes a los de una dinamo autoexcitada o autoinducida que darían lugar al campo magnético terrestre. Varios indicios geofísicos sobre la existencia de un núcleo terrestre de naturaleza fluida y alta densidad, compuesto casi en su totalidad de hierro, sirven de base a las teorías que ponen el origen de este campo en procesos dinámicos en su interior. El movimiento de circulación de material conductor en presencia de un campo magnético genera corrientes eléctricas que, a su vez, realimentan el campo inductor. En el caso de la Tierra, este movimiento afecta al material fluido del núcleo.

Las variaciones temporales se deben, según la mayoría de los autores, a las corrientes de convección en la superficie del núcleo. Estas corrientes ascendentes o descendentes se distribuyen sobre la superficie del núcleo y su variación y la interacción de estas variaciones de flujo con las líneas de fuerza del campo magnético darían origen a los cambios del campo residual.

5. El Campo Magnético Terrestre

El campo magnético que se observa en la figura tiene dos orígenes, uno interno y otro externo. El campo interno es semejante al producido por un dipolo magnético situado en el centro de la Tierra con una inclinación de $10,5^\circ$ respecto al eje de rotación. Los polos geomagnéticos son los puntos en los que el eje del dipolo intersecta a la superficie terrestre, y el ecuador magnético es el plano perpendicular a dicho eje. Esta componente presenta una variación secular en el tiempo, que al ser acumulativa en grandes períodos de tiempo se ha podido observar en algunos puntos.

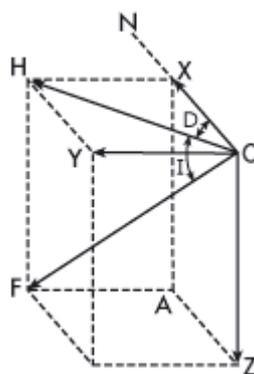
La componente de origen externo es debida principalmente a la actividad del Sol sobre la ionosfera y magnetosfera, siendo la más importante la variación diaria con período de 24 horas. Otras variaciones de origen externo son: la lunar, undecenal, pulsaciones magnéticas, tormentas magnéticas, bahías, efectos cromosféricos, etc (extractado de <http://www.ign.es>).



Fuente:

http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/Geomagnetismo/campomag.htm

El campo magnético terrestre es una magnitud de carácter vectorial, por lo que para estudiar sus componentes se toma como referencia en un punto de la superficie de la Tierra un sistema trirrectangular de ejes vertical, N-S y E-O. De esta forma, la intensidad del campo (F) y sus proyecciones horizontal (H) y vertical (Z) están relacionadas a través de los ángulos de declinación (D), que forma H con el norte geográfico, y de inclinación magnética (I), que forman F y H . Así, para expresar el campo magnético en un punto bastan las tres cantidades F , I , D (extractado de <http://www.ign.es>).



Fuente:

http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/Geomagnetismo/campomag.htm

6. Variación del magnetismo terrestre en el tiempo

El campo magnético terrestre varía con el tiempo, siendo sus variaciones más importantes las siguientes:

- La *variación secular* de los componentes, con un valor aproximado de algunas decenas de nT⁷ al año y que en algunos sitios alcanza hasta 150 nT/año y de hasta 6 a 10 minutos/año para la declinación e inclinación. Esta variación está relacionada con los procesos que dan origen al campo magnético interno de la Tierra. Sólo son apreciables en periodos largos de tiempo, al comparar valores medios anuales durante varios años

- Las variaciones periódicas, con periodos de doce horas, un día, veintisiete días, seis meses y un año, originadas por el campo magnético externo, que pueden llegar a tener valores de hasta 100 nT. Se aprecian mejor en los días tranquilos, es decir, en los que las perturbaciones de la actividad solar son pequeñas. Dependen de la influencia continua del Sol y de la Luna, por lo que su periodicidad está relacionada con los periodos de las órbitas de estos astros y de la rotación de la Tierra. Igualmente, influyen los periodos asociados a la actividad de las manchas solares y de la rotación del Sol:

· Variaciones diarias. En los días tranquilos, no perturbados, se da una variación que depende del tiempo solar local (*variación solar tranquila*): dura un día solar, predominantemente, teniendo un máximo positivo o negativo a las doce horas. Tiene componente, sobre todo, horizontal, pero también vertical. Las variaciones en el ángulo de declinación oscilan entre dos y cuatro minutos de arco. Se suelen determinar a partir de valores medios observados en días excepcionalmente tranquilos. Depende también de la latitud y de la época del año.

- Las variaciones no periódicas, llamadas *tormentas magnéticas*⁸, con intensidades de hasta 500 nT, también producidas por efectos externos (campo magnético externo). Su origen se debe a la interacción de las partículas emitidas de forma continua y, en especial, en las erupciones solares con el campo magnético terrestre. Estas partículas viajan con velocidades supersónicas, de unos 400 km/s, y llegan a la Tierra después de unas veinte a cuarenta horas de su emisión y su interacción con el campo magnético terrestre da lugar a la Magnetosfera. La relación con la actividad solar queda demostrada por la correlación de estas perturbaciones con el ciclo de las manchas solares. Además, se manifiesta por la correspondencia entre grandes tormentas y erupciones prominentes del Sol y su repetición después de veinticinco o veintisiete días, coincidiendo con el tiempo de rotación de su superficie. Pero, estas partículas no sólo son emitidas por el Sol en las erupciones, sino que existe una continua actividad de emisión de partículas que constituye un verdadero viento o plasma solar.

⁷ La unidad de medida del campo magnético en el SI es la tesla (T), que equivale a $1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$.

⁸ Denominación asignada por vez primera por Alexander Von Humboldt (1769-1859), quien además confirmó que su comienzo es prácticamente simultáneo en todas las partes de la Tierra.

- Las pulsaciones magnéticas o variaciones de periodo muy corto y pequeña amplitud. Se deben a otras perturbaciones de periodos menores a diez minutos (en general entre dos y diez segundos), relacionadas con la actividad solar.

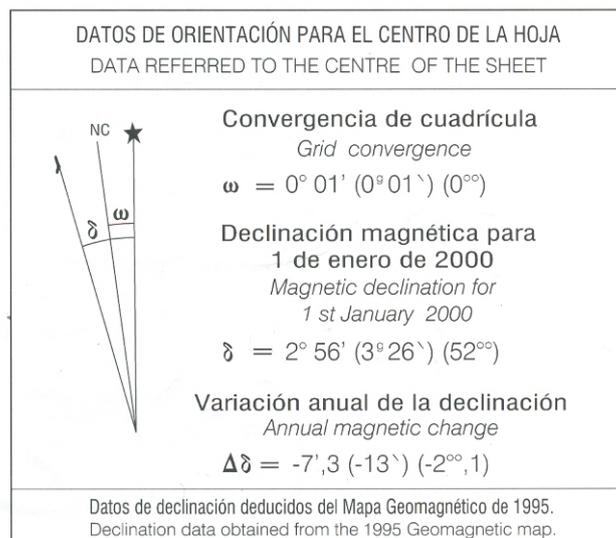
Además de estas variaciones, los datos del Paleomagnetismo indican que el campo magnético terrestre ha sufrido cambios continuos de intensidad e inversiones de polaridad a lo largo de las épocas geológicas. Al mismo tiempo, es posible que haya ‘existido una verdadera migración de los polos geomagnéticos. Sin embargo, para épocas recientes, la orientación del dipolo magnético, tomando su valor medio sobre decenas de miles de años, coincide sensiblemente con el del eje de rotación.

De la misma manera que se construyen mapas de los componentes del campo magnético terrestre, también se hace lo mismo con sus variaciones, lo que permite extrapolar los mapas de un año para otro.

7. Referencias Cartográficas a la Declinación Magnética y explicaciones básicas en relación con la Cartografía, la Orientación y la Dirección

En la Cartografía oficial española, se incluyen referencias a la declinación como información de apoyo en las propias hojas del Mapa Topográfico Nacional. Inicialmente, sólo se indicaban en los mapas militares (S.G.E.) a escala 1:50.000. Pero, posteriormente, el I.G.N. ha incorporado esta información en los mapas a escala 1:25.000 y en las nuevas ediciones del 1:50.000 aparecidas a partir del S. XXI. Esta información, acompañada de un croquis gráfico (que incluye también el ángulo de convergencia de cuadrícula), está referida al centro de cada hoja y consiste en:

- Valor medio de la declinación para una fecha dada (δ).
- Variación anual de la declinación.



Un caso de Presentación de los datos sobre Declinación Magnética en una Mapa Militar 1:50.000 del S.G.E.

Las explicaciones básicas de la Declinación en relación con la Cartografía y la orientación, así como la Convergencia de Cuadrícula están oportunamente expuestas en un documento que Gabriel Ortiz facilita desde Internet. Búsquese en:
<http://www.gabrielortiz.com/>

8. Fuentes de las que emanan los extractos e ilustraciones empleados

- Estado Mayor del Ejército (1985): *Manual. Topografía y lectura de planos*. Madrid. Servicio Geográfico del Ejército. Segunda edición.
- Gasparini, P. (1997): Geomagnetismo y electromagnetismo. *Ciencias de la Naturaleza*. Barcelona. Planeta. Vol. 12: 240-248.
- Puyol, R. -Coord.- et al. (1986): *Diccionario de Geografía*. Anaya. Madrid.
- Robinson, A.H.; R.D. Sale, J.L. Morrison y Ph.C. Muehrcke (1987): *Elementos de Cartografía*. Barcelona. Omega.
- Strahler, A.N. (1981): *Geografía física*. Barcelona. Omega.
- Udías, A. y J. Mezcuca (1997): *Fundamentos de Geofísica*. Madrid. Alianza Editorial.
- http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/Geomagnetismo/campomag.htm
- http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/Geomagnetismo/cartografia_magnetica/map_decli_2005_0.htm
- <http://ourworld.compuserve.com/homepages/dp5/declination1.gif>

9. Fuentes de Consulta Recomendada

<http://www.gabrielortiz.com/>