

SOBRE LOS CAMBIOS TEMPORALES EN LA REPRESENTACION DIPOLAR Y CUADRUPOLOAR DEL CAMPO GEOMAGNETICO

JULIO CESAR GIANIBELLI

DEPARTAMENTO DE GEOMAGNETISMO

FACULTAD DE CS. ASTRONOMICAS Y GEOFISICAS

PASEO DEL BOSQUE - 1900 LA PLATA - ARGENTINA

RESUMEN. Se analizan la marcha temporal de los coeficientes y energías de la representación dipolar (grado 1) y cuadrupolar (grado 2) del campo geomagnético correspondientes a los diferentes modelos basados en el análisis en esféricos armónicos realizados desde 1550 a 1995. Se comparan estos resultados con los obtenidos a través del modelo DGRF1900-90 e IGRF95, producido por el Grupo de Trabajo 8 de la IAGA. Se concluye que la energía correspondiente a la forma dipolar decrece con una tasa anual de 1.83×10^9 (nT²)/año mientras que la correspondiente al campo cuadrupolar es creciente con un valor de 6.89×10^7 (nT²)/año para el intervalo 1995-2000.

ABSTRACT. The temporal trend of the coefficients and energies of the dipolar and quadrupolar representation of geomagnetic field are analyzed. It has been used the spherical harmonic models of the geomagnetic field between 1550 and 1995. The results are compared with those obtained by the IAGA Working Group 8 with the DGRF 1900-90 and IGRF 1995 models. The energy corresponding to the dipole decay 1.83×10^9 (nT²)/yr and that corresponding to the quadrupole increases 6.89×10^7 (nT²)/yr.

INTRODUCCION.

El Campo Magnético Terrestre (CMT) determinado en la superficie de la Tierra está conformado por el aporte de tres fuentes principales residentes en: el núcleo de la Tierra, la Corteza (origen interno), y en la Ionósfera y Magnetósfera (origen externo). Una cuarta fuente (secundaria) es producida por un proceso de inducción de la fuente Ionosférica-Magnetosférica sobre los Océanos, Corteza, Manto y posiblemente también en el Núcleo de la Tierra, (Langel, 1987; Gianibelli, 1996).

Los modelos matemáticos del CMT están basados en el desarrollo en esféricos armónicos del potencial magnético, en la región comprendida entre la superficie de la Tierra y una altura promedio de 90km donde no se encuentran fuentes ($j=0$), y donde se verifica que el vector B cumple con la igualdad $\nabla \times B = 0$; de lo cual se desprende que $B = -\nabla V$ y por ende $\nabla^2 V = 0$. Desarrollando la función potencial en esféricos armónicos (de grado n y orden m) se tiene la expresión siguiente para los aportes "internos" y "externos":

$$V(r, \theta, \phi) = a \sum_{n=1}^k \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \{g_{n,m} \cos(m\theta) + h_{n,m} \sin(m\theta)\} P_n^m(\theta) + \\ + a \sum_{n=1}^k \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \{q_{n,m} \cos(m\theta) + s_{n,m} \sin(m\theta)\} P_n^m(\theta) \quad (1)$$

donde $g_{n,m}$ y $h_{n,m}$ representan los coeficientes del desarrollo para las fuentes de origen interno, denominados "coeficientes de Gauss", mientras que $q_{n,m}$ y $s_{n,m}$ lo son para las fuentes de origen externo. $P_n^m(\theta)$ son las funciones asociadas de Legendre cuasi normalizadas por Schmith, (Langel, 1987). Aplicando el operador gradiente en coordenadas esféricas a V se obtienen las componentes del CMT dadas por:

$$B_\theta = -r^{-1} \left(\frac{\partial V}{\partial \theta}\right), \quad B_\phi = -(r \sin \theta)^{-1} \left(\frac{\partial V}{\partial \phi}\right), \quad B_r = -\frac{\partial V}{\partial r} \quad (2)$$

La información determinada a través de la red de observatorios permanente, estaciones de repetición

y relevamientos: aéreos, terrestres marítimos y espaciales es la utilizada en la resolución del sistema de ecuaciones lineales (1) en las incógnitas $g_{n,m}$, $h_{n,m}$, $q_{n,m}$ y $s_{n,m}$.

Para ello los valores de las componentes B_0 , B_ϕ y B_r del CMT, se reducen a los niveles de menor actividad magnética de origen externo. También se utilizan valores medios mensuales y valores promedios de los 5 días más quietos del mes en la resolución de (2). Modelos de corrientes ionosféricas y corriente anillo son aplicados en la corrección de los relevamientos satelitarios.

Cain (1990) comprobó que el campo de origen interno correspondiente al generado por la geodínamo residente en el núcleo externo de la Tierra era posible representarlo por un desarrollo hasta el grado $k=12$. Los grados entre $k=13$ a $k=16$ estarían vinculados a efectos producidos por el manto, correspondiendo al efecto cortical a los grados $k=17$ a $k=44$. El efecto del campo de origen externo, es del orden de 20nT (Langel et al. 1980), totalmente despreciable en el desarrollo de V.

Los modelos matemáticos del CMT datan desde 1550 hasta la actualidad, conformando una base de datos importante para la determinación de la relación entre los distintos grados del desarrollo (1) y su evolución temporal. Barraclough, (1978 y las referencias en su trabajo) recopiló los coeficientes de los distintos modelos 1550-1970, y analizó las diferentes formas de normalización utilizada en los antiguos modelos en armónicos esféricos.

Un análisis de la evolución temporal de los coeficientes g_{10} , g_{11} , h_{11} correspondiente al dipolo geomagnético, y su momento M, fue realizada por Gianibelli (1996), utilizando el trabajo de Barraclough, (1978), donde se determinó una tasa media de cambio de -24.7 nT/año para el momento reducido, (Bartels, 1936); $B_0 = [(g_{10})^2 + (g_{11})^2 + (h_{11})^2]^{1/2} = 30235.4$ nT, correspondiente al intervalo 1995-2000. El momento reducido está dado por $B_0 = M \cdot (4\pi R^3 / \mu_0)^{-1}$.

El presente trabajo tiene por objetivo analizar la marcha temporal de las energías correspondientes a los diferentes modelos de representación dipolar (grado 1) y cuadrupolar (grado 2), del campo geomagnético, determinar su relación y tasa de evolución futura, y en especial su comparación con los

modelos recientes del DGRF1900-90 e IGRF95, (IAGA-DVWG8, 1996).

ANÁLISIS DE LOS DATOS.

Se confeccionó una base de datos actualizando la generada por Barraclough, (1978), con los modelos presentados en Baker and Barraclough (1987, y sus referencias), en Langel (1992 y sus referencias) y los modelos internacionales de campo geomagnético (1900-1995 y su estimación para el 2000), llamados DGRF 1900-90 (Definitive "International" Geomagnetic Reference Field, también denominado DIGRF) e IGRF95 (International Geomagnetic Reference Field: Provisional) provistos por el Grupo de Trabajo 8 de la Comisión V de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA-DVWG8, 1996), que se llamará en adelante Base1. La base de datos para este estudio, está constituida por los coeficientes g_{10} , g_{11} , h_{11} , para la representación dipolar, y g_{20} , g_{21} , h_{21} , g_{22} , h_{22} , para la representación cuadrupolar, para un total de 273 modelos recopilados. Una segunda base de datos "específica" se generó para los coeficientes del DGRF1900-90, IGRF95 y su estimación para el año 2000 hasta el grado 4 con el fin de analizar la relación de importancia entre las energías correspondientes a cada grado, desde 1900 al 2000, que se llamará en adelante Base2.

Cada coeficiente $g_{n,m}$, $h_{n,m}$ de la Base1 fue ajustado por una función polinómica de mejor ajuste en el intervalo comprendido entre los años 1550 y 2000 con el objeto de obtener una forma continua de la evolución temporal de estos coeficientes y poder entonces determinar la energía del dipolo y cuadrupolo a intervalos anuales. Para los coeficientes de la Base2 no se calcularon funciones de ajuste pues su distribución temporal (cada 5 años) y su intervalo de cobertura es sólo de 100 años. Esta información es utilizada para comparar con el ajuste realizado con los datos de la Base1, en lo referente al los coeficientes correspondientes al campo dipolar y las energías.

Las figuras 1, 2, y 3 muestran la evolución temporal de la función de ajuste en línea llena y los valores correspondientes a cada uno de los modelos dibujados con símbolos, para cada coeficiente de los grados 1 y 2.

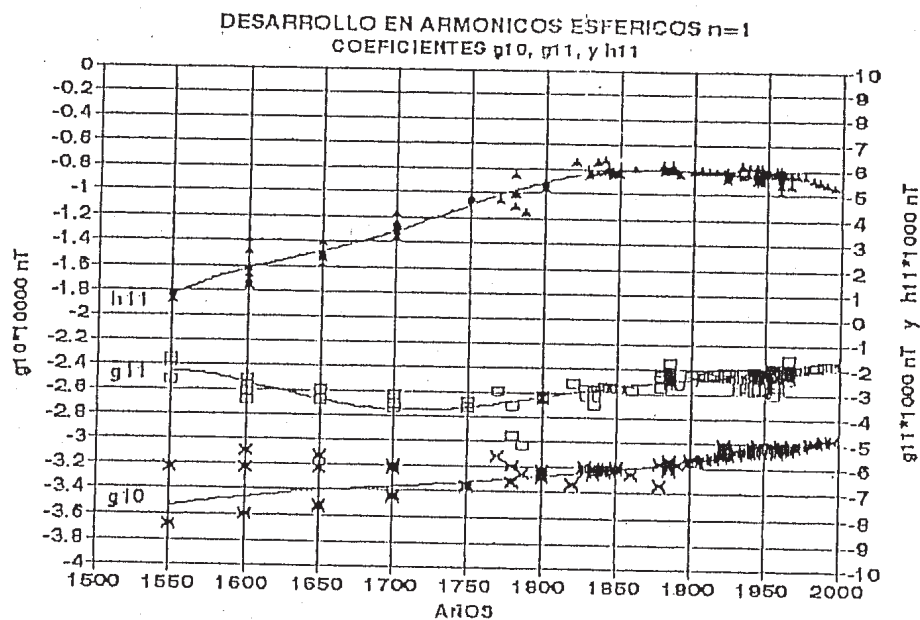


Figura 1

Observese que los valores del coeficiente g_{10} , son 10 veces los de g_{11} , h_{11} , g_{20} , g_{21} , h_{21} , g_{22} , h_{22} pues se ha graficado en escalado por 10000 en el primero y 1000 en los restantes.

g_{10} muestra dos familias de modelos que confluyen en el año 1775-1800 a una tendencia única, esto también se observa en Bo , (Figs 1 y 4).

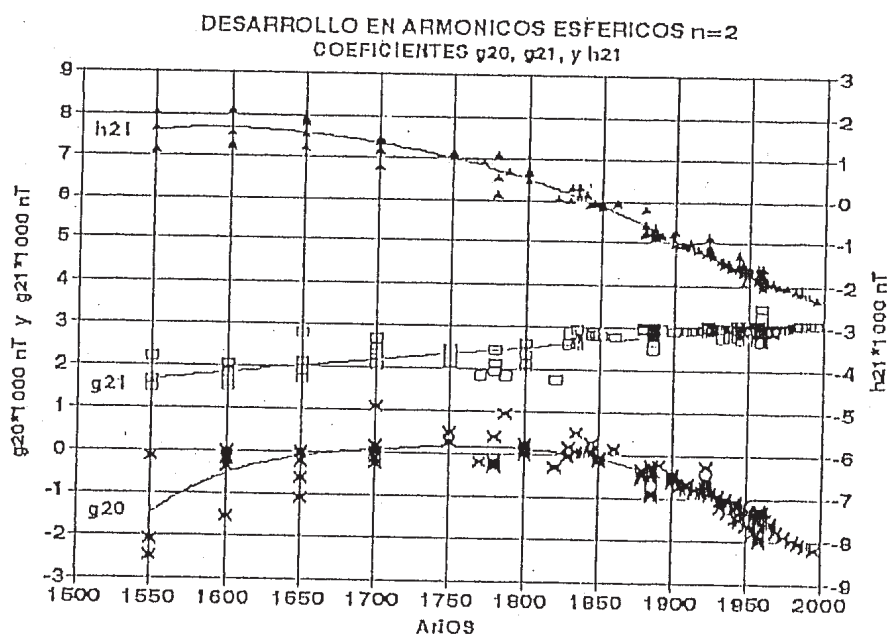


Figura 2

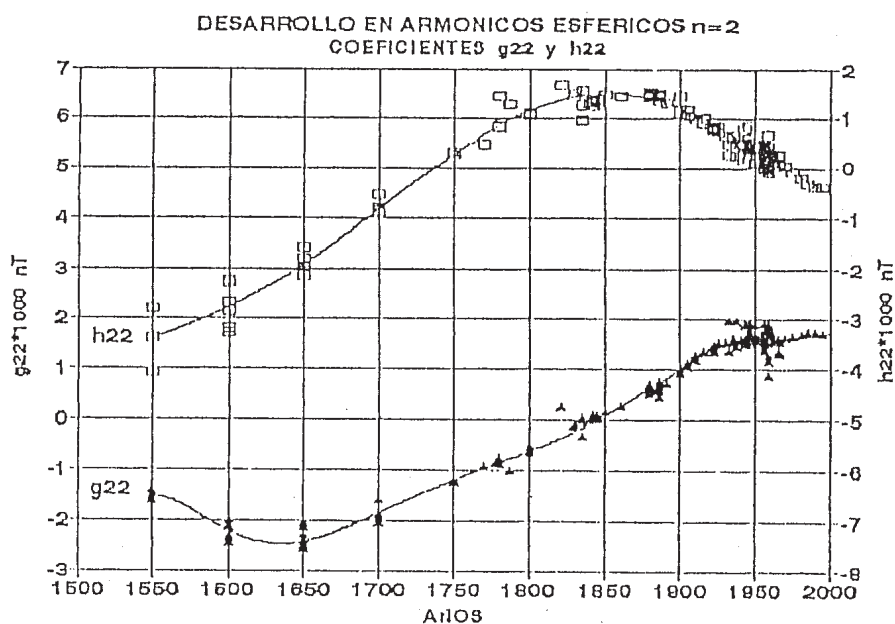


Figura 3

En la figura 4, se tiene la marcha temporal correspondiente al momento reducido B_0 del dipolo, mientras que la figura 5 presenta las relaciones porcentuales entre los coeficientes de grado 1. De ello

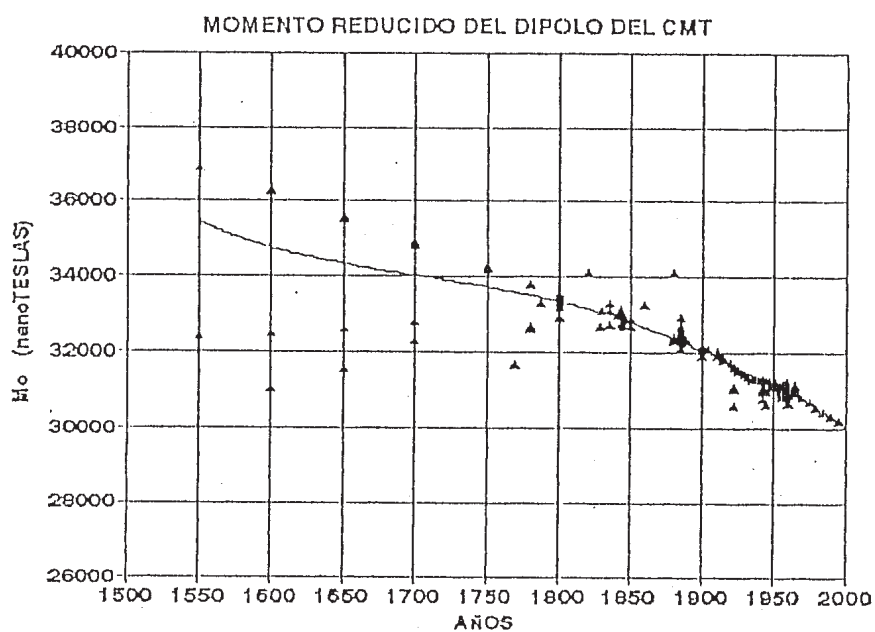


Figura 4

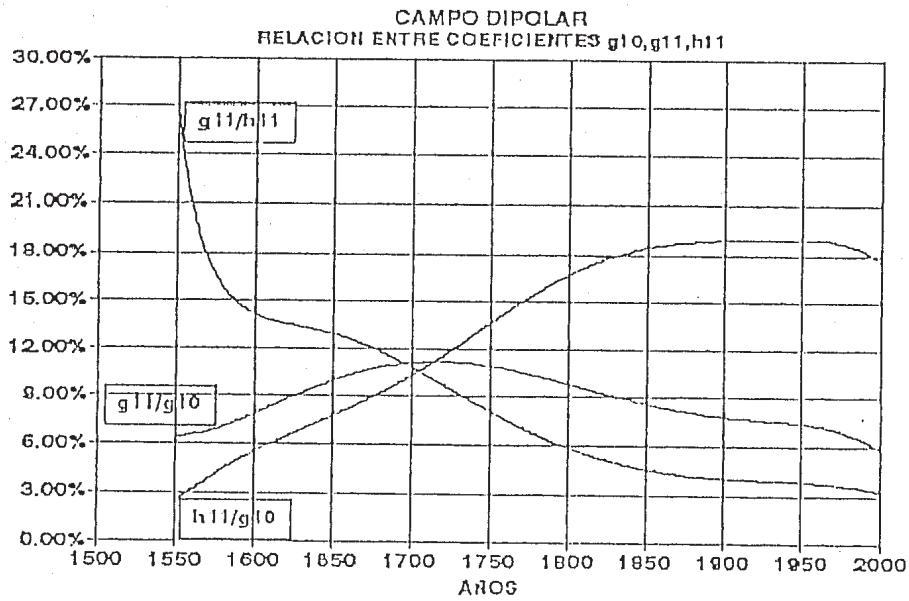


Figura 5

se desprende la importancia del término g_{10} , frente a g_{11} , h_{11} , observándose que las curvas de estas relaciones tienen una tendencia decreciente en los últimos 50 años. Esto significa que B_0 no se puede anular excepto cuando los coeficientes que lo definen lo hacen simultáneamente. En cambio es posible una minimización del efecto dipolar del campo.

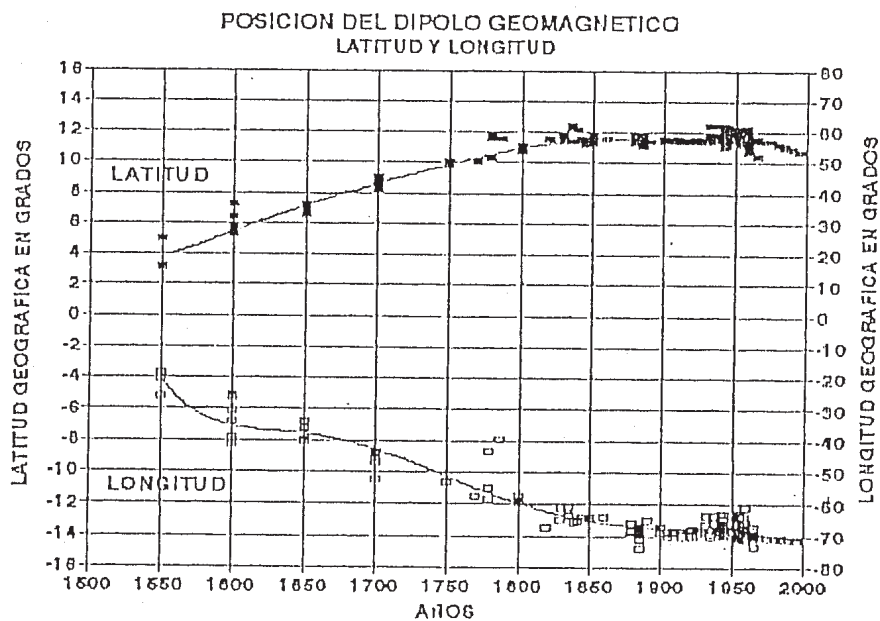


Figura 6

Las tasas de cambio anual estimadas a través de los modelos son las siguientes:

$$\delta g_{10}/\delta t = +19.17 \text{ nT/año}, \quad \delta g_{11}/\delta t = +17.24 \text{ nT/año}, \quad \delta h_{11}/\delta t = -24.52 \text{ nT/año},$$

asumiendo las relaciones lineales

$$g_{n,m}(t) = g_{n,m}(1995) + [\delta g_{n,m}/\delta t] \cdot (t - 1995), \quad h_{n,m}(t) = h_{n,m}(1995) + [\delta h_{n,m}/\delta t] \cdot (t - 1995)$$

el coeficiente g_{10} se anulará en el año 3537, g_{11} lo hará en el 2100, y h_{11} en el año 2212, la no coincidencia de estas épocas implica que B_0 tendrá un valor mínimo cuando $g_{10}=0$ debido a la importancia porcentual sobre los otros dos coeficientes (Fig 4). Esta característica conduciría a pensar que el efecto dipolar representado por estos modelos matemáticos estaría en pleno proceso de transición, o también denominado "excursión" a un proceso de pseudoinversión del campo.

La posición de los polos geomagnéticos (antípodos) está dada por $\cos\theta = -g_{10}/B_0$, para la colatitud geográfica ($\theta = 90^\circ - \Theta$), siendo $-90^\circ < \Theta < +90^\circ$ la latitud geográfica y $\tan\phi = h_{11}/g_{11}$ para la longitud geográfica, (Fraser Smith, 1987). Su cambio temporal desde 1550 a la actualidad se muestra en la figura 6, observándose que existe una tendencia del ángulo θ a disminuir y acercarse al eje de rotación. La longitud ϕ tiende a incrementarse negativamente, siguiendo la conocida deriva hacia el oeste que posee el campo dipolar. Para 1995 mediante las funciones de ajuste y de la información producida por la IAGA-DVWG8 para el DGRF 1900-1990 e IGRF 1995 se estimaron los siguientes valores para $\theta = 10.73^\circ$, $\phi = -71.17^\circ$, $\theta_{\text{IGRF}} = 10.70^\circ$, $\phi_{\text{IGRF}} = -71.41^\circ$. Las posiciones son prácticamente coincidentes.

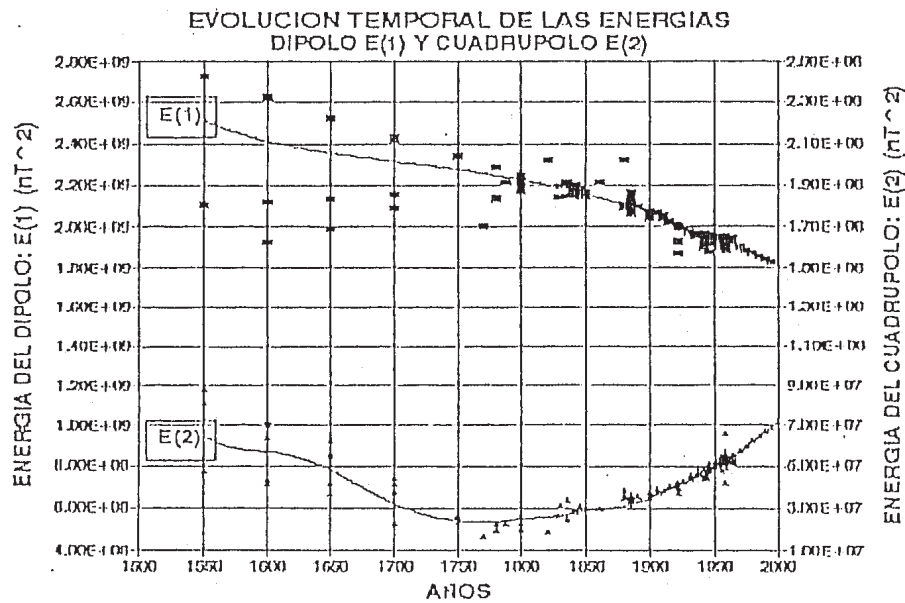


Figura 7

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -2,81 \frac{'}{\text{año}}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} = -5,13 \frac{'}{\text{año}}, \quad \frac{\partial \theta_{IGRF}}{\partial t} = -1,89 \frac{'}{\text{año}}, \quad \frac{\partial \phi_{IGRF}}{\partial t} = -3,35 \frac{'}{\text{año}}$$

El monto de las tasas de cambio para la latitud y longitud de los polos geomagnéticos es de:

las que son diferentes debido a que los modelos DGRF e IGRF se producen cada 5 años.

Si se supone un proceso netamente de inversión del momento dipolar B_0 , y partiendo de la posición actual $\phi(1995)$ del polo geomagnético, este debería dar una rotación de 180° en 2105 años mientras que la colatitud correspondiente a dicho polo θ pasaría a una posición sobre el mismo meridiano con una colatitud de 169.27° en 3614 años. Este resultado es totalmente especulativo pues la velocidad de cambio no es constante como se observa del gráfico 6, es posible que sean tiempos menores y muy diferentes hasta obtener posiciones casi en las antipódas.

Un aspecto diferente es el tratamiento de las energías involucradas en cada grado del desarrollo en esféricos armónicos, las cuales indican realmente el efecto en superficie, y a través de un modelo matemático, del proceso magnetohidrodinámico que posee la geodínamo del núcleo externo de la Tierra. La densidad de energía de cada grado del desarrollo en armónicos esféricos está dada por la expresión

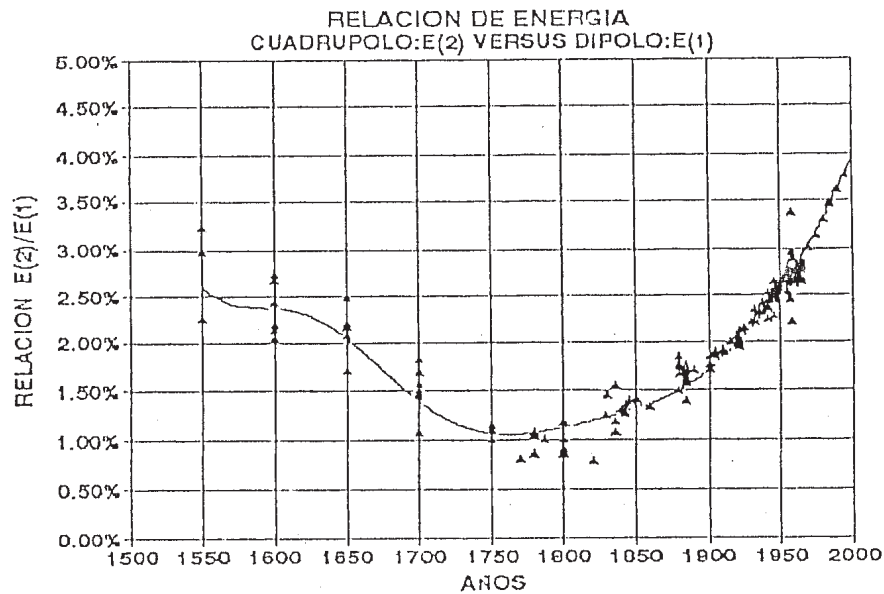


Figura 8

$$E^*(n) = 2\mu_0 \cdot (n+1) \cdot \left(\frac{a}{r}\right)^{2(n+2)} \cdot \sum_{m=0}^n [(g_{n,m})^2 + (h_{n,m})^2]$$

donde a representa el radio terrestre y r la distancia sobre la superficie de la Tierra. Para este estudio $r=a$ con lo cual este término se iguala a la unidad. Para el cálculo de la energía se tomó la forma $E(n)=E^*(n)/(2\cdot\mu_0)$, (Cain, 1990), la que se aplicó a la información de las dos bases de datos y a los valores obtenidos a partir de las funciones polinómicas de ajuste con la información de la Basel.

RESULTADOS.

La figura 7 muestra los resultados correspondientes a las energías para $n=1$ y $n=2$. El aspecto más importante es la marcada preponderancia del término g_{11} , que regula no solo la forma de $E(1)$, sino también su cambio temporal. $E(2)$ por el contrario, posee un crecimiento notable, pero debido a su menor intensidad (un orden menor en la actualidad) es relativamente relevante. Dentro de los modelos de mejor ajuste se ha propuesto la forma de disposición de un dipolo excentrico que minimice el efecto cuadrupolar ($n=2$) del campo, aproximando mejor a la forma dipolar del campo observado en la superficie de la Tierra (Bartels 1936, Fraser-Smith 1987) pero cambia la esencia de un desarrollo en

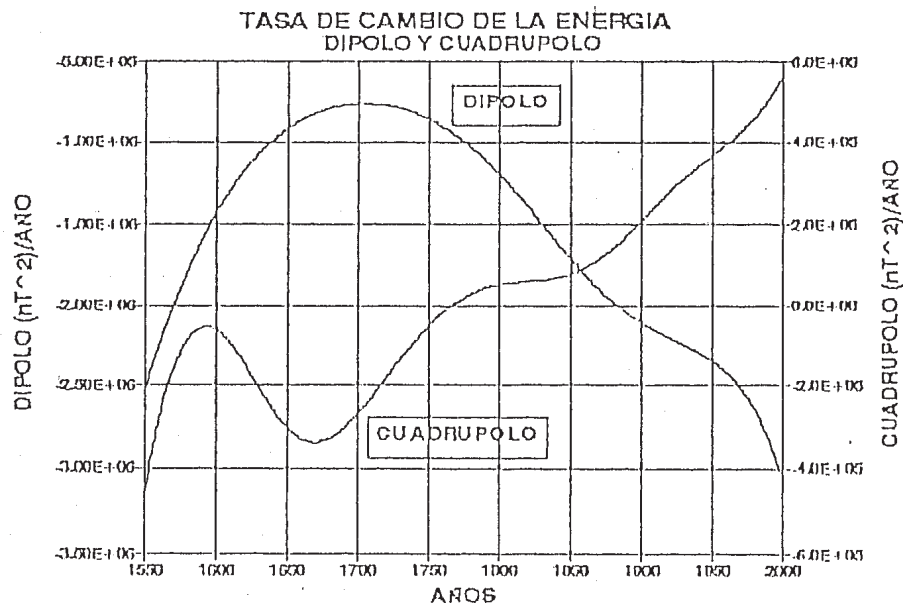


Figura 9

armónicos esféricos, en especial en el tratamiento de las energías.

Un aspecto importante es la relación entre las energías $E(2)/E(1)$ distribuidas temporalmente, la que se muestra en la figura 8. Se observa un mínimo entre 1750 y 1770 y un crecimiento sostenido, estimado en un 4% para el año 2000.

La tasa de cambio anual de las energías correspondientes a los órdenes 1 y 2 se determinó a partir de las formas funcionales de ajuste discretizada para cada año, de los coeficientes g_{10} , g_{11} , h_{11} para $E(1)$, (ver Fig 1) y de g_{20} , g_{21} , h_{21} , g_{22} , h_{22} , para $E(2)$ (ver Fig 2 y Fig 3). se calculó la energía en forma discreta mediante la formula:

$$\frac{\delta E_t(n)}{\delta t} = \left(\frac{1}{2}\right)[E_{t+1}(n) - E_{t-1}(n)] \quad (3)$$

donde $t-1$, t y $t+1$ indican los valores de $E_t(n)$ en los años consecutivos centrados en t .

La figura 9 muestra la tasa de cambio anual, siendo cada vez más negativa en $E(1)$ y marcadamente positiva en $E(2)$. Esto induce a creer que la disminución de $E(1)$ tendrá un mínimo en el futuro, para

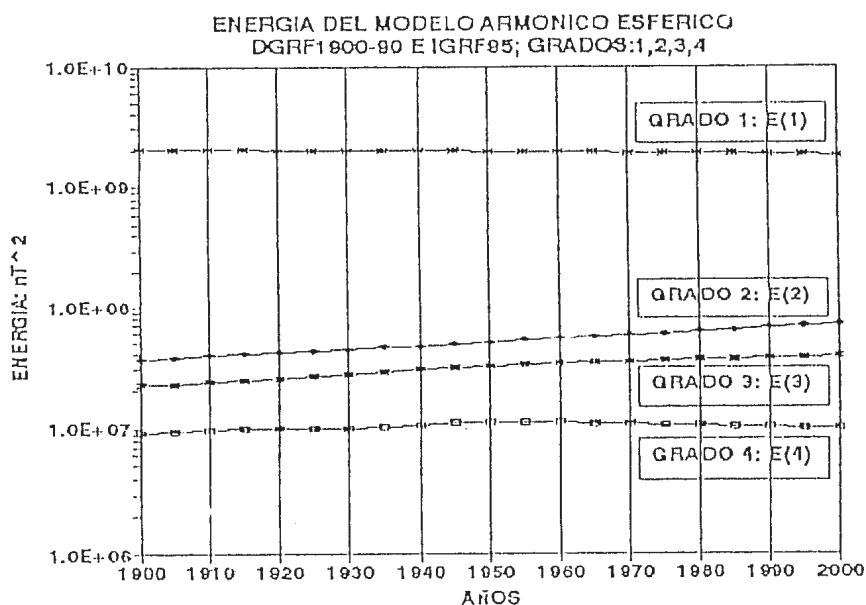


Figura 10

el cuál será también mínimo el efecto dipolar del campo, pero no así el efecto del cuadrupolar.

Los resultados correspondientes al cálculo de la energía de los modelos internacionales DGRF 1900-90 e IGRF 95 y su estimado para el 2000 son graficados en la figura 10. En ella se tienen representados los resultados hasta el grado 4.

La figura 11 muestra la relación porcentual entre las energías $E(2)$, $E(3)$ y $E(4)$ respecto de $E(1)$. Se confirma la importancia de $E(1)$ sobre $E(2)$, $E(3)$ y $E(4)$, caracterizando además, que el aporte del campo cuadrupolar es notablemente creciente en el tiempo, en comparación con los órdenes superiores. Por lo tanto sería suficiente representar al campo geomagnético por una composición de un dipolo más un cuadrupolo para estudios magnetosféricos, quedando en discusión si se agrega el orden 3.

La tasa de cambio de Energía se calculó utilizándose para ello una fórmula similar a la (2) dada por la siguiente expresión

$$\frac{\delta E_r(n)}{\delta t} = \left(\frac{1}{5}\right) [E_{r,2,5}(n) - E_{r,2,5}(n)]$$

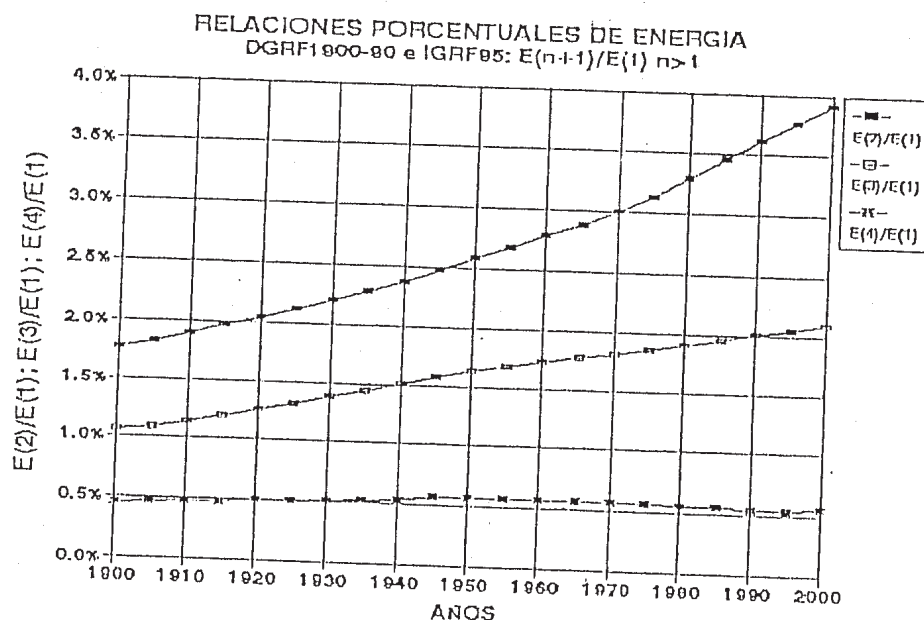


Figura 11

donde $t-2.5$, t y $t+2.5$ indican los valores de $E_t(n)$ a intervalos de 5 años centrados en su mitad.

En la figura 12 se observa la relación $\delta E_t(n)/\delta t$ hasta el grado 4. $E(1)$ muestra una clara variación

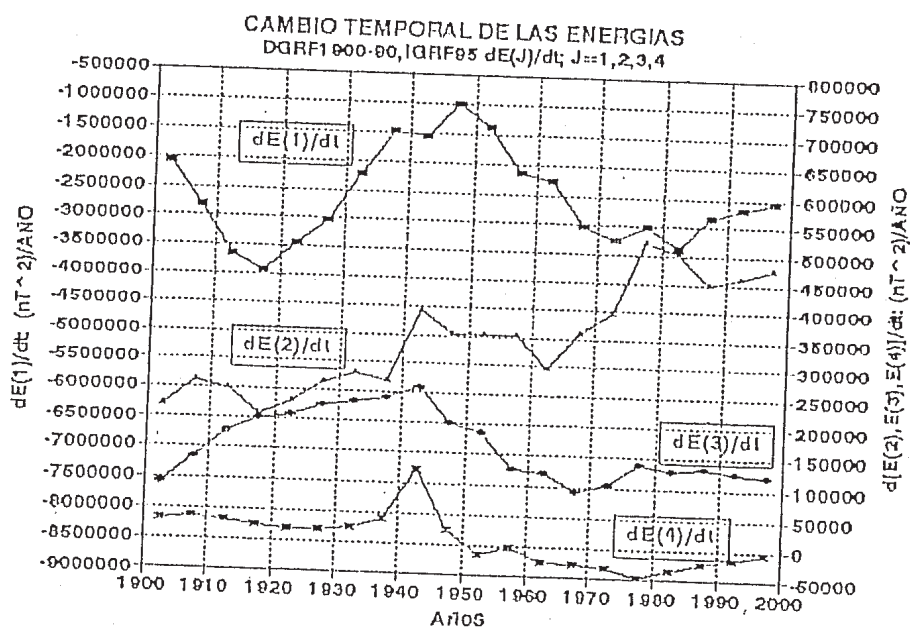


Figura 12

cuasiperiódica de aproximadamente 60 años la que podría estar relacionada con similar período observado en la velocidad de rotación terrestre. En cambio el grado 2 muestra una tendencia lineal correspondiendo a un proceso con aceleración, a diferencia de las otras variaciones temporales que muestran períodos de aceleración y desaceleración. También sobre esta tendencia lineal que posee el cambio temporal de $E(2)$ se superpone con una posible variación periódica de 25 años. El grado 3 y en especial el grado 4 muestran variaciones de la velocidad alrededor de un valor constante el cual es prácticamente despreciable frente a los grados 1 y 2.

CONCLUSIONES.

Los aportes de los campos "no dipolares: $n \geq 2$ ", no llegan a ser el 7% de la energía del dipolo. Pero la que experimenta un crecimiento notable es la del cuadrupolo. Los procesos de inversión del CMT que son referidos a un campo dipolar y axial, como también lo son las "excursiones"; no tienen un claro pronóstico. Es posible que exista un rol importante del campo producido por un efecto cuadrupolar del geodínamo representado por $E(2)$ sobre estas "excursiones" del CMT, tal que el proceso de inversión no sea completo. Estos supuesto seguirán por algún tiempo más, hasta que los modelos físicos representen la evolución del CMT en el pasado, presente y estime su estado futuro y permitan una comprensión de estos cambio temporales.

Las evidencias observadas a través de los modelos matemáticos confeccionados a partir de los datos observacionales desde el 1900 a la actualidad muestran la existencia de periodicidades, relacionadas con otros fenómenos geofísicos, tal como los cambios en la velocidad de rotación terrestre mostrando que la fuente interna del CMT involucra al núcleo y al manto inferior.

REFERENCIAS.

- BARKER F.S. and D.R. BARRACLOUGH, 1987. (Guest Editors), Geomagnetic Field Modelling and IGRF Revision. Phys. Earth Planet. Int. Vol.48 p 183-388.
- BARRACLOUGH D.R., 1978. Spherical Harmonic Models of the Geomagnetic Field.

- Geomagnetic Bulletin 8.Inst. of Geol. Sci. London. England. p 1-66.
- BARTELS J., 1936. The Eccentric Dipole Approximating the Earth's Magnetic Field. J. Geophys. Res., Vol.41, p 225-250.
- CAIN J., 1990. Geomagnetic Field Analysis. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. VanNostrand, Reinhold, N.Y. (Ed. by D.E. JAMES) p 517-522.
- FRASER-SMITH A.C., 1987. Centered and Eccentric Geomagnetic Dipoles and Their Poles, 1600-1985. Rev. of Geoph. Vol.25, p 1-16.
- GIANIBELLI J.C., 1996. Los modelos del Campo Geomagnético. Proc. de la Cuarta Conferencia Latinoamericana de Geofísica Espacial. Tucuman, Argentina. 22-26 de Abril de 1996. Trabajo CC10, p 1-6.
- IAGA-DVWG8, 1996. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Division V, Working Group 8. International Geomagnetic Reference Field, 1995 revision. Geophys. J. Int. Vol.125 p 318-321.
- LANGEL R.A., 1987. The Main Field. Geomagnetism Vol.1, (Ed. by J. JACOBS). Academic Press. N.Y. Chap.3
- LANGEL R.A., 1992. (Guest Editor), The 1991 Revision of the International Geomagnetic Field. J. Geomag. Geoelectr. Vol.44, p 677-897.
- LANGEL R.A., R.H. ESTES, G.D. MEAD, E.B. FABIANO and E.R. LANCASTER, 1980. Initial geomagnetic field model from MAGSAT vector data. Geophys. Res. Letts. Vol. 7 p 793-796.

*Se agradece al Sr. Analista en Redes y Programador Eduardo Surez la Diagramación y Corrección de este trabajo.

*El presente Trabajo se realizó mediante la ayuda de un Subsidio otorgado por La Universidad Nacional de La Plata sobre el tema "Geomagnetismo, Observatorios Permanentes y Relevamientos en Cuencas Sedimentarias".