

LOS POLOS MAGNETICOS DEL PLANETA TIERRA

JULIO CESAR GIANIBELLI

Servicio Meteorológico Nacional, SMN.

Fac. de Cs. Astronómicas y Geofísicas, UNLP.

geofisicogianibelli@yahoo.com.ar

INTRODUCCION. El Campo Magnético Terrestre (CMT), es observado y registrado através de sus componentes vectoriales, llamados elementos del CMT. Las propiedades de este CMT están evidenciadas por la distribución en todo punto $P(x,y,z)=P(\lambda,\phi,a\pm h)$ del planeta por la Intensidad Total ($F=(X^2+Y^2+Z^2)^{1/2}$), y de sus componentes al Norte (X), al Este (Y), en la Vertical (Z) y en la Horizontal ($H=(X^2+Y^2)^{1/2}$). El plano determinado en cada punto P por las componentes Z, F, y H (llamado meridiano magnético) con el plano determinado por las componentes X, Z, (meridiano geográfico), forman un ángulo denominado Declinación (D). La dirección del CMT en P respecto del meridiano geográfico que pasa por P (representado por el plano Z, X), necesita conocer el acimut geográfico de una dirección para su identificación en el terreno (Figura 1).

La componente F forma un ángulo respecto de H que se denomina Inclinación (I). El punto de observación $P(x,y,z)=P(\lambda,\phi,a\pm h)$ esta representado por sus coordenadas geocéntricas (x,y,z) o por su Latitud: λ , por su longitud: ϕ , y por su altura respecto del radio medio a de la Tierra: $a\pm h$ o por su altura h respecto del nivel medio del mar (h nmm). Graficando las observaciones realizadas sobre la superficie de la Tierra, por medio de isolíneas de F se obtiene la característica fundamental de bipolaridad del CMT, con la propiedad de que F en la región ecuatorial es igual a H con $Z=0$ y valor igual a la mitad de F en los Polos. En los polos $F=Z$ y $H=0$ de lo cual podemos decir que $2\cdot H(\text{ecuador}) = 2\cdot F(\text{ecuador}) = F(\text{polo}) = Z(\text{polo})$, aproximadamente. Los mapas de isolíneas de F, H, X, Y, y Z se llaman “Mapas de Isodínas Magnéticas”. Los mapas de líneas de igual valor de la Declinación D se denominan “Mapas de Isógonas” siendo la línea donde $D=0$ llamada “Línea Agónica”. Finalmente los mapas con líneas de igual valor de la Inclinación I se llaman “Mapas de Isoclinas”. La propiedad de tener La Tierra un campo principalmente dipolar implica que la distribución en el espacio, a partir de la superficie terrestre, de las líneas de fuerza poseen una aproximada simetría axial respecto del eje del dipolo. Toda variación de esta propiedad implica tener en cuenta factores anómalos que las altera y su origen esta en el interior terrestre. Las Figuras 1 y 2 muestran las relaciones de los elementos del CMT y su signo.

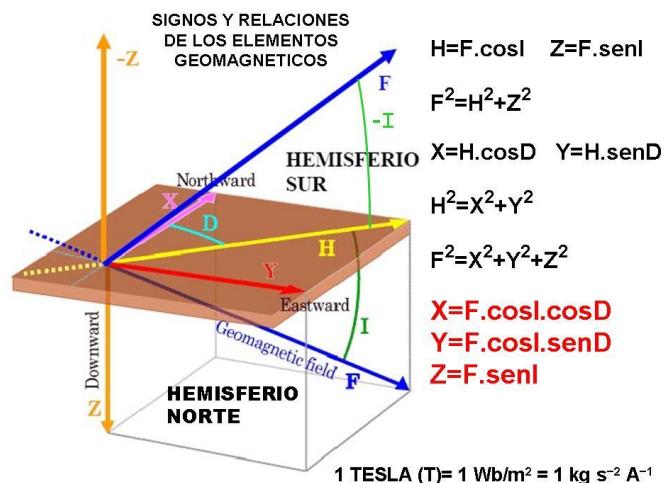
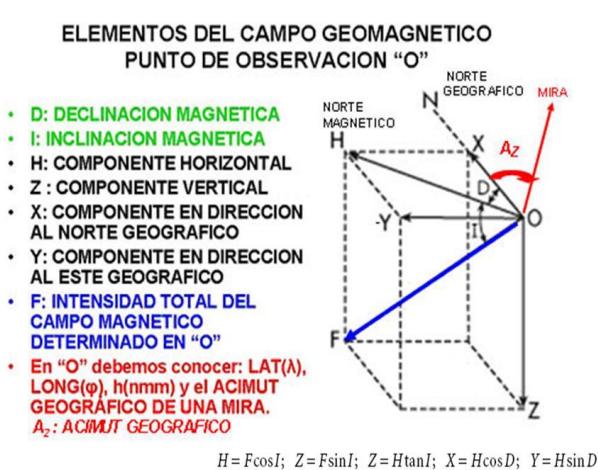


FIGURA 1

Es necesario aclarar que siendo sinónimos los términos “CAMPO MAGNETICO TERRESTRE (CMT)” y “CAMPO GEOMAGNETICO (CG)” su aplicación es diferente. Cuando se hace referencia al CMT se esta en el ámbito del **campo observacional con instrumentos absolutos**, mientras que cuando se hace referencia al CG se esta en el ámbito del modelo que lo representa el llamado “**MODELO INTERNACIONAL GEOMAGNETICO DE REFERENCIA: MIGR**” o por su siglas en inglés “**IGRF**”, el cual esta representado las observaciones por una aproximación multipolar. **Otro aspecto a tener en cuenta es el sistema de coordenadas y los signos de los elementos tanto magnéticos y geomagnéticos descriptos en las Figuras 1 y 2 siendo su razón, el hecho que las observaciones históricas se inicien en el hemisferio norte. Allí la aguja imantada de un inclinómetro (ver item instrumentación) apunta debajo de la horizontal por lo tanto se toman a los elementos I y Z con signo positivo. Por lo tanto en el hemisferio sur tendrán signo negativo.**

INSTRUMENTACION. Los elementos del CMT se miden mediante instrumentales denominados

FIGURA 2

magnetómetros con diversos principios de funcionamiento siendo la brújula y el inclinómetro los más elementales, antiguos y comunes. La brújula, con su aguja imantada pivotando sobre una pínula de eje vertical, como principio de funcionamiento, nos da la dirección al Norte Magnético en cada punto $P(\lambda,\varphi,a\pm h)$ de observación. Para tener determinada la Declinación Magnética se debe conocer el acimut geográfico de una dirección conocida (denominado dirección de referencia o “mira”) en cada punto $P(\lambda,\varphi,a\pm h)$, de tal manera que se conoce la dirección al Norte Geográfico en el círculo graduado de la brújula, si se colocó el “cero” en la dirección de la “mira”. De la misma manera si se dispone una brújula cuya aguja imantada pivotee sobre un eje horizontal ubicada en la dirección Norte-Sur, se denomina Inclinómetro, el cual nos indica en cada punto P de la superficie terrestre como se inclina F . Las Figuras 3 y 4 muestran los conceptos básicos de los Declinómetros (Brújula) e Inclinómetros.

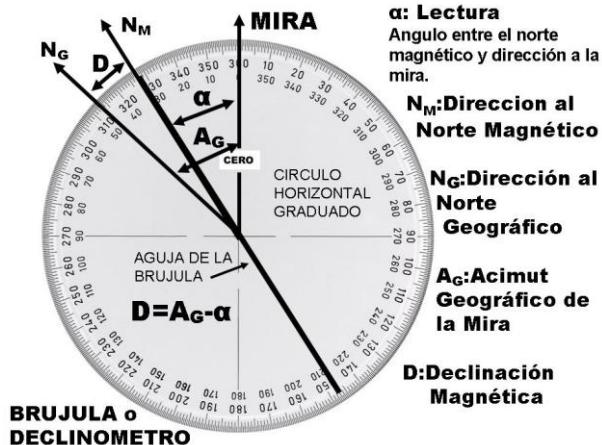


FIGURA 3

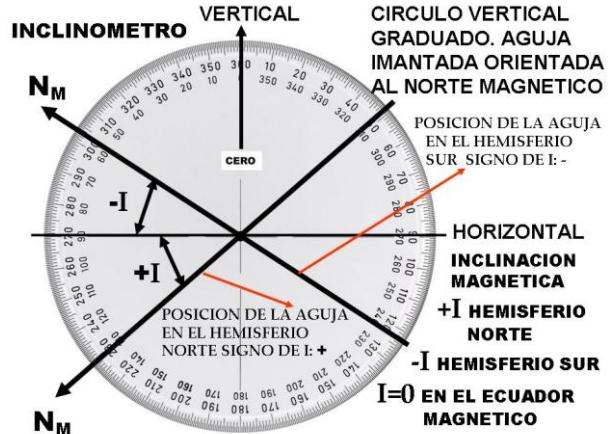


FIGURA 4

Las Figuras 5 y 6 muestran declinómetros e inclinómetros estándares usados históricamente y el instrumental moderno Figura 7.



FIGURA 5



FIGURA 6

FIGURA 7

Estos instrumentos básicos se complementan con la instalación de Observatorios Magnéticos Permanentes (OMP) donde se determina en forma absoluta los elementos geomagnéticos. La Figura 8 muestra la evolución temporal de los OMP y la Figura 9 la red de OMP.

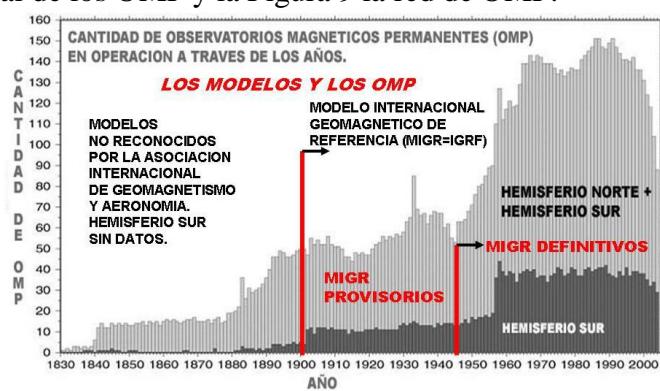


FIGURA 8

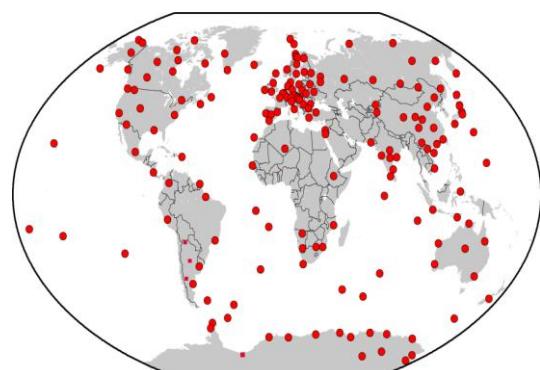


FIGURA 9

En la actualidad los OMP determinan los elementos magnéticos en forma absoluta en intervalos de 1 minuto, con instrumentos llamados variómetros orientados preferentemente al norte magnético. Los elementos registrados por estos variómetros son respecto de una línea de referencia llamada “línea base” cuyo valor se

debe conocer. Los instrumentos absolutos necesarios para la determinación de dicha “Línea de Base” son el Teodolito con Sonda de Compuerta de Flujo (TFG) con el que se determina D e I y el Magnetómetro de Presión Protónica (ppm) con el que se determina F (Figura 7). Los valores de los elementos geomagnéticos en cada punto de la red permanente de OMP, y mediante un análisis en esféricos armónicos brindan una aproximación del CMT observado, mediante una combinación multipolar, ubicados en el centro de la Tierra para la fuente de origen interno, mientras que las fuentes de origen externo es por medio de sistemas de corrientes equivalentes (SCE). Los datos de las observaciones por medio de satélites son un aporte muy importante en esta representación. Es necesario agregar nuevamente que el MIGR es una aproximación del CMT y sus coeficientes nos indican la relación campo externo-campo interno. El modelo esta representado por el siguiente conjunto de ecuaciones para los aportes interno y externo. La corteza terrestre también es modelada por órdenes del dicho desarrollo mayores a 20 (Formulas 1).

MODELO EN ESFERICOS ARMONICOS DEL CMT

$$B = -\nabla U = -\left(\frac{\partial U}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \hat{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi} \hat{e}_\varphi \right) \quad m=0: SP_n^0(x) = P_n^0(x) = P_n(x)$$

$$m \neq 0: SP_n^m(x) = (-1)^m \sqrt{\frac{2(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(x)$$

FUENTES DE ORIGEN INTERNO

$$B_{r_i}(r, \theta, \varphi, t) = -\frac{\partial U_i}{\partial r} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[(n+1) \left(\frac{R_E}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\varphi + h_n^m(t) \sin m\varphi) SP_n^m(\cos \theta) \right]$$

$$B_{\theta_i}(r, \theta, \varphi, t) = -\frac{1}{r} \frac{\partial U_i}{\partial \theta} = -\sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\left(\frac{R_E}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\varphi + h_n^m(t) \sin m\varphi) \frac{dSP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \right]$$

$$B_{\varphi_i}(r, \theta, \varphi, t) = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U_i}{\partial \varphi} = -\sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\left(\frac{R_E}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (-g_n^m(t) \sin m\varphi + h_n^m(t) \cos m\varphi) \frac{mSP_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta} \right]$$

FUENTES DE ORIGEN EXTERNO

$$B_{r_e}(r, \theta, \varphi, t) = -\frac{\partial U_e}{\partial r} = -\sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[n \left(\frac{R_E}{r} \right)^{-n+1} \sum_{m=0}^n (q_n^m(t) \cos m\varphi + s_n^m(t) \sin m\varphi) SP_n^m(\cos \theta) \right]$$

$$B_{\theta_e}(r, \theta, \varphi, t) = -\frac{1}{r} \frac{\partial U_e}{\partial \theta} = -\sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\left(\frac{R_E}{r} \right)^{-n+1} \sum_{m=0}^n (q_n^m(t) \cos m\varphi + s_n^m(t) \sin m\varphi) \frac{dSP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \right]$$

$$B_{\varphi_e}(r, \theta, \varphi, t) = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U_e}{\partial \varphi} = -\sum_{n=1}^{n_{\max}} \left[\left(\frac{R_E}{r} \right)^{-n+1} \sum_{m=0}^n (-q_n^m(t) \sin m\varphi + s_n^m(t) \cos m\varphi) \frac{mSP_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta} \right]$$

FORMULAS 1

Los modelos que son utilizados nacen en 1900.0 con una cantidad de OMP mucho menores que en la actualidad como se muestra en la Figuras 8 y 9. Los aportes porcentuales de todas las fuentes se presentan en la Figura 10.

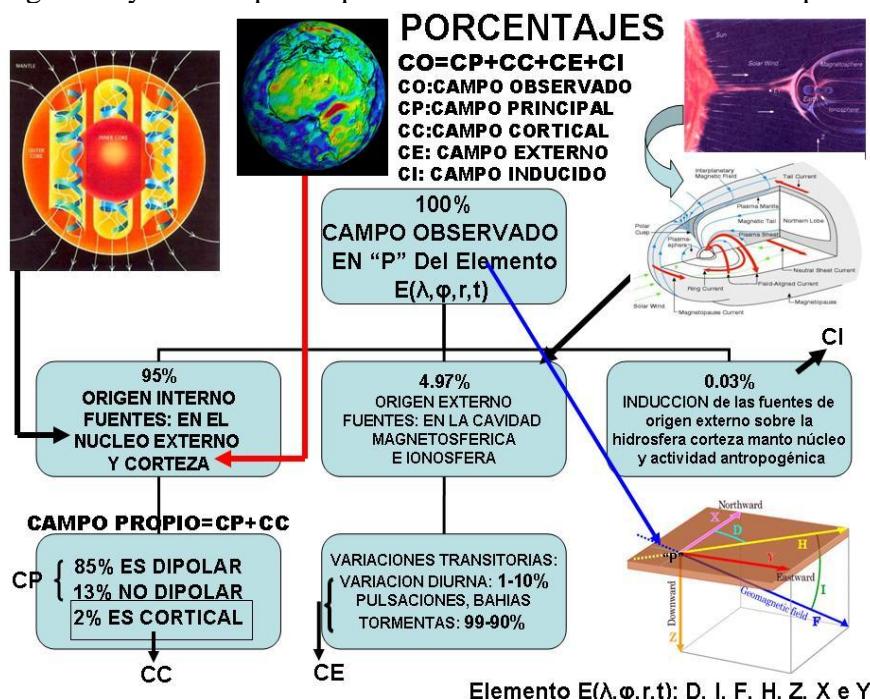


FIGURA 10

La Figura 10 muestra conceptualmente la ubicación de las fuentes donde se representan tres partes NUCLEO EXTERO donde se genera el campo principal, campo cortical en la CORTEZA TERRESTRE (producto de las acumulaciones de mineral magnético) y SCE en la MAGNETOSFERA (producto de la interacción CMT – SOL: SUS RADIACIONES y el VIENTO SOLAR). El SCE, genera procesos de inducción indicadas como corrientes inducidas (CI) en el Océano, Corteza, Manto y Núcleo Terrestre y en todo sistema conductor creado por el hombre. Las Figuras 11, 12 y 13 muestran las curvas isógonas (D), isoclinas (I) e isodinámicas (F), calculadas con el MIGR para 2015. (VER <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html>)

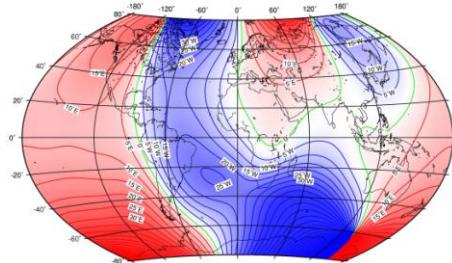


FIGURA 11: D

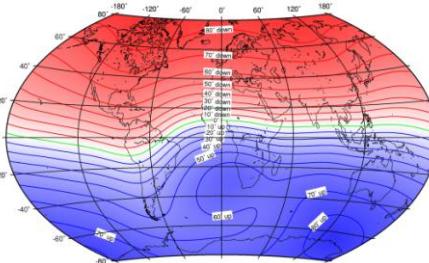


FIGURA 12: I

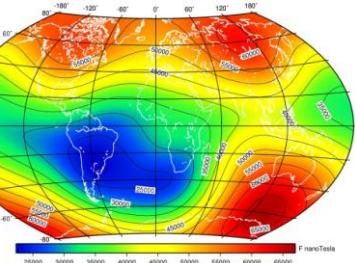


FIGURA 13: F

LOS POLOS MAGNETICOS Y GEOMAGNETICOS. Se definen como POLOS MAGNETICOS a aquellas regiones donde la intensidad total F es vertical. Estas regiones son de difícil ubicación en el terreno por medio de relevamientos, ya que los aportes de la corteza y campo externo contribuyen a la imprecisión. Por lo tanto el modelo MIGR (IGRF) dado por las Formulas 1 es una forma de determinación de dos tipos de polos. El orden $n=1$ corresponde a un dipolo centrado inclinado caracterizando a polos antipódicos llamados “**polos geomagnéticos**”. Si ahora se toman todos los ordenes ($n=1$ a $n= 10$ o 12) del desarrollo en esféricos armónicos, se encuentra la ubicación de la región donde $I=\pm 90^\circ$ en cada hemisferio se determinan los polos de inclinación que no son antipódicos y se los llaman “**dip polos**”. La Figura 13 muestra la ubicación de los **dip polos norte y sur** y en particular la migración del polo norte de la región polar canadiense a la región de la estepa rusa. Los modelos de MIGR desde 1900 hasta 2015 y su predicción para 2020 determinan la ubicación de los **polos geomagnéticos** (en azul) y los **dip polos norte y sur** (en rojo), Figuras 15 y 16.

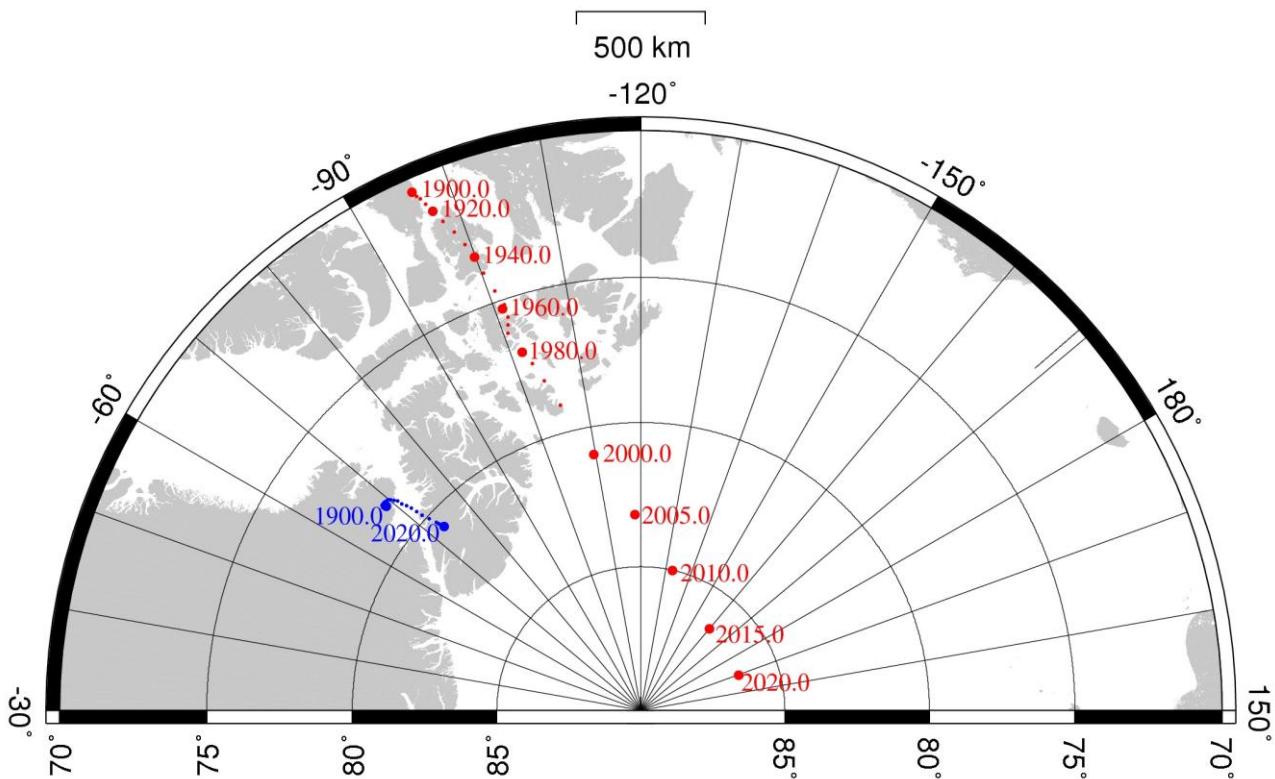


FIGURA 15

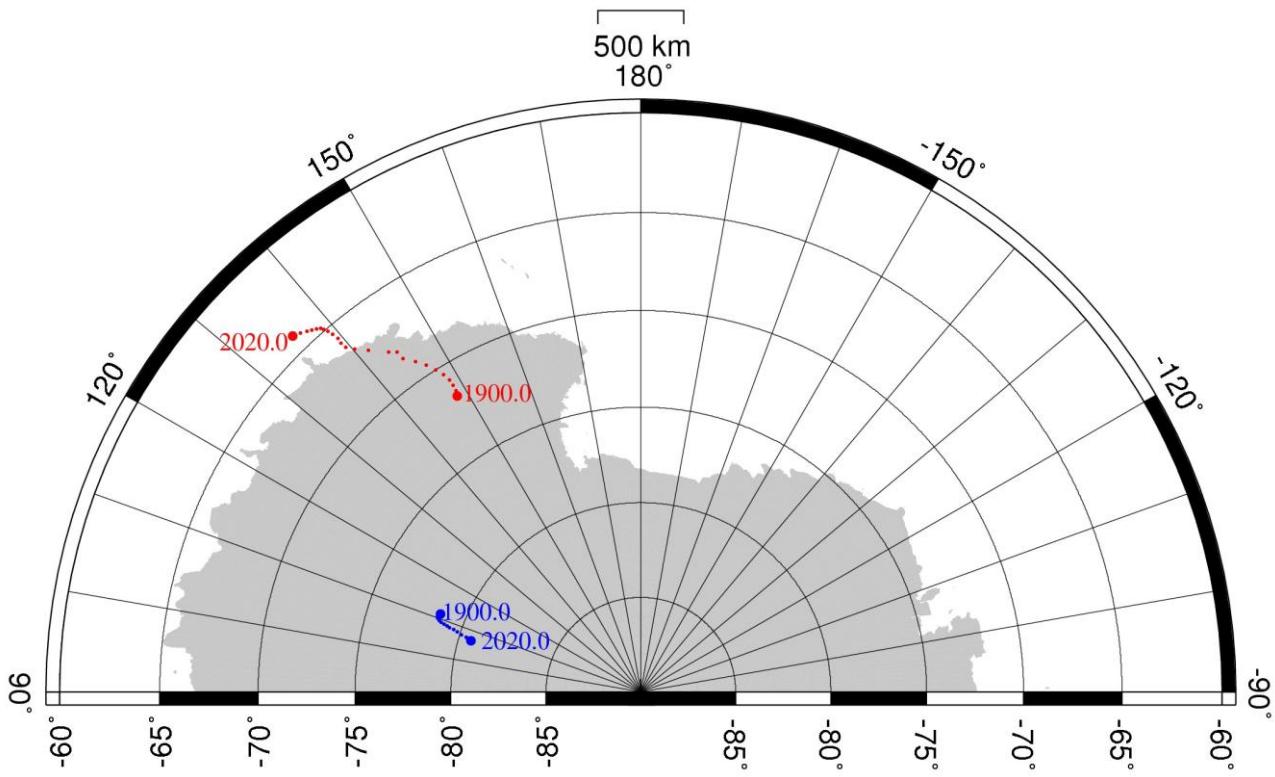


FIGURA 16

El desarrollo en esféricos armónicos dado por el MIGR también permite calcular la energía de cada orden del desarrollo, cuyo aporte el mayor es el de orden $n=1$ correspondiente a un dipolo centrado e inclinado. En la Figura 17 se presentan las características del aporte del dipolo centrado (orden $n=1$) del MIGR, la evolución temporal de la inclinación del eje del dipolo θ , distancia recorrida por el polo norte (igual que el sur por ser antipódico) y cambio temporal de la magnitud B_0 .

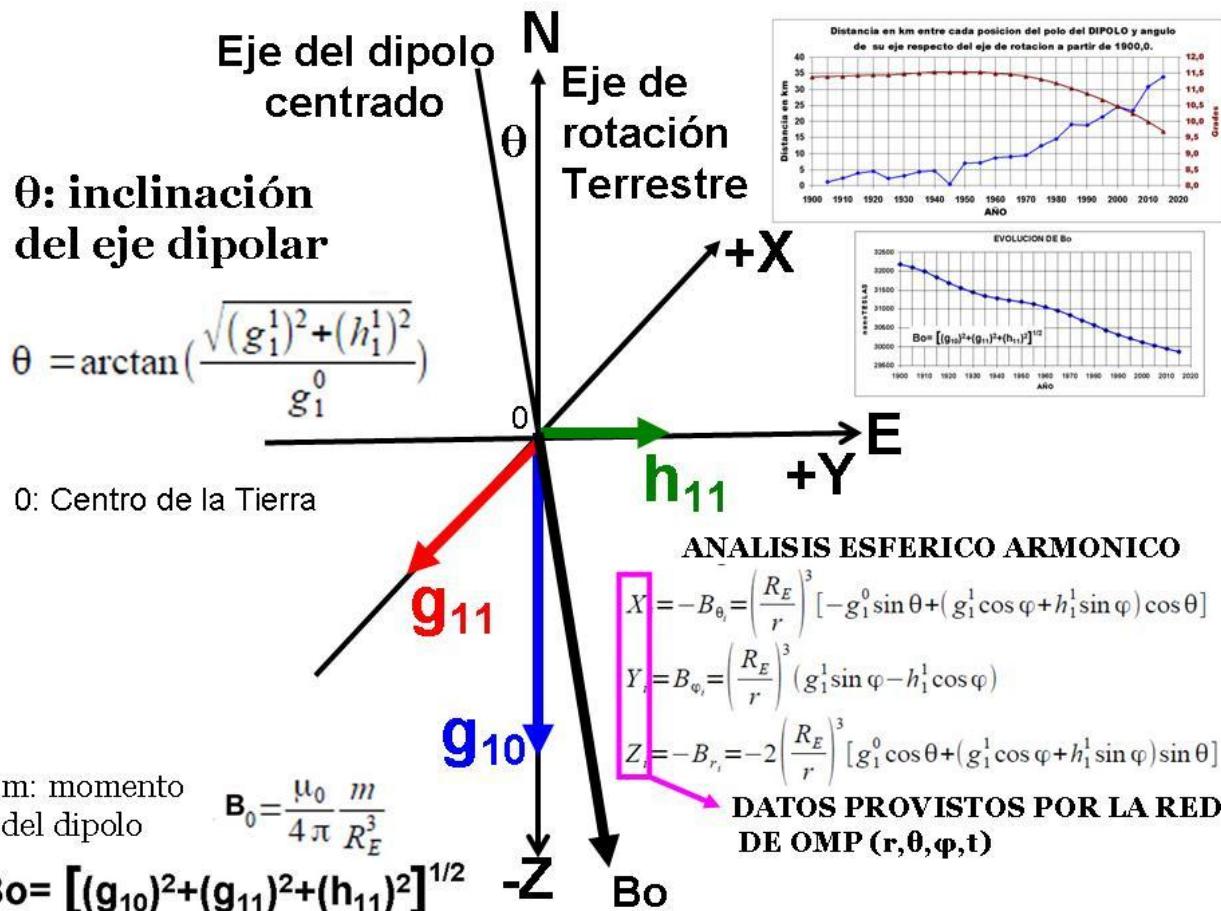


FIGURA 17

Para el cálculo de la distancia que se tiene sobre una esfera de radio equivalente al de la tierra se aplico la siguiente expresión (Formula 2):

**FORMULA DE LA DISTANCIA ENTRE DOS PUNTOS P_1 y P_2
SOBRE UNA ESFERA DE RADIO $r = 6371\text{km}$
SIENDO ϕ LA LATITUD EN RADIANES
y λ LA LONGITUD EN RADIANES DE CADA PUNTO P_1 , P_2**

$$\text{DISTANCIA entre } P_1 \text{ y } P_2 = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

FORMULA 2

Las Figuras 18 a 20 muestran los cambios temporales de los parámetros de orden $n=1$: 1) evolución de la posición del polo norte geomagnético norte y sur por ser antipódicos, 2) ángulo del eje del dipolo disminución a $9^{\circ},5$, en conjunto con la distancia recorrida por el polo del orden de 267km desde 1900 a 2015 y 3) disminución del valor B_0 directamente relacionado con el momento dipolar equivalente.

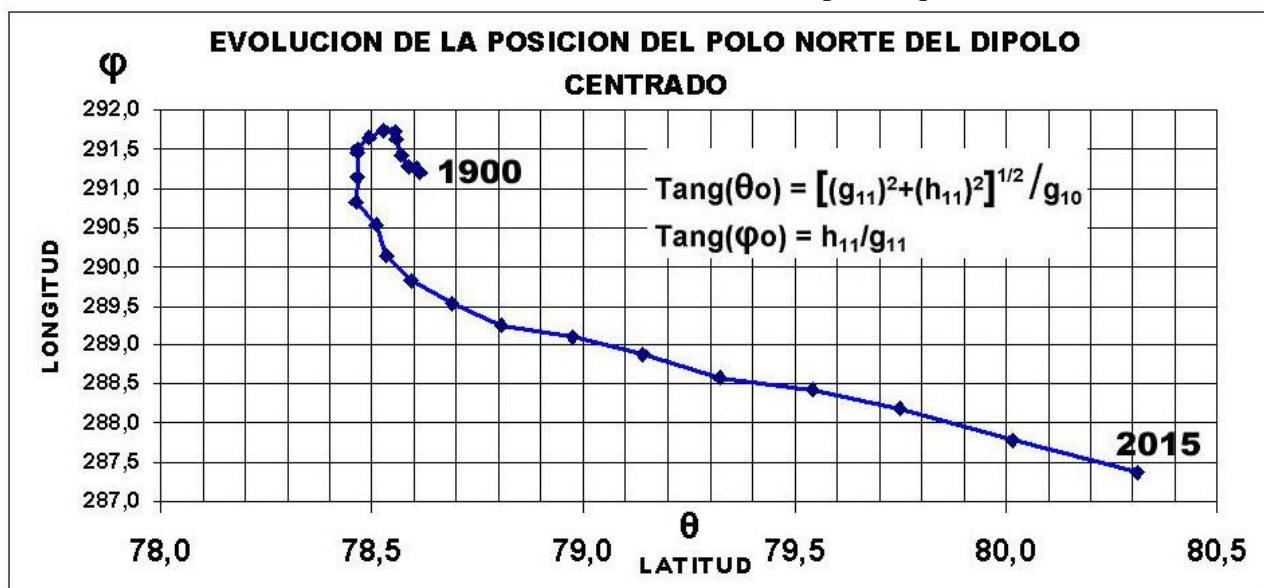


FIGURA 18

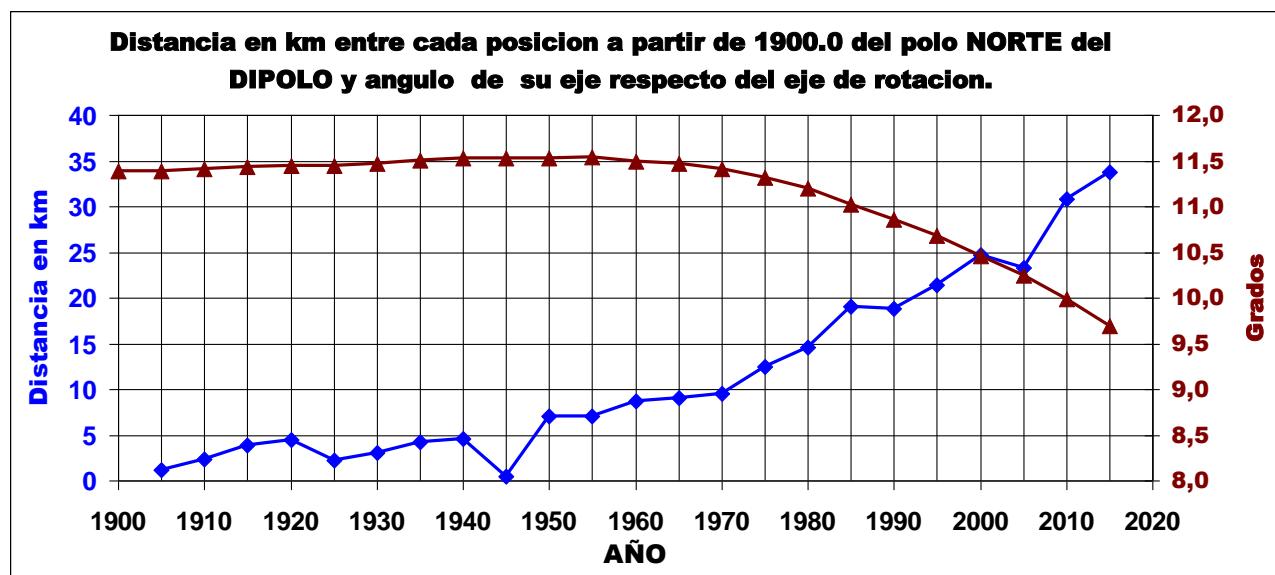


FIGURA 19

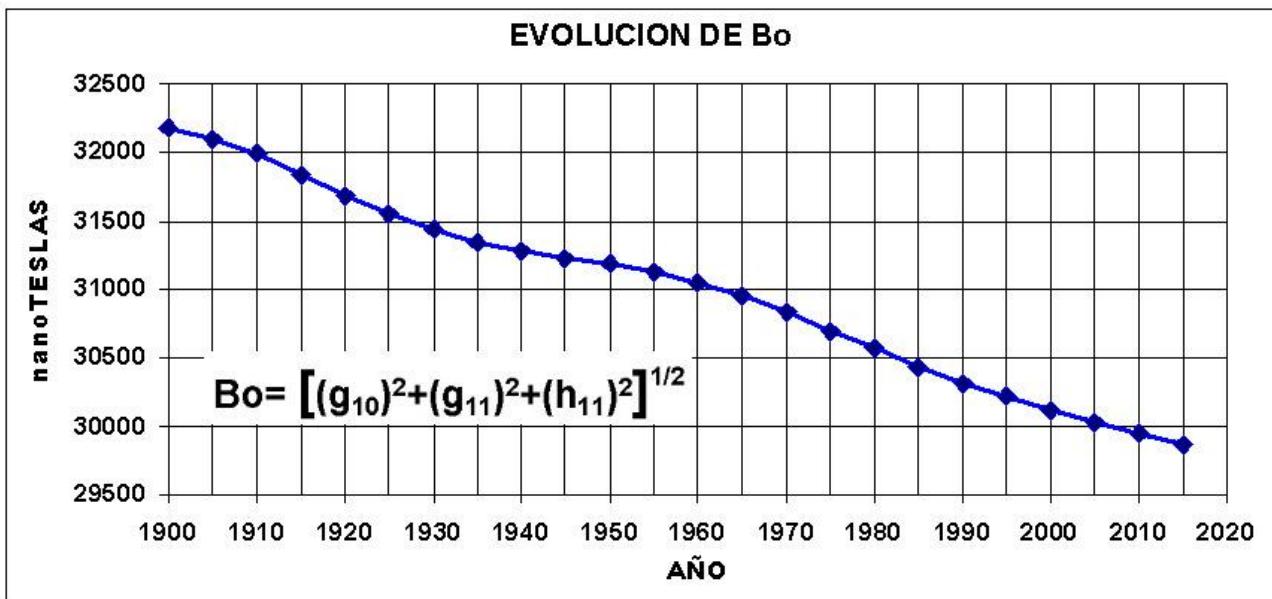


FIGURA 20

En particular es importante determinar la evolución temporal de los parámetros g_{10} , g_{11} , y h_{11} y su variación cada 5 años presentadas en las Figuras 21 a 23

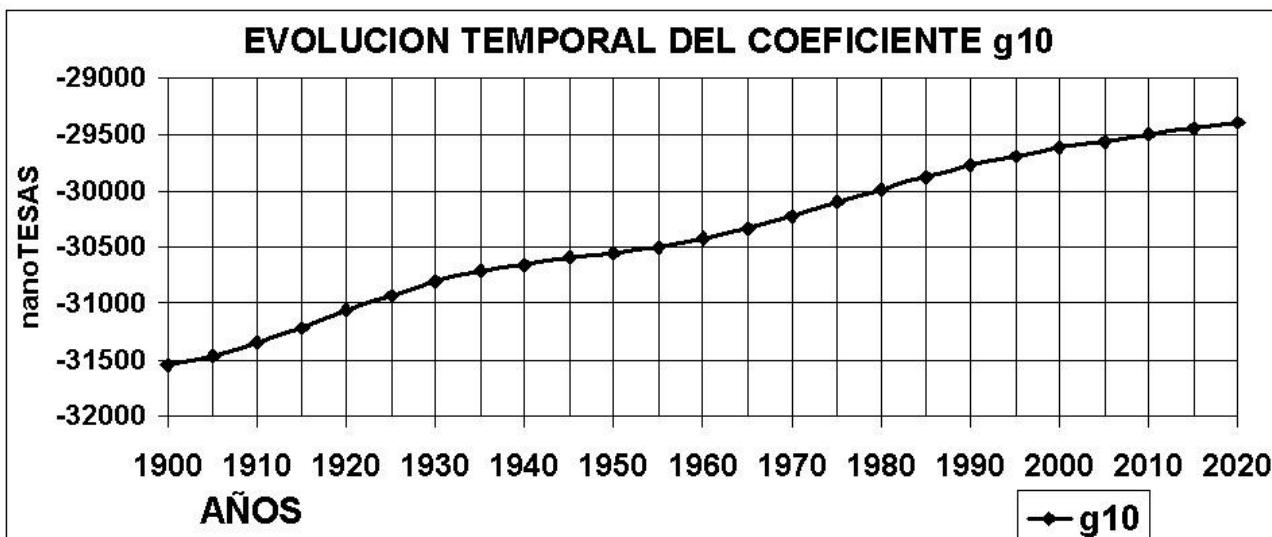


FIGURA 21

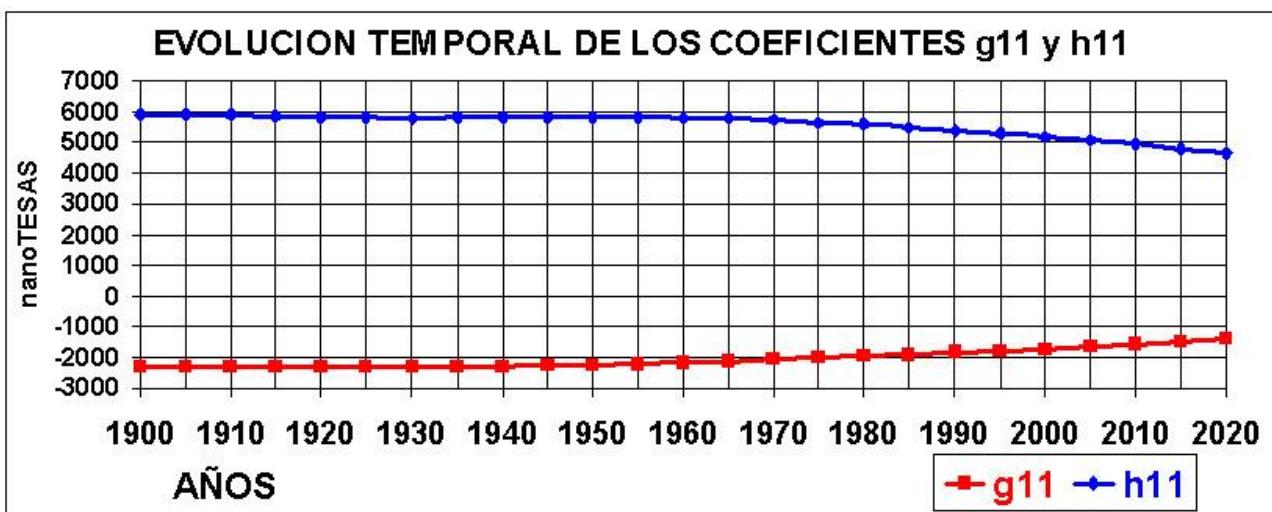


FIGURA 22

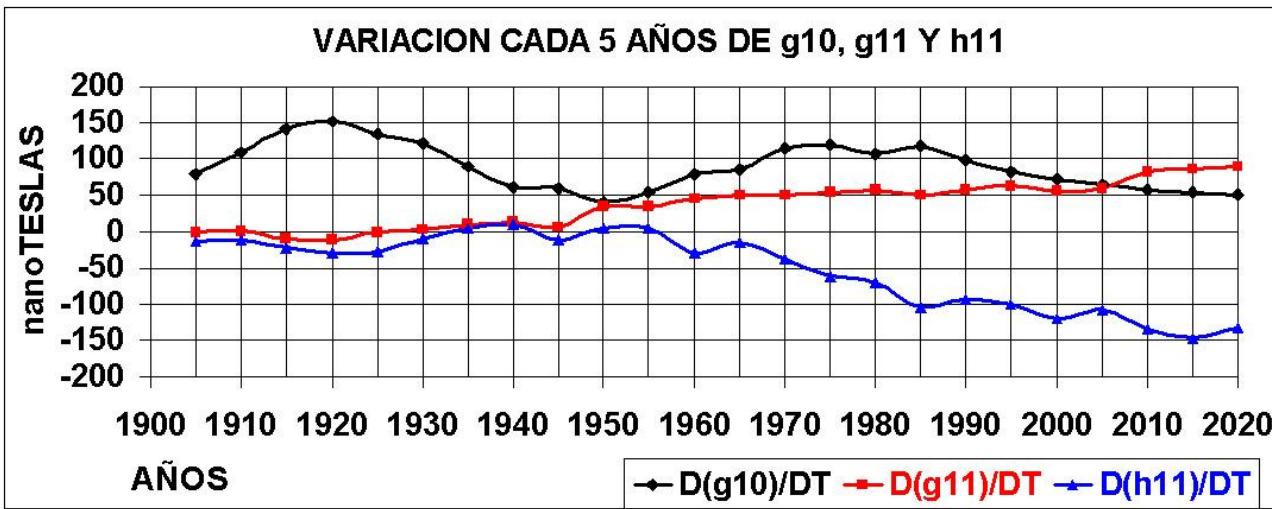


FIGURA 23

Estos resultados del MIGR se relacionan con los aportes de los órdenes con $n \geq 2$, al orden 1 correspondiente al dipolo centrado por medio de las energías de cada orden, dado por estas expresiones (Formulas 3 y 4):

$$W_n = \left(\frac{1}{2n+1} \right) \sum_{m=1}^n \left[(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2 \right]$$

$1 \leq n \leq 10$

FORMULA 3

$$E_i \approx \left\{ \sum_{j=0}^i [(g_i^j)^2 + (h_i^j)^2] \right\}^{1/2}$$

FORMULA 4

Donde las unidades para W_n son $(nT)^2$ mientras que para E_i son en nT . La segunda expresión debe cumplir la condición que $1 \leq i \leq 10$. En este análisis de los aportes energéticos se uso la expresión de W_n utilizando la información de los MIGR dado por el nodo de Kyoto de la IAGA (Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>)

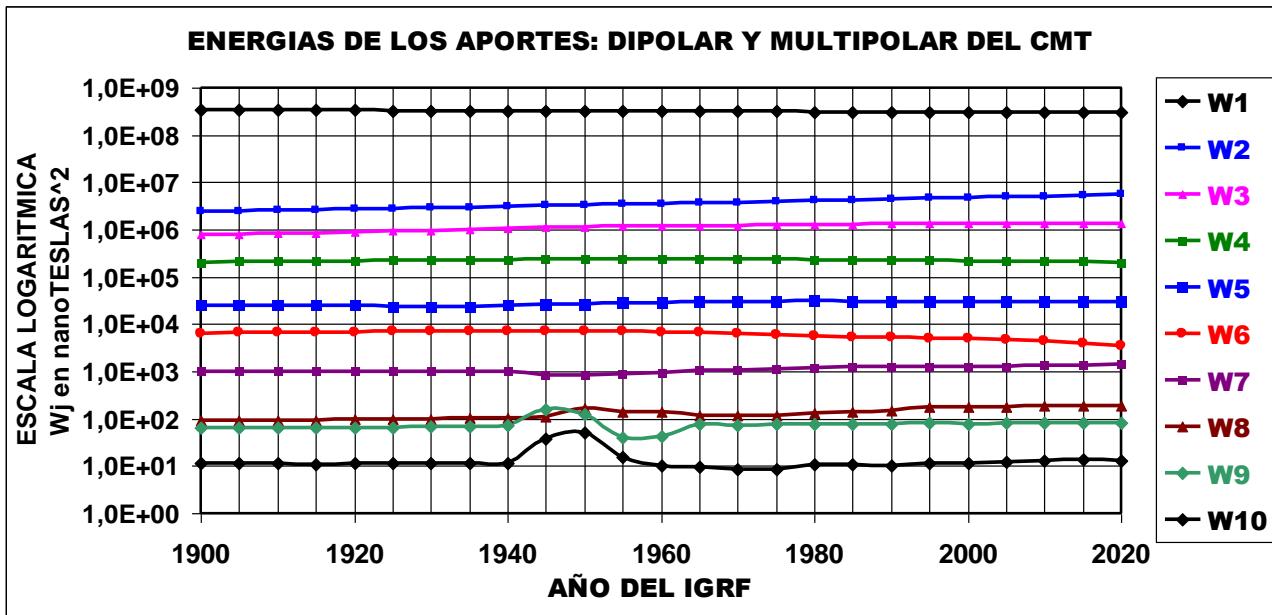


FIGURA 24

La figura 24 muestra claramente que los aportes energéticos de los órdenes mayor o igual a 2 tienen magnitudes de W_n apreciablemente menores que el orden 1 correspondiente al dipolo centrado, pero también los órdenes de 2 a 5 son los importantes para una mejor aproximación del campo observado de origen interno o principal. En porcentuales relativos a W_1 como se observa en la Figura 25 indicarían que los aportes multipolares son determinantes para mostrar que la tendencia de disminución progresiva de W_1 frente a las

energías W_n con $n \geq 2$, conducirían en el futuro a una expresión en superficie de una posible situación de multipolaridad.

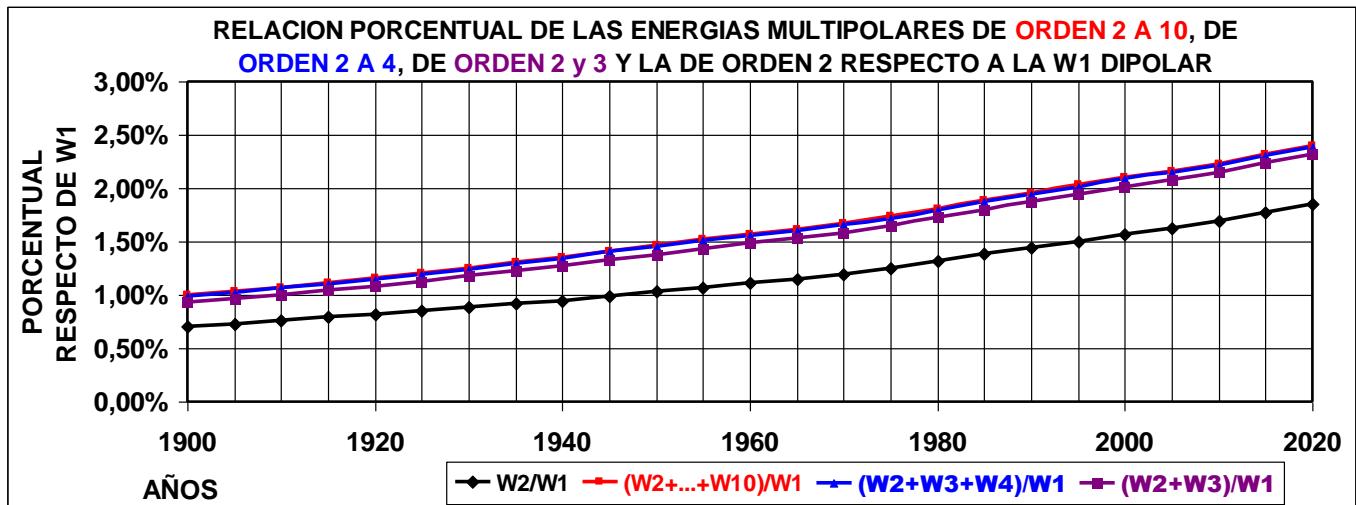


FIGURA 25

La Figura 26 se presenta la importancia del aporte porcentual de las energías (W_2+W_3) respecto de la W_1 en su evolución temporal hasta el año 2100 respecto de la relación W_2/W_1 . Este resultado en detalle, es un estímulo para encontrar la respuesta a la pregunta siguiente: *¿Es posible que energías de órdenes de magnitud menores respecto a la dipolar conduzcan a una multipolaridad del campo principal?*. El aporte que el campo real medido en superficie esta relacionado en la calidad de datos que se toman para producir el MIGR (IGRF), cada 5 años con la mejor precisión para predecir sus estados futuros.

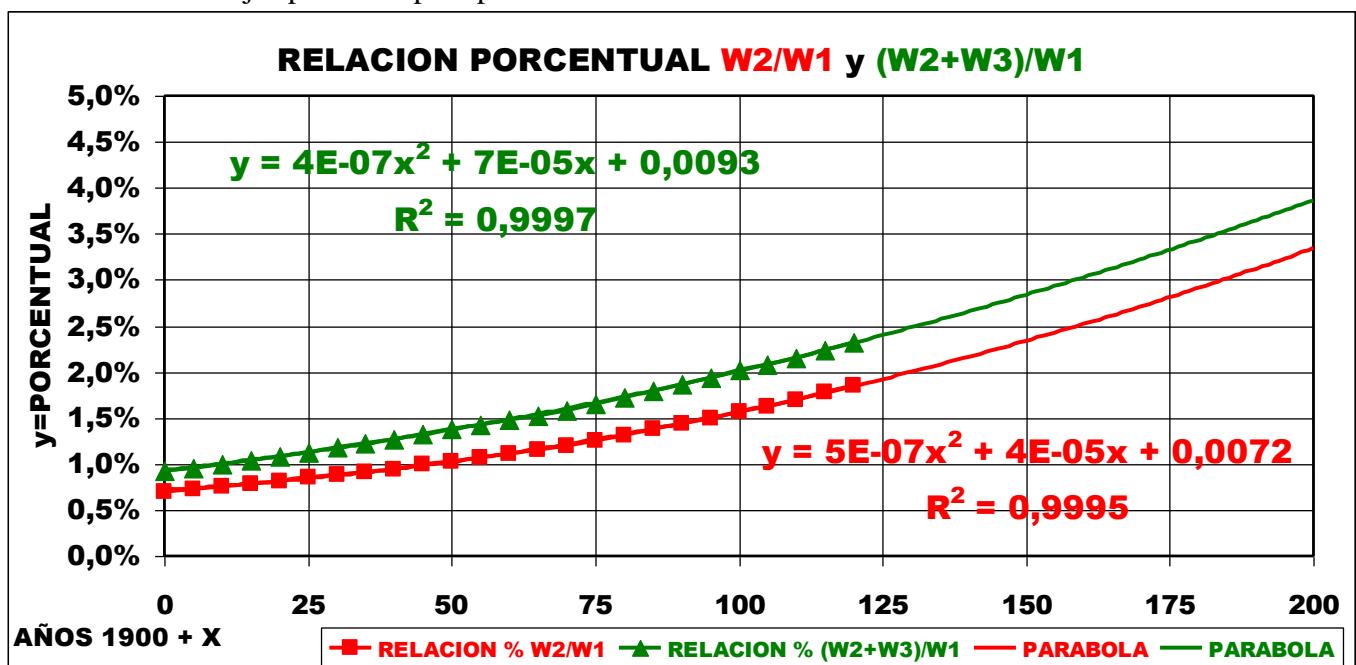


FIGURA 26

Del MIGR se desprenden las definiciones de “polos geomagnéticos” a partir de los parámetros del orden 1 de este desarrollo, y de polos de inclinación “dip polos” cuando se usan todos los ordenes del desarrollo $1 \leq n \leq 10$ y se determinan las posiciones de los polos “dip” para los cuales $Z=F$ e $I=90^\circ$. estos polos no son antípódicos. La tabla 1 se tienen las latitudes y longitudes de cada polo y la época correspondiente al MIGR (IGRF). La formula 2 se usa nuevamente para determinar la evolución de sus posiciones en la calota norte y sur de la Tierra.

FORMULA DE LA DISTANCIA ENTRE DOS PUNTOS P_1 y P_2

SOBRE UNA ESFERA DE RADIO $r = 6371\text{km}$

SIENDO ϕ LA LATITUD EN RADIANES

y λ LA LONGITUD EN RADIANES DE CADA PUNTO P_1 , P_2

$$DISTANCIA_{entre P_1 y P_2} = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

FORMULA 2

MIGR- IGRF	Dip POLO NORTE		Dip POLO SUR	
	Epoch	Latitud	Longitud	Latitud
1900.0	70.46	-96.19	-71.72	148.32
1905.0	70.66	-96.48	-71.46	148.55
1910.0	70.79	-96.72	-71.15	148.64
1915.0	71.03	-97.03	-70.80	148.54
1920.0	71.34	-97.39	-70.41	148.20
1925.0	71.79	-98.00	-69.99	147.63
1930.0	72.27	-98.69	-69.52	146.79
1935.0	72.80	-99.34	-69.06	145.77
1940.0	73.30	-99.87	-68.57	144.60
1945.0	73.93	-100.24	-68.15	144.44
1950.0	74.64	-100.86	-67.89	143.55
1955.0	75.18	-101.41	-67.19	141.50
1960.0	75.30	-101.03	-66.70	140.23
1965.0	75.63	-101.34	-66.33	139.53
1970.0	75.88	-100.98	-66.02	139.40
1975.0	76.15	-100.64	-65.74	139.52
1980.0	76.91	-101.68	-65.42	139.34
1985.0	77.40	-102.61	-65.13	139.18
1990.0	78.09	-103.68	-64.91	138.90
1995.0	79.09	-105.42	-64.79	138.76
2000.0	80.97	-109.64	-64.66	138.30
2005.0	83.19	-118.24	-64.65	137.85
2010.0	85.02	-132.84	-64.43	137.32
2015.0	86.29	-160.06	-64.28	136.59

TABLA 1

Estas posiciones de los Dip Polos Norte y Sur se encuentran marcadas en rojo en las Figuras 15 y 16. Las distancias recorridas a partir de la posición determinada en 1900.0 de cada Dip Polo Norte y Sur se calcularon mediante la aplicación de la Formula 2 los resultados se presentan en la Figura 27.

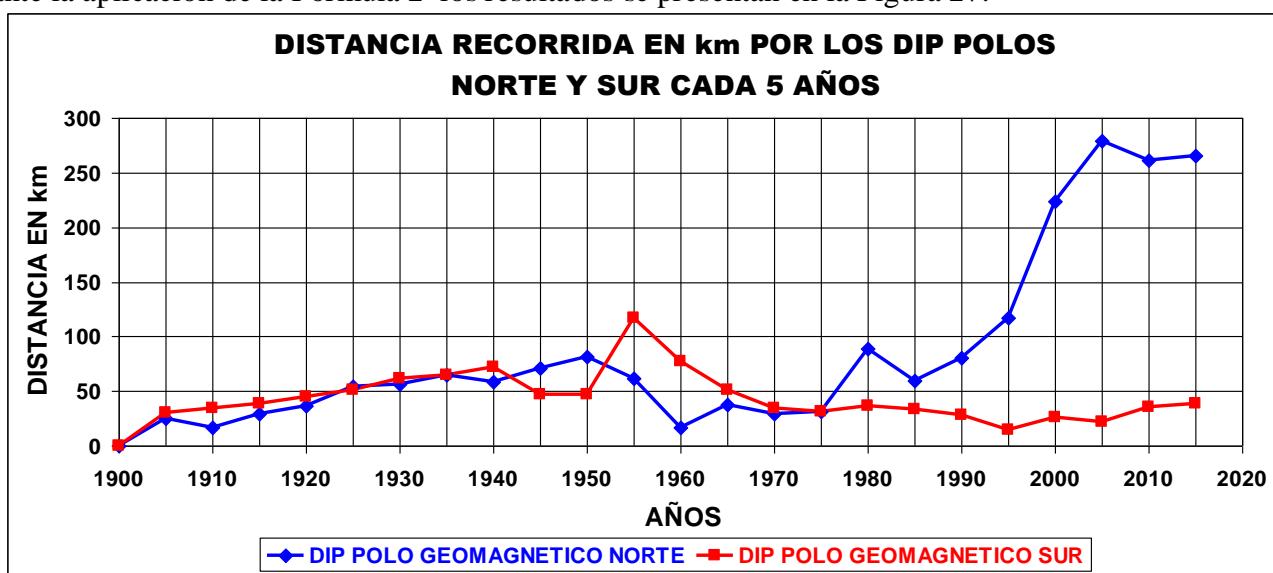


FIGURA 27

La distancia desde el año 1900.0 hasta 2015.0 por el Dip Polo Norte es de 2047.7 km, mientras que el Dip Polo Sur es de solo 1039.4 km. Así mismo las velocidades en km/año y las aceleraciones medias en km/(año²) se tienen en la Figuras 28 y 29.

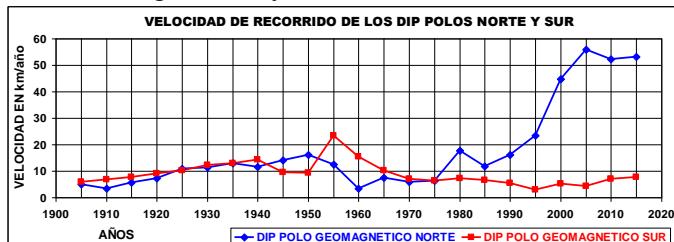


FIGURA 28

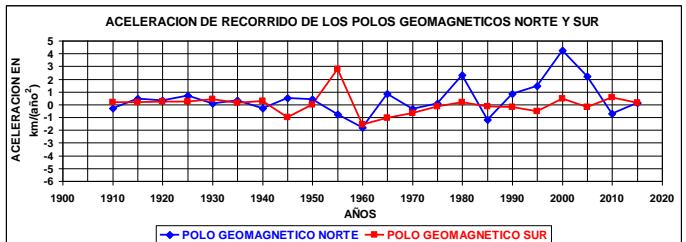


FIGURA 29

Estos resultados permiten estimar la migración de Dip Polo Norte mientras que el sur es más estable. El modelo del MIGR o IGRF para el 2010 muestra las isodinas de F en la Figura 30 con las anomalías características numeradas de 1 a 4: **1 y 2** correspondiente a los Dip Polo Norte donde se evidencia la migración ante dicha, **3** correspondiente al Dip Polo Sur con una intensidad notablemente mayor que el Norte, y la **4** correspondiente a la gran Anomalía Magnética del Atlántico Sur (AMAS). Es importante recalcar los valores en nT característicos de cada región (1 a 4) pues están directamente relacionadas con los procesos de difusión del campo magnético producido por el geodinámico.

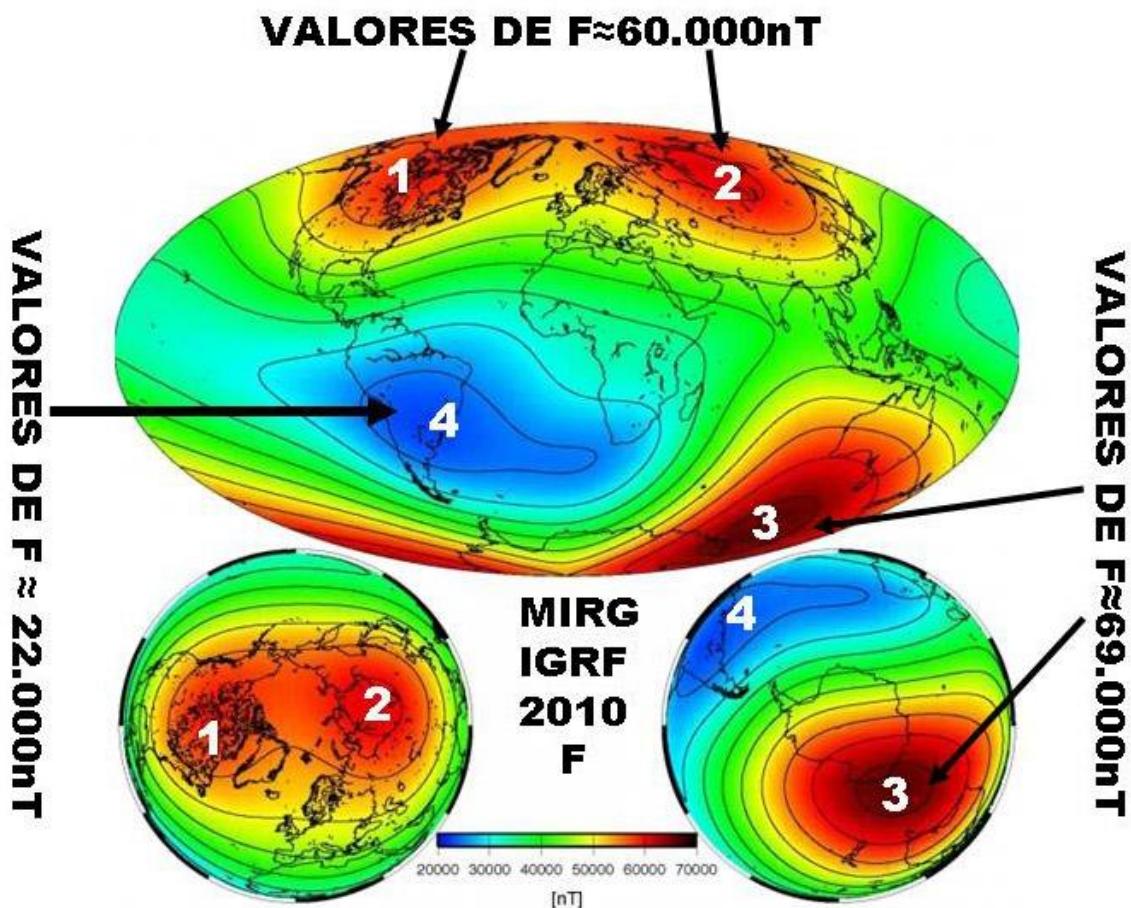


FIGURA 30

RESUMEN. En este resumen se presentan los puntos importantes a considerar: **1)** Los polos magnéticos reales del planeta Tierra son regiones en la superficie determinadas por relevamientos donde se pueda medir la Inclinación $I = 90^\circ$ en forma absoluta, lo cual no se ha logrado a la fecha. Aún si fuera posible esta determinación esta compuesta por los aportes de la corteza y las corrientes magnetosferitas e ionosféricas. **2)** La red de OMP permite la generación de un modelo de aproximación del campo principal (geodinamo) con una combinación de dipolos ubicados en un sistema de ejes geocéntricos ortogonales, basado en el desarrollo en esféricos armónicos, hasta el orden $n=10$ o 12, llamado MIGR (IGRF). De este desarrollos se deducen dos definiciones: **2.1.-** El campo generado por un dipolo centrado e inclinado correspondiente a $n=1$ cuyos polos en la superficie son antipódicos, llamados **POLOS GEOMAGNETICOS**, y **2.2.-** El modelo completo con $1 \leq n \leq 10$ o 12 determinándose las regiones donde la Inclinación $I=90^\circ$ llamándose a estas regiones **DIP POLOS**,

los mismas no son antipódicos y de valores diferentes. También este modelo muestra las regiones anómalas en superficie de todos los elementos geomagnéticos siendo I, D, y F las mas importantes. Este modelo es generado cada 5 años desde 1900 hasta el 2015 con predicción de sus coeficientes hasta el 2020.

EL DIPOLO EXCENTRICO. Los resultados enumerados en el precedente resumen, y la aplicación al modelo MIRG de los métodos de optimización para determinar la posición de un **dipolo excéntrico**, paralelo al centrado y con su misma inclinación, que cumpla con la condición de minimizar los aportes de n=2 correspondiente al aporte cuadrupolar. Su utilidad es más que académica ya que la problemática reside en un problema de simetría del sistema de aproximación multipolar al efecto de la circulación del material fluido altamente conductor residente en el Núcleo Externo de la Tierra, que por un proceso magnetohidrodinámico se genera una dinamo autoexcitada llamada Geodínamo. En la Figura 31 se tienen las características del dipolo excéntrico y en la Figura 32 las formulas de cálculo de la distancia de desplazamiento \mathbf{r}_E y de la latitud θ_E y longitud λ_E del polo norte del dipolo excéntrico.

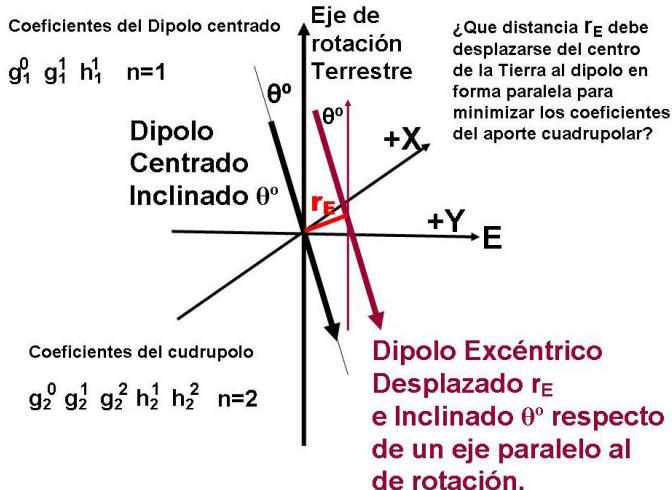


FIGURA 31

LAS ECUACIONES QUE PERMITEN CALCULAR LA DISTANCIA \mathbf{r}_E LA LATITUD θ_E y LONGITUD λ_E DEL POLO NORTE DEL DIPOLO EXCENTRICO SON:

$$\eta = (L_1 - g_1^1 \cdot E) / (3 \cdot B_0^2)$$

$$\zeta = (L_2 - h_1^1 \cdot E) / (3 \cdot B_0^2)$$

$$\xi = (L_0 - g_1^0 \cdot E) / (3 \cdot B_0^2)$$

Con r_o = radio de la Tierra

$$r_E = (\eta^2 + \zeta^2 + \xi^2)^{1/2} \cdot r_o$$

$$\theta_E = \tan^{-1}\{\(\zeta^2 + \eta^2)^{1/2} / \xi\}$$

$$\lambda_E = \tan^{-1}(\zeta / \eta)$$

FIGURA 32

La evolución temporal del desplazamiento \mathbf{r}_E se grafica en la Figura 33. La Fig. 34 muestra la velocidad de cambio en km/año del desplazamiento \mathbf{r}_E mientras que en la Fig. 35 el cambio del polo norte según su latitud θ_E y su longitud λ_E .

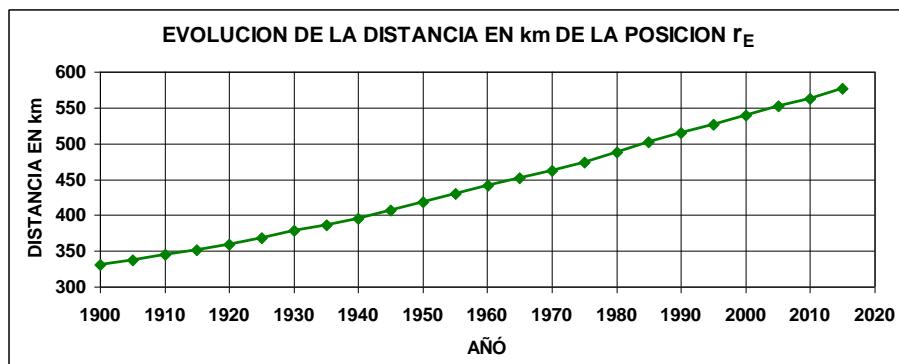


FIGURA 33

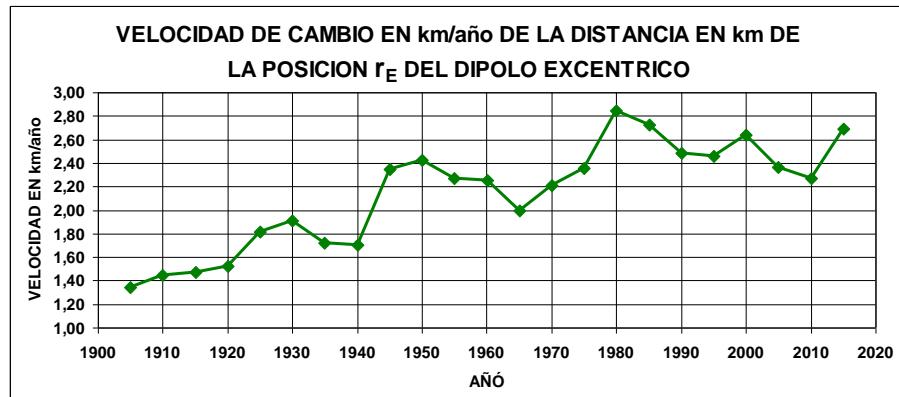


FIGURA 34

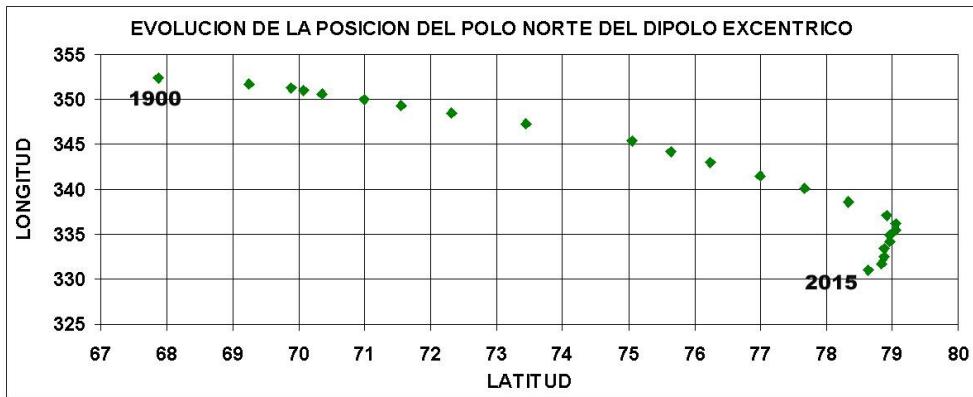


FIGURA 35

La Figura 35 muestra la posición del polo norte y en la Figura 36 la evolución de la distancia y en la Figura 37 la velocidad en km/año respecto de la posición del polo norte del dipolo excéntrico para 1900.0.



FIGURA 36

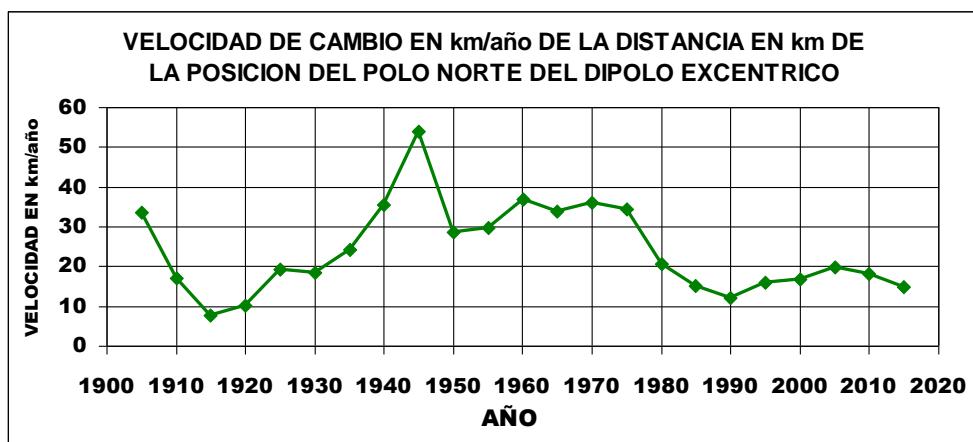


FIGURA 37

Estos resultados tienen la importancia de analizar en los futuros modelos MIGR de que manera cambia este dipolo equivalente y su uso en los procesos de interacción Sol-Tierra y en especial los efectos de los sistemas de corrientes de la magnetosfera, tal como la corriente anillo. Finalmente en la Figura 38 se muestra en la evolución de los tres polos norte (geomagnético, dip polo y polo norte del dipolo excéntrico).

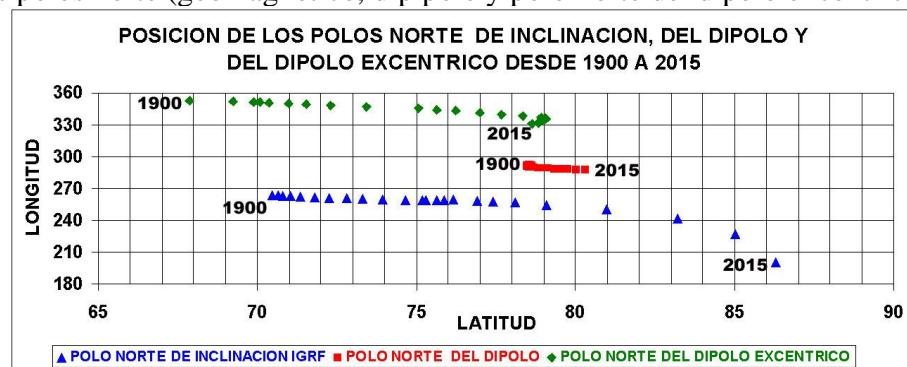


FIGURA 38

Los tres tipos de polos dados por el modelo MIGR (polos geomagnéticos, dip polos, y dipolo excéntrico) no son mas que una herramienta para tratar de comprender la forma que el geodínamo difunde el campo principal. Los fenómenos anómalos observados en superficie se pueden resumir en la evolución de las isodínas de F desde el 1600 hasta el 2100 como pronostico presentadas en la Figura 39.

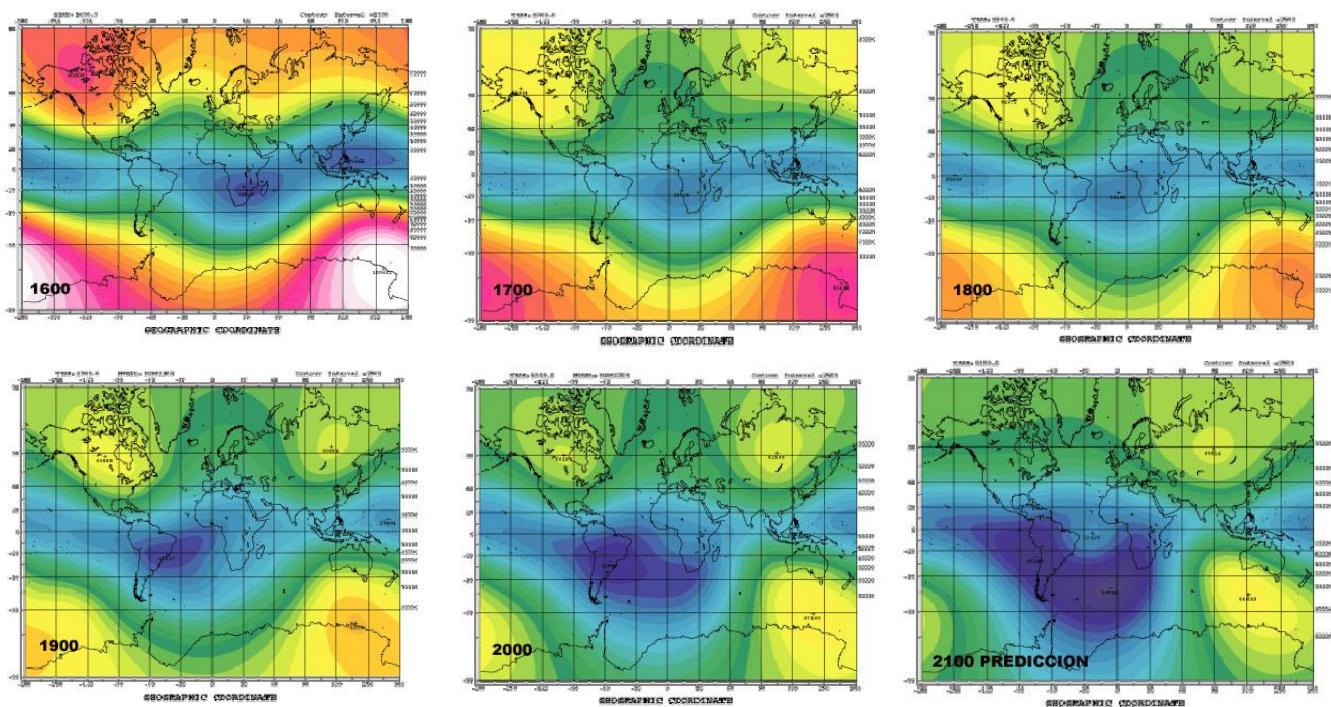


FIGURA 39 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>)

Esta Figura 39 en una edición del año 2005 estaba compuesta por la predicción para el año 2100 la cual fue borrada del archivo un año después, sinembargo esta predicción es posible calcularla por los cambios de los promedios anuales de F, desde el polo norte al polo sur de todos los OMP del continente Americano y Antártida.

CONCLUSION. La evolución del campo principal representado por MIGR (IGRF) es en la actualidad de referencia indicativa de que su cambio en 400 años y predicción a 100 años en el futuro, conduce a aspectos complejos que podrían aparecer, si la hipótesis de tendencia a una multipolaridad es factible, en especial en la relación Sol-Tierra. El efecto de la SAMA se traduce en altura produciendo una deformación de los anillos de radiación. Esta consecuencia se intensificara al continuar la disminución de F, indicando que los factores de variabilidad de la llamada Climatología Espacial tiene actores exógenos y endógenos en la actividad magnetosférica. La clasificación de los polos magnéticos del planeta Tierra dado por el MIGR conduce a una clasificación más amplia. Se llaman Polos Magnéticos a aquellos que en superficie cumple con la condición de observar $I=\pm 90^\circ$ ($F=Z$) determinado mediante un relevamiento superficial, mientras que Geomagnéticos a aquellos determinados por el MIGR. Según <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html> estos polos geomagnéticos se clasifican en **polos propiamente geomagnéticos** a los determinados por el orden 1 del desarrollo y **polos de inclinación** ($I=\pm 90^\circ$ dip polos) determinado con todos los ordenes (1 a 10) del desarrollo del modelo. A esta clasificación se le agrega el modelo de dipolo excéntrico, no contemplado en la página del bgs antedicho. Lo mas interesante esta en el cambio de inclinación del eje del dipolo (MIRG orden $n=1$) que desde el 1900 ha disminuido casi 2° respecto del eje de rotación. La disminución del termino B_0 proporcional al momento del dipolo equivalente y el crecimiento de los aportes de orden 2 y 3 es un indicativo junto a la disminución del campo observado en la SAMA, a incrementar las observaciones en superficie de F.