



GEODINAMICA Y OBSERVATORIOS GEOMAGNETICOS

Julio Cesar Gianibelli
Invited

Departamento de Geomagnetismo y Aeronomía, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata. Paseo del Bosque s/n, 1900, La Plata – Argentina.
E mail: jcg@fcaglp.unlp.edu.ar

Palabras Claves: Geomagnetismo, IGRF, variaciones, Observatorios, ciclo solar.

RESUMEN

Dentro de los procesos geodinámicos, la generación del Campo Magnético Terrestre (CMT), involucra una amplia interacción de escenarios que interconectan eventos que se detectan a través de la Red Permanentes de Observatorios Geomagnéticos (RPOG). Desde la conexión Sol-Tierra, hasta el proceso de difusión del CMT y sus cambios observados en superficie, tal como la gran Anomalía Magnética del Atlántico Sur (AMAS), detectado mediante la RPOG se generan nuevos paradigmas en la investigación. En este trabajo se analizan los resultados presentados por la variación de la energía del CMT representada por el efecto dipolar y cuadrupolar determinado por el desarrollo en esféricos armónicos del efecto de la dínamo autoexcitada residente en el núcleo externo de La Tierra y su posible relación con el ciclo solar. Para una mejor apreciación de esta fenomenología se analizó la evolución temporal, para el intervalo 1900-2010, de la variación secular determinada por medio del Modelo Internacional de Campo Geomagnético de Referencia (IGRF: International Geomagnetic Reference Field por sus siglas en inglés), para un perfil a través del continente Americano y en 23 Observatorios de la RPOG, desde el Polo Norte al Polo Sur. Los resultados muestran que existen periodos en la banda del ciclo solar, y que utilizando un modelo no armónico de representación de la variación secular es posible predecir para la próxima centuria la evolución de la AMAS. Se presenta además un análisis particularizado para el Observatorio Geomagnético de Pilar (Lat: 31° 40' 03"S; Long: 63° 52' 53" W.) de los cambios temporales observados sobre los residuos resultantes de la substracción del valor del IGRF sobre los valores medios anuales registrados y su relación con la cantidad de terremotos de profundidad hipocentral entre 500km y 800km. Los resultados muestran una correlación de los eventos apreciable. Se concluye que los modelos presentan componentes de origen externo que influyen el comportamiento de difusión de CMT y que fenómenos geodinámicos de origen endógeno se superponen a los observado y modelado.

ABSTRACT

In the set of geodynamical processes, the generation of Earth's magnetic field (EMF) involves a wide interaction scenarios which interconnects events detected by means of the Permanent Magnetic Observatories Network (PMON). From the Earth-Sun connection to the diffusion process of the EMF and its changes observed at surface, such the great South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA), detected by means of PMON, it is generate new paradigms in science investigation. In this work, the results due to EMF energy variations with dipolar and quadrupolar effects represented by means of spherical harmonics expansion of autoself-excited dynamo within the external core of the Earth and its possible relationship with the solar cycle are analyzed. For a better appreciation of this phenomena, the temporal evolution of secular variation calculated over time interval 1900.0-2010.0 from International Geomagnetic Reference Field (IGRF) model, is analyzed for a profile drawing through American Continent and 23 Magnetic Observatories from North Pole to South Pole. The results shows periods in the solar cycle band, and that if a non harmonic model representing secular variation is used, then it is possible to predict the AMAS evolution up to next century. Moreover, an analysis for Pilar Magnetic Observatory (Lat: 31° 40' 03"S Long: 63° 52' 53" W.) is presented, which covers temporal changes observed over residuals resulting after subtraction of IGRF values to monthly mean values and its relationship with the amount of earthquakes with hypocentral depths between 500 Km and 900 Km. The results shows a good correlation with these earthquake events. It is concluded that the models presents components of external origin which influences the EMF diffusion behaviour, and that geodynamical phenomena of internal origin are superimposed to the observed and model values.



INTRODUCCION

Los procesos geodinámicos poseen fuentes endógenas y exógenas cuya expresión se manifiesta en el comportamiento de diferentes ámbitos. La expresión “Geodinámica y Observatorios Geomagnéticos” tiene como finalidad relacionar diversos fenómenos caracterizados por variables que representan escenarios donde los cambios tienen diversas escalas temporales de comportamientos. El objetivo de esta investigación es relacionar la variación de la energía difundida por la dínamo autoexcitada en el núcleo externo de la Tierra y determinada por modelos del CMT (Barraclough, 1978) desde 1550 donde su comportamiento muestra cierta relación con la evolución del ciclo solar en baja frecuencia. La RPOM muestra además que su distribución a pesar de ser heterogénea en la Tierra, es posible delinear un perfil polo norte-sur geomagnético magnético donde se encuentren observatorios de la ROPM para analizar y descubrir periodos de origen solar en su estructura de la variación secular dada por el modelo IGRF, (Langel, 1987). Otro resultado que se presenta y que vincula procesos geodinámicos con los registros en los Observatorios Geomagnéticos es el análisis de la comparación de las variaciones seculares dadas por el modelo del IGRF y el determinado por los valores medios anuales. Para ello se presenta como resultado preliminar e interesante, el posible efecto sobre la variación secular residual (diferencia entre la variación secular del Observatorio geomagnético y la determinada por el IGRF) para el Observatorio Geomagnético de Pilar para el intervalo 1905-2010.

LA ENERGÍA DE LOS EFECTOS DIPOLAR Y CUADRUPOLAR.

Los modelos matemáticos basados en el desarrollo en esféricos armónicos de las observaciones realizadas en superficie y que representan el efecto en superficie terrestre del Geodínamo datan desde 1550. Barraclough (1978) realiza su recopilación, los fundamentos teóricos fueron desarrollados por Gauss (1839), Chapman y Bartels (1940), y Langel (1987) entre otros. Estudios previos sobre la evolución del efecto dipolar producido por el geodínamo fueron realizados por Jackson et al (2000), mientras que estudios sobre su variación secular por De Michelis et al. (2000), Langel et al. (1995), Gianibelli y Kohn (2004) y Gianibelli (2006). Los coeficientes que caracterizan el efecto dipolar del geodínamo son $g_{1,0}$; $g_{1,1}$ y $h_{1,1}$ mientras que los que caracterizan el efecto cuadrupolar son $g_{2,0}$; $g_{2,1}$; $h_{2,1}$; $g_{2,2}$ y $h_{2,2}$. La energía de estos efectos esta dada por la expresión:

$$W_n(t) = \frac{1}{2n+1} \sum_{m=0}^n \left\{ \left[g_n^m(t) \right]^2 + \left[h_n^m(t) \right]^2 \right\} \text{ con } n = 1, 2.$$

La figura 1 muestra la evolución de estas energías en función del tiempo. La metodología fue desarrollada por Gianibelli (2006) y resultados posteriores en Gianibelli (2008a, 2008b) presentan el pronóstico de la evolución de la posición del eje del campo dipolar y su momento hasta el año 2500, como también las peculiaridades del campo geomagnético en la actualidad, representadas por una posible migración del polo magnético norte y amplificación de la AMAS. La energía del dipolo es decreciente desde 1550 mientras que la del cuadrupolo es creciente desde 1785 siendo su magnitud dos ordenes de magnitud menor que la del dipolo.

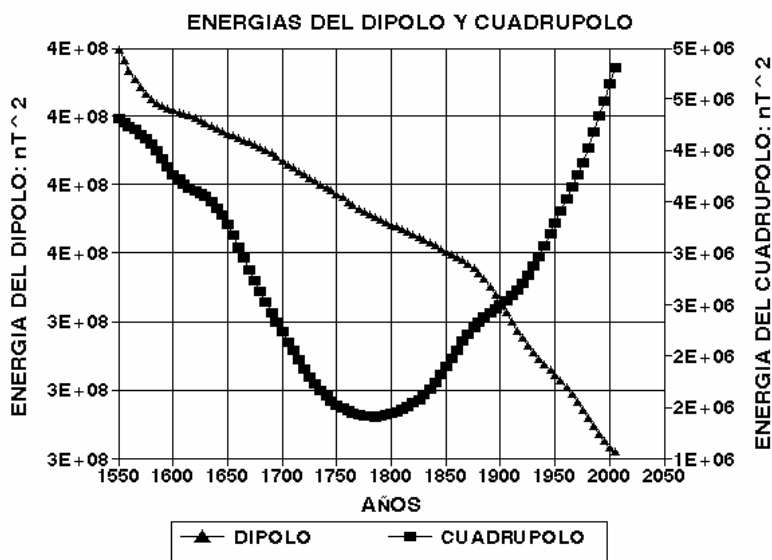


FIGURA 1

El ciclo solar se encuentra representado por el número de manchas solares, el cual se conoce en forma continua desde 1700. Las figuras 2 y 3 muestran la variación de las energías dipolar y cuadrupolar en relación con el ciclo solar y su evolución en baja frecuencia. Es importante observar el comportamiento de la variación temporal de las energías mostrando a partir del 1700 un acoplamiento con el comportamiento de la baja frecuencia del ciclo solar. Estos resultados son indicativos de que ciertas consideraciones contempladas en los modelos físicos y matemáticos tienen implicancias respecto de los parámetros involucrados tal como la conductividad del núcleo externo de la Tierra, la cual debería ser mucho mayor a la supuesta. Los recientes procesos de posible migración del polo magnético norte son otra evidencia (Chulliat et. al. 2010) sobre la implicancia de los efectos multipolares, en especial el cuadrupolar, en fenómenos geodinámicos.

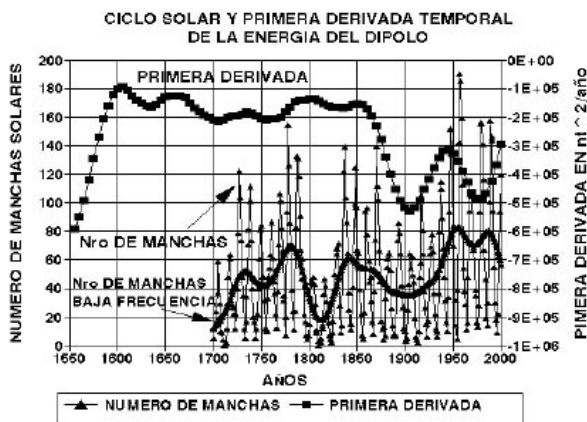


FIGURA 2

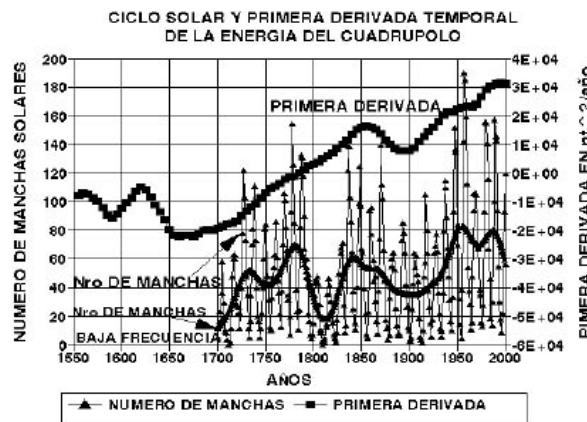


FIGURA 3

IGRF, VARIACION SECULAR Y CICLO SOLAR

En particular los coeficientes del modelo IGRF que se disponen desde el año 1990.0 hasta el 2010.0, corresponden a un desarrollo en esféricos armónicos de hasta el orden 10. Este desarrollo representa el efecto dipolar, multipolar de una dínamo autoeditada residente en el núcleo externo de la Tierra. Para su cálculo se utilizan la RPOG, las estaciones de repetición y relevamientos geomagnéticos, terrestres, marinos, aéreos y satelitales. El continente Americano posee una distribución de observatorios geomagnéticos que, incluido el



continente Antártico, se puede diseñar un perfil de Polo Norte a Sur geomagnéticos para estudiar el cambio secular de la intensidad total del campo. La figura 4 muestra la posición de los Observatorios del perfil pertenecientes a la RPOG.

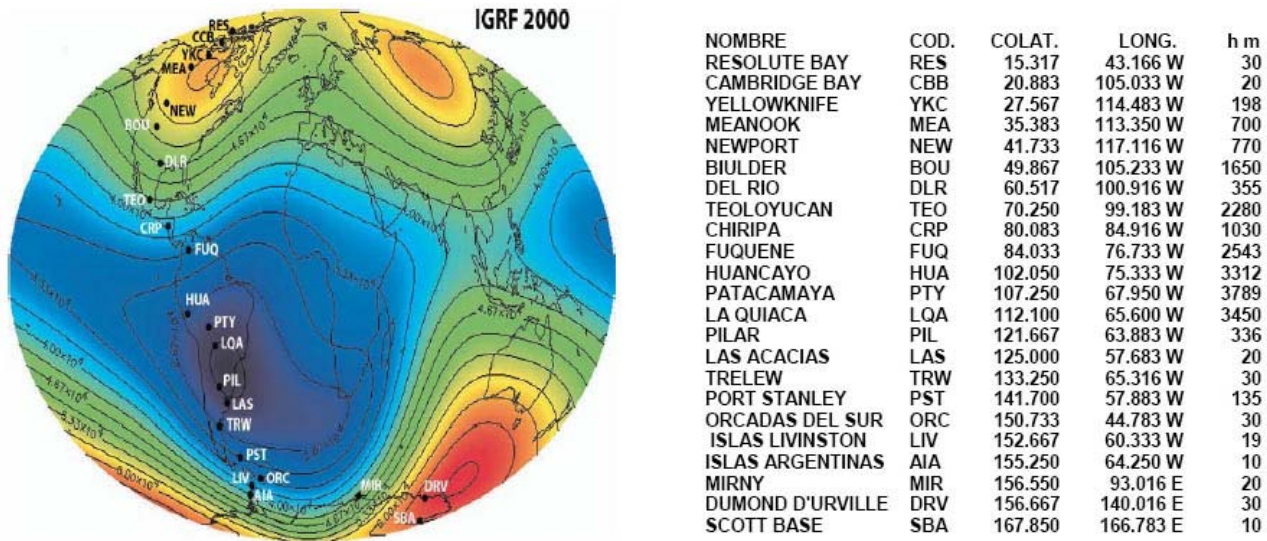


FIGURA 4

La metodología utilizada consistió en evaluar mediante el modelo IGRF-11 desde 1900.0 hasta 2010.0 cada 5 años, en la posición de cada Observatorio del perfil perteneciente a la RPOG, el valor de la intensidad total F del campo geomagnético y determinar cada 5 años su variación. Para ello se utilizó la página interactiva: <http://ngdc.noaa.gov/geomagmodels/IGRFWMM.jsp>. Para cada serie de variaciones se sustrajo la tendencia y se analizó el residuo por medio de un análisis espectral no lineal para determinar las frecuencias presentes. Mediante un modelo aditivo no armónico es posible determinar la amplitud y fase de cada serie. La expresión de dicho modelo es la siguiente: $\delta F/\delta t = (A + B \cdot t) + \sum C_k \cdot \exp(i\omega_k t + \phi_k)$, donde $\omega_k = 2\pi / T_k$ donde A y B representan los coeficientes de la tendencia lineal, y ω_k la frecuencias detectadas, C_k y ϕ_k la amplitud y fase que se determinan por medio de mínimos cuadrados. Los resultados se presentan en la tabla 1.

TABLA 1

OBS	PER.	AMP.	FASE	OBS	PER.	AMP.	FASE	OBS	PER.	AMP.	FASE	OBS	PER.	AMP.	FASE
años	nT.	rad.		años	nT.	rad.		años	nT.	rad.		años	nT.	rad.	
RES	70.2	162.9	2.2	TEO	96.6	37.0	3.5	PIL	98.5	43.9	1.2	AIA	89.8	90.6	1.5
	32.2	45.3	0.3		43.1	34.0	0.9		39.4	16.7	1.3		30.3	77.7	6.0
	24.6	53.5	1.6		28.6	57.6	5.8		22.2	13.1	5.0		20.0	73.6	6.2
	12.9	36.0	3.1		21.4	20.5	0.5		15.3	29.0	4.9		14.7	48.4	6.3
	10.9	36.2	4.4		11.5	27.0	5.6		12.6	19.4	6.2		10.8	45.0	0.7
CCB	74.2	193.9	2.4	CRP	98.5	23.9	0.3	LAS	96.6	42.8	1.3	MIR	70.2	228.0	3.6
	27.6	37.1	3.5		54.5	64.6	3.4		30.5	15.3	0.2		35.8	154.8	4.2
	17.0	38.3	5.0		26.3	49.4	4.8		18.7	9.2	1.6		24.1	128.7	5.9
	11.5	32.5	0.1		13.8	22.7	4.1		14.9	20.3	4.7		17.4	99.6	1.3
YRC	76.4	190.4	2.4		11.3	24.5	4.8		12.2	15.6	5.4		14.0	123.7	3.5
	33.7	30.9	1.1	FUQ	67.4	93.7	4.8	TRW	85.4	52.5	1.2		11.8	116.5	5.9
	24.8	25.0	1.5		24.5	37.8	4.3		31.1	25.0	0.1	DRV	72.1	147.5	4.5
MEA	78.8	187.8	2.6		17.5	23.7	4.5		19.1	20.5	6.1		45.7	52.0	1.3
	32.6	30.3	0.2		14.9	19.1	0.2	PST	94.8	65.9	1.6		34.4	66.0	0.3
	23.4	32.3	1.0	HUA	74.2	68.5	5.7		30.3	53.2	6.0		24.0	82.8	2.4
	12.9	22.1	2.6		42.7	36.5	2.2		20.8	44.0	0.4		17.8	52.6	4.3
NEW	78.8	149.6	2.7		22.4	20.8	4.1		17.4	32.6	4.4		11.7	50.1	2.9
	33.9	27.4	0.2		14.8	21.5	4.2		14.6	32.5	6.2	SBA	74.2	148.5	5.0
	22.6	36.3	0.4		12.1	25.5	4.7	ORC	91.5	77.2	1.5		36.6	116.6	0.5
	13.1	24.5	3.0	PTY	84.0	65.8	0.0		53.9	49.1	0.5		24.8	112.3	2.9
BOU	78.8	150.0	2.8		41.3	35.2	2.1		30.1	32.8	0.2		18.3	100.3	4.7
	41.0	37.0	0.7		22.2	16.0	4.3		18.6	33.7	3.8		14.2	75.6	5.8
	22.4	35.9	6.2		15.1	31.1	4.7		14.2	66.7	4.5				
	16.5	41.4	5.1		12.4	27.2	5.6		11.6	60.0	5.4				
	12.0	28.9	1.5	LQA	91.5	56.6	0.5	LIV	89.8	86.2	1.5				
DLR	82.6	96.4	2.9		41.3	32.0	2.1		30.5	74.7	6.0				
	47.0	46.3	1.4		21.4	17.0	4.4		20.2	68.2	6.3				
	27.4	44.6	5.2		15.3	35.0	5.0		14.6	44.4	6.0				
	16.8	33.9	5.2		12.7	29.0	6.2		10.8	30.5	0.7				



Los resultados muestran que la banda correspondiente al ciclo solar esta presente en todos los Observatorios excepto en DLR. Esto nos induce a analizar la metodología de generación del modelo de IGRF e interpretar, por otra parte, que a pesar a que represente este modelo la variación observada en la superficie, esta estructura espectral podría indicar cambios en el comportamiento del Geodinamo inducidos por la conexión Sol-Tierra. Por medio de estos modelos de variación en cada observatorio es posible pronosticar que valor tendrá F para el año 2100 lo cual se muestra en la figura 5.

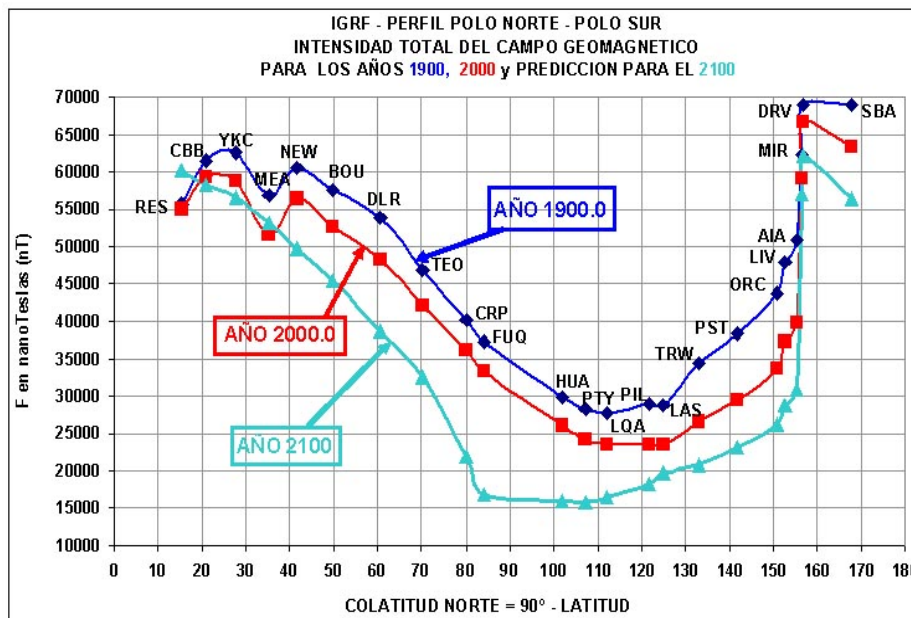


FIGURA 5

La región de la AMAS presentaría para la época del año 2100 una situación de mínimos valores para los Observatorios de FUQ, HUA, PTY y LQA con valores cercanos a los 15.000nT. pronosticando que esta gran anomalía presenta un aspecto de expansión y minimización de CMT en superficie y espacio magnetosférico. Estos cambios de estructura producirán cambios fenomenológicos en el comportamiento de los sistemas de corrientes de la Magnetosfera e Ionósfera y su acoplamiento con las capas subyacentes de la atmósfera..

SUBDUCCION Y CAMBIO EN LA VARAICION SECULAR EN EL OBSERVATORIO DE PILAR.

La geodinámica de la interacción corteza-manto tiene aspectos tectónicos y fundamentalmente de procesos y reológicos como disciplina que debe explicar la forma de liberación de la energía elástica. El continente americano presenta diferentes tipos de interacción pero la mas interesante es la que involucra la subducción de la placa de Nazca debajo del continente de América del Sur (Frolich, 2006. La sismología es la que brinda el aporte más interesante ya que permite determinar la posición del foco hipocentral de sistema de libración de energía elástica. En la figura 6 se muestra la distribución geográfica de los terremotos desde 1973 al 2010, con profundidades mayores que 200km, y la posición del Observatorio Geomagnético de Pilar. La información sismológica es provista por: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic>, donde se dispone de la base de datos desde 1910 hasta el presente de la fecha, posición y profundidad de los terremotos ocurridos a partir de los 500km de profundidad. Los valores medios anuales de la componente vertical Z registrada en observatorio Geomagnético de Pilar que se remontan desde 1904 hasta 2011. Asimismo se dispone de los valores determinados por el IGRF para el mismo intervalo.

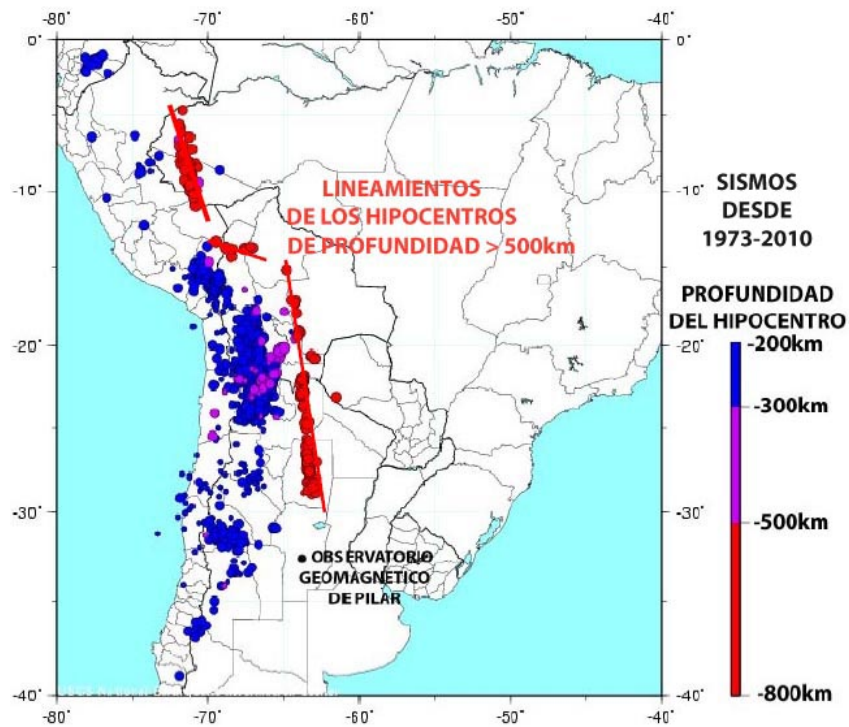


FIGURA 6

El procedimiento consistió en contar la cantidad anual de terremotos profundos ($H > 500\text{km}$) desde 1910 al presente y en calcular la variación secular de la diferencia entre la componente Z y el valor del IGRF(Z) (que denominamos “variación secular residual”) para el Observatorio Geomagnético de Pilar. Se aplicó un filtro para determinar el comportamiento de ambas series en baja frecuencia (Fig. 7).

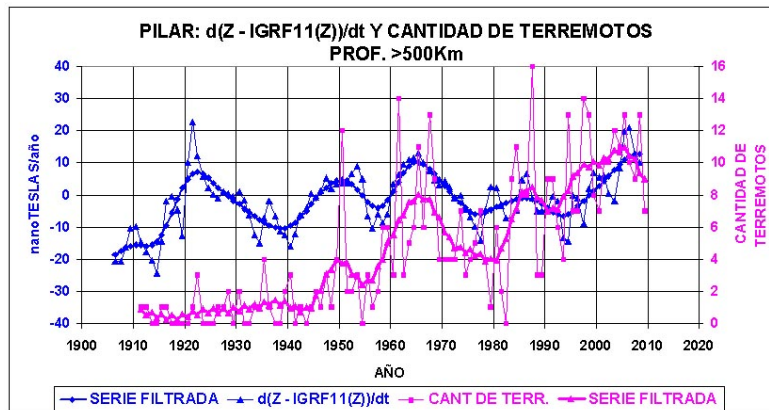


FIGURA 7

Los resultados muestran cambios en la variación secular residual que acompañan el crecimiento de la actividad de liberación elástica de los terremotos profundos en tendencia y variación en baja frecuencia. Esta situación estaría relacionada con procesos similares a los generados por los pulsos del CMT generados en la interface “Manto-Núcleo Externo” (Jacobs, 1987) producidos por el ingreso de material más conductor del Núcleo Externo en el Manto, a una profundidad de aproximadamente 2.900km (Jeanloz, 1990). Esta similitud estaría relacionada con un cambio de conductividad por procesos geoquímicas que se manifiestan entre 500km y 800km de profundidad, producto de la subducción y que alterarían, como los pulsos del CMT, el proceso de difusión ideal del CMT generado por el Geodínamo.



CONCLUSIÓN.

Algunos fenómenos geodinámicos de baja frecuencia se manifiestan por medio de las observaciones realizadas por la RPOG. Particularmente los modelos del CMT muestran la interacción entre el CMT y los fenómenos solares. Los resultados presentados también indican un acoplamiento entre el Sol y la Tierra donde los efectos inductivos se pueden determinar en forma parcial pues la fenomenología tiene todavía aspectos desconocidos, principalmente en la evolución del CMT y sus peculiaridades observadas en la superficie terrestre. Finalmente el resultado de los procesos de subducción muestra sus efectos en Observatorios que puedan disponer largas series temporales de valores medios anuales, y se encuentren cercanos a estas regiones, temática esta que debe profundizarse para el entendimiento de la reología del Manto de la Tierra.

REFERENCIAS

- Barraclough, D. R. 1978. Spherical Harmonic Models of the Geomagnetic Field. Institute of Geological Sciences. Geomagnetic Bulletin 8. 1-66.
- Chapman S. and Bartels J. 1940. Geomagnetism Vol I, and Vol II Oxford University Press. London.
- Chulliat A., Hulot G., Newitt L.R. and J.-J.Orveval. 2010 What Caused Recent Acceleratio of the North Magnetic Pole Drif?. EOS Trans. Amer. Geoph. Union. Vol 91 Nro 51, 501-502.
- De Michelis, P., L. Cafarella, and A. Meloni. 2000. A Global Analysis of the 1991 Geomagnetic Jerk Geophys. J. Int. 143, 545-556.
- Frolich, C. 2006. Deep Earthquakes. Cambridge University Press. Cambridge. Pp: 191-294.
- Gauss C. F. 1839. General theory of terrestrial magnetism . pp 184-251 in scientific memoirs selected from the transactions of foreign academies and learned societies and from foreign juournals , Vol. 2. Taylor R. (editor). Translation into English by Mr. Sabine, revised by Sir John Herschel .
- Gianibelli, J. C. 2006. Sobre la Evolución temporal del Dipolo y Cuadrupolo del Campo Geomagnético. GEOACTA VOL 31. pp:175-181.
- Gianibelli J.C. 2008a. El Campo Magnético Dipolar Terrestre. Actas del XVII Congreso Geológico Argentino. Pp:1085-1086.
- Gianibelli J. C. 2008b. Peculiaridades del Campo Magnético en la Superficie Terrestre. Actas del XVII Congreso Geológico Argentino. Pp.1087-1088.
- Gianibelli, J.C., y Kohn, J. 2004. Evolución de los Modelos IGRF y DGRF para el Observatorio Geomagnetico de Trelew (Argentina). Actas de la XXII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofisicos y Geodestas, 6-10 de Septiembre de 2004.
- Jackson A., A. R. T. Jonkers and M. R.Walker. 2000. Four Centuries of Geomagnetic Secular Variation from Historical Records. Phil. Trans R. Soc London. Ser A. Vol 358, pp. 957-990.
- Jacobs, J.A. 1987. The Earth's Core. Academic Press. Pp:267-282.
- Jeanloz, R. 1990. The Nature of the Earth's Core. Ann. Rev. Of Earth and Planet. Sci. Vol 18. Pp: 357-386
- Langel R. A. 1987. Main Field in Geomagnetism. ED by Jacobs J. A. Academic Press N. Y., VOL I, pp 249-512.
- Langel R., A. R. T. Baldwin and A. W. Green. 1995. Toward and Improved Distribution of Magnetic Observatories for Modeling of the Main Geomagnetic Field and Its Temporal Change. J. Geomag. Geoelectr., 47, 475-508.