

MODELOS DE VARIACIONES PALEOSECULARES DEL CAMPO GEOMAGNETICO EN
LOS ULTIMOS 10000 AÑOS PARA EL HEMISFERIO SUR

Ana M. Sinito

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - UBA
Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Se comparan las variaciones paleoseculares del campo geomagnético, obtenidas a partir de estudios paleomagnéticos y radiométricos de sedimentos de fondo de lagos del sudoeste argentino (los que abarcan un período de 6000 años), con los resultados de diferentes modelos teóricos, ya evaluados para el Hemisferio Norte, los cuales sugieren las posibles fuentes responsables del campo.

Los modelos utilizados postulan un dipolo central, responsable del campo principal, y ocho dipolos radiales ubicados en las proximidades de la interficie manto-núcleo, los cuales oscilan senoidalmente y/o derivan longitudinalmente a través del tiempo. Los parámetros intervinientes en los diversos modelos son calculados de forma de obtener un buen ajuste con los datos paleomagnéticos.

Se postula finalmente un modelo mixto, cuyos resultados son los que más se asemejan a los datos experimentales. Dicho modelo consiste en un dipolo central y ocho dipolos radiales oscilantes, algunos de los cuales, al mismo tiempo, derivan, para el período 6000-3000 años, luego la velocidad de deriva disminuye, hasta que finalmente, entre los 1700 años y la actualidad, los dipolos son sólo oscilantes, manteniéndose fija su posición.

Este modelo es luego aplicado al sudeste australiano y sus resultados son comparados con datos paleomagnéticos de sedimentos lacustres de dicha zona, siendo el ajuste también satisfactorio.

ABSTRACT

Palaeosecular variations of the geomagnetic field obtained from palaeomagnetic and radiometric studies carried out on the bottom sediments from lakes in southwestern Argentina (records extend back to about 6000 radiocarbon yrs bp) are compared with results from different theoretic models, which suggest the possible sources of the field and have been used to describe the northern hemisphere data by other authors.

The models use a central dipole (responsible for the main field) and eight radial dipoles, near the mantle-core interface, which oscillate sinusoidally and/or drift. The different parameters of the models are fitted to the palaeomagnetic data from southwestern Argentina.

The best fit is obtained with a mixed model: between 6000 and 3000 yrs bp all radial dipoles oscillate and some of them drift as well. Later the drift rates become lower and, finally, between 1700 yrs bp and present times all radial dipoles only oscillate.

This model is also used for Australia and its results are compared with palaeomagnetic data from Australian lake sediments; the comparison is also satisfactory.

1. INTRODUCCION

Las mediciones llevadas a cabo, en observatorios móviles y fijos a partir del siglo XVII, han permitido un conocimiento del comportamiento del campo magnético terrestre (cmt), tanto en lo que se refiere a su parte predominante (dipolar), como a su parte residual (no dipolar). Ambas han demostrado ser variables en el tiempo, resultando de particular interés las variaciones lentas y progresivas que se producen a través de los años (variaciones seculares, vs).

Para extender el conocimiento de estas variaciones seculares al pasado geológico (variaciones paleoseculares, vps), se ha recurrido al estudio de la magnetización remanente de muestras orientadas de elementos arqueológicos (arqueomagnetismo) y de flujos lávicos y secuencias sedimentarias (paleomagnetismo). Entre los estudios de este último tipo, resultan particularmente ventajosos los que utilizan sedimentos lacustres, debido a que los mismos ofrecen un registro geomagnético aproximadamente continuo. El conocimiento de la edad de los sedimentos permite correlacionar registros correspondientes a diferentes lagos de un área determinada y construir curvas patrones de vps.

Numerosos autores han presentado estudios paleomagnéticos de lagos de Europa, Africa, Australia y Norteamérica (Turner, 1983; Lund y Banerjee, 1983; Mothersill, 1983; Barton, 1983a y Creer y Papamarinopoulos, 1983). Más recientemente se han llevado a cabo estudios de la misma naturaleza en América del Sur, en particular en el sudoeste argentino (Creer y otros, 1983; Valencio y otros, 1985).

El conocimiento del comportamiento del cmt a través del tiempo ha llevado a postular modelos en términos de dipolos magnéticos. Uno de los primeros modelos postulados y todavía comúnmente aplicado es el Ailredge y Hurwitz (1964, MAH), el cual propone un dipolo principal central y ocho dipolos radiales (dr) ubicados a una distancia de 0.28 radios terrestres (RT) del centro de la Tierra. Con la intención de considerar las vps de largo y mediano período Hogg (1978) introdujo tres diferentes variantes a este modelo: i) deriva longitudinal de los dr (MAH1); ii) oscilación senoidal de la intensidad de los dr (MAH2) y iii) deriva longitudinal y oscilación de la intensidad simultánea de los dr (MAH3). Hogg (op.cit.) comparó los resultados surgidos de estas modificaciones del MAH con los datos experimentales obtenidos de estudios paleomagnéticos de sedimentos lacustres de Europa, y ajustó los parámetros en juego en los modelos para optimizar la coincidencia con los resultados empíricos.

En este trabajo se comparan los resultados teóricos surgidos del MAH y de las modificaciones al mismo (MAH1, MAH2 y MAH3) con los datos paleomagnéticos de sedimentos lacustres de Sudamérica y Australia, realizando nuevos ajustes de los parámetros. Se introducen, además, cambios en los modelos, obteniéndose una mejor coincidencia con los datos experimentales.

2. RESULTADOS PALEOMAGNETICOS DE SEDIMENTOS LACUSTRES

2.1 Sudamérica

Los datos experimentales utilizados en este trabajo se obtuvieron sobre la base de estudios paleomagnéticos y radiométricos de sedimentos extraídos del fondo de lagos de la Provincia de Río Negro (41°S, 71.5°W, Valencio y otros, 1982; Mazzoni y Sinito, 1982; Sinito y otros, 1983; Valencio y otros, 1985). Estos estudios hicieron posible ii) establecer una escala de profundidad común para diferentes testigos extraídos de un mismo lago sobre la base

de la correlación sugerida por los perfiles de susceptibilidad magnética e intensidad del magnetismo remanente natural de dichos testigos; ii) construir perfiles tipo para la declinación (D) e inclinación (I) del magnetismo remanente estable de cada lago, los cuales son prácticamente equivalentes a perfiles de D e I del cmt durante la época de deposición y consolidación de los sedimentos (la elaboración de estos perfiles tipo se realizó utilizando la escala de profundidad común y un procedimiento de apilado); iii) establecer una escala de profundidad común para los testigos de todos los lagos, usando la correlación entre los perfiles tipo de D e I de cada uno de los lagos; iv) transformar la escala de profundidad común en una escala de tiempo, usando edades radiométricas y v) obtener, por medio del proceso de apilado, magnetogramas representativos de las variaciones de D e I del cmt para la región estudiada durante los últimos 6000 años.

Los datos correspondientes al Lago Moreno representan un mayor lapso (aproximadamente 14000 años), es decir la secuencia obtenida de este lago es la que muestra menor velocidad de deposición. Por tal razón estos datos fueron utilizados por Creer y Tucholka (1983a) para realizar un análisis espectral mediante el método de máxima entropía. Este método fue aplicado a los valores de D e I en forma independiente, y luego, en forma conjunta mediante una serie de números complejos (Denham, 1975). Los períodos que resultan del análisis simultáneo de ambos parámetros son 1360 y 2130 años, los cuales están asociados a movimientos del vector geomagnético en sentido antihorario y horario respectivamente (Denham, 1975, Barton, 1983b, Turner y Thompson, 1982). Estos sentidos de giro están a su vez vinculados con movimientos de deriva hacia el este y el oeste de las fuentes del campo no dipolar (Runcorn 1959, Skiles, 1970).

2.2 Australia

Barton y McElhinny (1981 y 1982) presentaron un análisis de las vps del cmt en Australia basado sobre el estudio paleomagnético y radiométrico de secuencias sedimentarias del fondo de lagos (ubicados dentro de cráteres formados por explosiones volcánicas, maars) del sudeste australiano (38°S, 143°E).

Mediante un procedimiento similar al descrito en el ítem anterior construyeron curvas de D e I representativas de las vps en la zona, en función del tiempo. Estos datos de D e I fueron sometidos a análisis mediante periodogramas y método de máxima entropía. De la aplicación de este último a los pares de valores de D e I tomados como parte de un número complejo surgen como períodos característicos 2800 y 4500 años (rotación horario y antihorario del vector geomagnético respectivamente).

3. APLICACION DE LOS MODELOS DEL CAMPO GEOMAGNETICO A AMERICA DEL SUR.

3.1 Modelo de Alldredge y Hurwitz

Se aplicó el MAH utilizando para algunos parámetros los valores asignados por Alldredge y Hurwitz (1964) y recalculando otros mediante un nuevo ajuste de los mismos. De esta forma, si bien no se modificaron las ubicaciones del dipolo central y de los ocho dr, se estimaron los valores de intensidad de estos últimos. Para ello se realizó un ajuste por cuadrados mínimos utilizando los valores medios del cmt registrado en diferentes observatorios mundiales en 1977 (Institute of Geological Sciences, 1981).

Los valores de intensidad calculados, así como el resto de los parámetros utilizados se hallan resumidos en la Tabla 1.

Dipolo	Colatitud (grados)	Longitud (grados)	Amplitud a/RT^2 ($10^{-5}aT$)
central	-	-	-0.56573
1	13.2	331.2	0.05150
2	47.0	182.0	0.03959
3	61.6	63.6	0.00892
4	80.8	240.3	-0.04580
5	101.8	89.6	-0.00188
6	141.5	322.4	-0.13458
7	139.0	52.0	-0.07564
8	103.4	172.9	-0.05388

Profundidad de los dr: 0.28 RT

Tabla 1. Parámetros del MAH ajustado a los datos geomagnéticos de 1977. a: intensidad de los dipolos.

3.2 Modelos de Alldredge y Hurwitz modificados

3.2.1 Modelo de dipolos derivantes (MAHI)

Los parámetros en juego en este modelo ya descrito (Hogg, 1978) son: i) la intensidad del dipolo central, ii) las posiciones actuales de los dr, iii) sus profundidades, iv) sus intensidades y v) sus velocidades de deriva. Los valores de los parámetros i a iv utilizados son los detallados en la Tabla 1, considerando que las posiciones de los dr correspondían a las ubicaciones actuales de los mismos.

Para la estimación de las velocidades de deriva se utilizaron tres diferentes criterios: a) suponer que los dr derivan hacia el oeste con la velocidad característica de deriva de la componente no dipolar (0.19 grados/año), b) asignar a las velocidades los valores calculados por Hogg (1978) (0.27 grados/año hacia el oeste y 0.36 grados/año hacia el este para los dipolos positivos y negativos respectivamente), quien utilizó para esta estimación la diferencia de las posiciones de los dr entre 1945 y 1955 halladas por Alldredge y Hurwitz (1964) al ajustar los parámetros del MAH con los datos geomagnéticos de cada uno de dichos años y c) utilizando los períodos surgidos del análisis espectral llevado a cabo por Creer y Tucholka (1983a). A partir de dichos períodos (2130 y 1360 años) se calcularon las velocidades de deriva, que resultaron 0.17 grados/año hacia el oeste y 0.26 grados/año hacia el este respectivamente. Estas velocidades fueron asignadas a los dipolos 1, 2, 3 y 4, 5, 6, 7, 8 respectivamente, siguiendo el criterio de Hogg ya mencionado, el cual toma en cuenta el signo de los dipolos.

Se calcularon los perfiles teóricos de D e I, que surgen de las tres variantes mencionadas del MAHI para el lugar de muestreo y se compararon con los magnetogramas representativos de la región, obtenidos de los estudios paleomagnéticos y radiométricos.

Los resultados surgidos de la prueba (a) son muy diferentes de los perfiles empíricos, no siendo posible realizar ninguna correlación, ya que presentan, a diferencia de los magnetogramas, regularidad en los rasgos, grandes amplitudes y bajas frecuencias de oscilación. Los resultados de las pruebas (b) y (c) no difieren mayormente entre sí y, si bien tampoco pueden correlacionarse con los magnetogramas, muestran un aumento en las frecuencias de oscilación, las cuales se acercan algo más a las de los valores

experimentales.

Se llegó a la conclusión que este modelo no resulta adecuado para el área en estudio.

3.2.2 Modelo de dipolos oscilantes (MAH2)

Los parámetros intervinientes en este modelo, ya descripto (Hogg, 1978) son: i) intensidad del dipolo central, ii) posiciones de los dr, iii) sus profundidades, iv) las amplitudes, fases y períodos de la oscilación de intensidad de los mismos. Los valores utilizados para los parámetros i a iii) fueron los detallados en la Tabla 1.

Para estimar las amplitudes y fases de la oscilación de intensidad de los dr se utilizó un razonamiento similar al de Hogg (op.cit.): se eligió el valor de intensidad del dr mayor como amplitud para todos los dr y, considerando tiempo cero a dicho año, se calcularon las fases. En nuestro caso, según el ajuste realizado para 1977, el mayor dr es el 6 ($0.13458 \cdot 10^{-11} \text{mT}$).

La estimación de los períodos presentó más dificultades; no pudo recurrirse al criterio de Hogg, ya que éste analizó la influencia individual de cada dr sobre diferentes zonas del Hemisferio Norte y asignó a dichos dipolos los períodos característicos, que surgieran de estudios paleomagnéticos llevados a cabo en dichas zonas. Es evidente que, dado los escasos datos de este tipo existentes en el Hemisferio Sur, este método fue descartado en el presente trabajo. Se utilizaron entonces dos diferentes criterios: a) emplear los mismos períodos calculados por Hogg en el Hemisferio Norte, b) usar los períodos surgidos del análisis espectral de los datos del Lago Moreno utilizando un razonamiento similar al usado en el MAH1 para decidir cuál de los dos períodos se asignaba a cada dipolo. De esta forma, el valor de 2130 años se utilizó para los dipolos 1, 2 y 3 y el de 1360 años para los dipolos 4, 5, 6, 7 y 8.

Los perfiles surgidos de la primera prueba difieren notablemente de los magnetogramas experimentales, siendo notoria la gran amplitud de oscilación y la predominancia de bajas frecuencias. En cuanto a los resultados de la segunda prueba, se observa que los perfiles teóricos (especialmente el correspondiente a I) muestran un comportamiento más parecido a los experimentales. Esto se manifiesta en la aparición de frecuencias más altas que en las pruebas anteriores y en la coincidencia de algunos máximos y mínimos con los de los magnetogramas.

Sobre la base de este último resultado se realizó una nueva prueba. Para ello se analizó la influencia individual de cada dr en las variaciones de la D e I del cmt en el lugar de muestreo calculando la amplitud de las variaciones causadas por cada dipolo. De este análisis surgió que los dr de mayor influencia en la zona en estudio son los 4, 7 y 8. Se consideró entonces, que éstos eran los que fijaban en forma predominante los períodos típicos del análisis espectral, en consecuencia se mantuvieron dichos valores de período para la oscilación de intensidad de dichos dipolos, efectuando modificaciones, en forma iterativa, al período del resto de los dipolos, hasta lograr una mejor coincidencia con los datos experimentales. El óptimo ajuste se logró con las fases y períodos resumidos en la Tabla 2(a). Los perfiles correspondientes superpuestos a los magnetogramas experimentales se hallan ilustrados en la Fig. 1a; en la misma puede observarse que: i) se puede establecer una correlación basada en el parecido de ciertos rasgos característicos, ii) la similitud es mayor entre los perfiles de I y iii) la amplitud de la oscilación es mayor en los perfiles teóricos que en los experimentales.

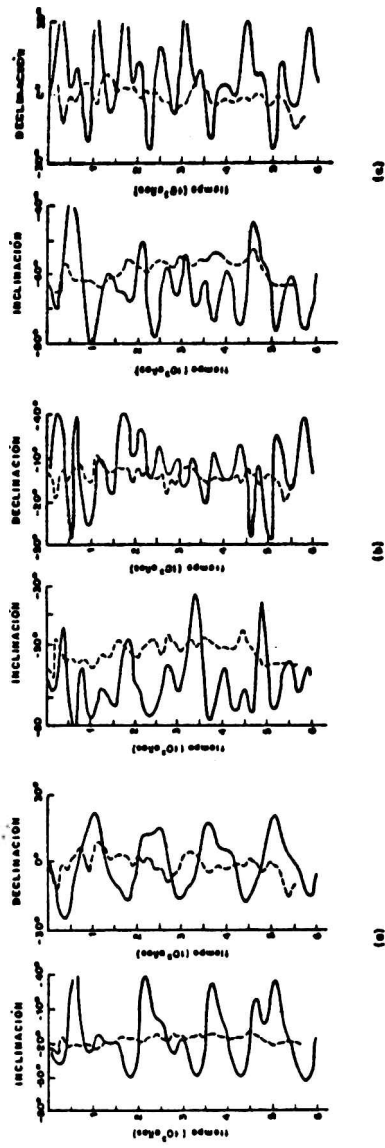


Fig.1 Perfiles de I y D en función del tiempo (—) para los modelos: a) MAH2, b) MAH3 y c) MAH3', superpuestos a los magnetogramas experimentales (---), para América del Sur.

Dipolo	a		b	c
	Fase (grados)	Período (años)	Velocidad deriva (grados/año)	Velocidad deriva (grados/año)
1	157.5	2130	0.17	0.17
2	162.4	500	0.17	0.00
3	176.2	1200	0.17	0.00
4	340.1	1360	-0.26	-0.26
5	359.2	800	-0.26	0.00
6	270.0	1360	-0.26	-0.26
7	325.8	1360	-0.26	-0.26
8	336.4	1360	-0.26	-0.26

Tabla 2. a) fases y períodos de oscilación de intensidad para MAH2, MAH3 y MAH3', b) velocidades de deriva para el MAH3, c) velocidades de deriva para el MAH3'. Velocidades hacia el oeste: positivas, hacia el este: negativas. Los parámetros fueron ajustados con los datos experimentales de América del Sur.

3.2.3 Modelo de dipolos oscilantes y derivantes (MAH3)

Los parámetros en juego en este modelo, ya descrito (Hogg, 1978), son aquellos que aparecen en MAH1 y MAH2.

Se utilizaron los parámetros detallados en la Tabla 1, considerando, al igual que para el MAH1, que las posiciones de los dr allí tabuladas corresponden a las ubicaciones actuales de los mismos. Las amplitudes, fases y períodos de oscilación de la intensidad se eligieron de acuerdo al último ajuste del MAH2. En cuanto a las velocidades de deriva, se realizaron dos pruebas: a) utilizando las velocidades empleadas por Hogg para el Hemisferio Norte y b) usando las velocidades surgidas del análisis espectral de los datos de América del Sur.

La segunda de las pruebas (Tabla 2b, Fig. 1b) produce los perfiles más similares a los experimentales, aunque también en este caso, las oscilaciones de D e I muestran mayor amplitud que en los registros paleomagnéticos, y la coincidencia es mayor en los perfiles de I que en los de D.

3.2.4 Modelos de dipolos oscilantes y dipolos oscilantes y derivantes (MAH3')

Se introdujo una modificación al MAH3 (MAH3') considerando que, si bien todos los dr oscilaban en intensidad, no todos sufrían variaciones en su longitud a lo largo del tiempo. Se tuvo en cuenta, por lo tanto, la posibilidad que la velocidad de deriva de algunos de los dipolos fuera nula. Se realizaron numerosas pruebas. Los resultados teóricos se ajustaron mejor a los experimentales cuando se anulaban las velocidades de los dipolos 2, 3 y 5; estos dipolos eran los que tenían períodos de oscilación no coincidentes con los surgidos del análisis espectral. Las velocidades de deriva observadas se hallan resumidas en la Tabla 2c y los perfiles pueden observarse en la Fig. 1c. Estos resultados son más satisfactorios que los anteriores, aunque siguen persistiendo las dos características mencionadas en el análisis de los otros modelos: mayor amplitud de las variaciones de I y D teóricas y mejor ajuste de los perfiles de I que los de D.

Analizando cuidadosamente los perfiles surgidos de aquellas pruebas que mejor se ajustan a los valores experimentales (MAH2, y

MAH3') se observa que los perfiles obtenidos con el MAH2 presentan una mayor similitud con los magnetogramas surgidos de los datos paleomagnéticos de los sedimentos más jóvenes de la secuencia (0-1700 años), mientras que los obtenidos con el MAH3' se asemejan más a los valores experimentales en la zona correspondiente a edades mayores (3000-6000 años). Por esta razón se postuló un nuevo modelo (MAH4), que contempla la existencia de algunos dr oscilantes y otros que derivan y oscilan simultáneamente, pero admite la posibilidad que la velocidad de los dr derivantes no sea constante, sino que caiga lentamente a cero, es decir que, a partir de un determinado momento, los dr dejan de derivar, permaneciendo así todos en una posición fija. En particular, se consideró que la deriva de los dr estuvo presente hasta hace 3000 años y que, desde hace 1700 años, sólo ha perdurado la oscilación en intensidad. Para el periodo entre los 1700 y 3000 años se realizaron numerosas pruebas con valores de velocidad de deriva intermedios entre aquellos asignados para tiempos mayores de 3000 años y cero, bajo la suposición que la detención de los dr no fue abrupta, sino gradual. Para tratar de subsanar el problema, siempre presente, de la mayor amplitud de las oscilaciones teóricas, se llevó a cabo el siguiente procedimiento. Se reemplazaron las amplitudes de oscilación de intensidad de los dr, que hasta el momento se habían considerado iguales al valor de intensidad del dr mayor para el ajuste del MAH del año 1977 (dipolo 6), por valores menores para el resto de los dr. Se modificaron consecuentemente las fases correspondientes, para mantener el ajuste mencionado. Luego de sucesivas pruebas, el resultado más satisfactorio se obtuvo con los valores detallados en la Tabla 3; los perfiles se observan en la Fig. 2a.

Di- polo a t=0 (grad)	Colat. a t=0 (grad)	Amplitud m/RT ² (10 ⁻² mT)	Fase (grad)	Periodo (años)	Velocidad deriva (grados/año)			
					a	b	c	
1	13.2	331.2	0.06500	127.6	2130	0.00	0.00	0.17
2	47.0	182.0	0.06500	141.2	500	0.00	0.00	0.00
3	61.6	63.6	0.06500	172.1	1200	0.00	0.00	0.00
4	80.8	240.3	0.06500	315.2	1360	0.00	-0.15	-0.26
5	101.8	89.6	0.06500	358.3	800	0.00	0.00	0.00
6	41.5	322.4	0.13458	270.0	1360	0.00	-0.15	-0.26
7	139.0	52.0	0.07600	275.6	1360	0.00	-0.15	-0.26
8	193.4	172.9	0.06500	313.0	1360	0.00	0.00	-0.26

Profundidad de los dr: 0.28RT

Amplitud del dipolo central (M/RT²): -0.56573 10⁻²mT

Tabla 3. Parámetros del MAH4 ajustados con los datos experimentales de América del Sur. Velocidades hacia el oeste: positivas, hacia el este: negativas; para edades: a) menores de 1700 años, b) entre 1700 y 3000 años, c) entre 3000 y 6000 años.

Dado que, si bien ahora las amplitudes de oscilación de dichos perfiles se acercan más a las de los magnetogramas experimentales, aún siguen siendo un poco altas, se aplicó a los datos teóricos un proceso de suavizado. Dicho proceso consistió en un promedio escalar corrido con diversas ventanas, para independizar el análisis de la I del de la D, ya que presentan diferencias de comportamiento. La aplicación de un procedimiento de suavizado es justificable, ya que las amplitudes de las variaciones de las

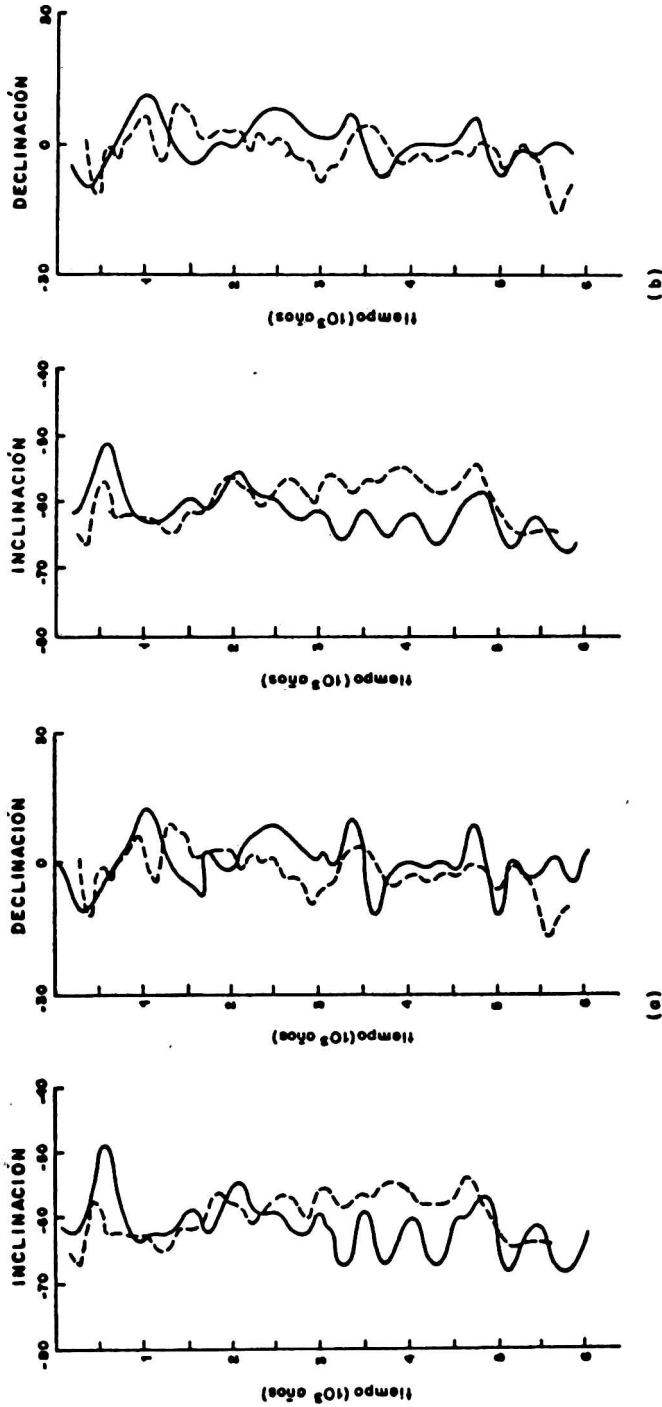


Fig. 2 Perfiles de I y D en función del tiempo (—) para a) MAH4 y b) MAH4 suavizado con una ventana de 280 años, superpuestos a los magnetogramas experimentales, (---), para América del Sur.

direcciones del magnetismo remanente estable son, en general, menores que las correspondientes a las del cmt debido a la atenuación de la señal de entrada inherente a cualquier proceso de registro (Creer y Tucholka, 1983b). Los perfiles teóricos resultantes se observan en la Fig. 2b. En las curvas de I se observa coincidencia en los máximos correspondientes, aproximadamente, a 500, 1500, 2000, 3000, 4000 y 4700 años, así como en los mínimos presentes alrededor de los 2300, 2800, 3300, 3700, 4300 y 5200 años. En el caso de D, no puede hacerse una correspondencia pico a pico, sino que se observan conductas similares en los perfiles teórico y experimental: para edades menores de 1000 años una tendencia a ir de valores negativos a positivos, y para edades mayores una tendencia a oscilar alrededor del cero.

Se estimó el coeficiente de correlación (r) entre los valores de I surgidos del magnetograma experimental (I_e) y del perfil teórico suavizado (I_t). La significancia de r puede ser valorada mediante una distribución t de Student para $n-2$ grados de libertad. Usando una tabla de valores críticos para distintos niveles de probabilidad para 50 o más grados de libertad (Rao y otros, 1966), se encontró que la probabilidad que la relación sea casual es menor del 5% para $r=0.273$, menor que el 1% para $r=0.354$ y menor del 0.1% para $r=0.433$. El valor de r surgido de la comparación de I_e y I_t resulta de 0.43.

Se tuvo en cuenta luego, que podía haber errores sistemáticos en los valores de I_e , debidos al efecto de curvatura del sacatestigo en el proceso de hincado del mismo, lo que sugería la utilización de una I_e corregida ($I_e' = I_e + \Delta I$). Se calcularon nuevos valores de coeficientes r para diferentes ΔI y se observó que el mayor valor de r (0.615) se lograba cuando se dividía el perfil en dos tramos, uno correspondiente a edades menores de 2200 años y otro para edades entre 2200 y 6000 años, eligiendo para el primer tramo un $\Delta I_1 = 1^\circ$ y para el segundo un $\Delta I_2 = -7^\circ$.

Se aplicó el mismo método de correlación a los perfiles de D experimental (D_e) y D teórica (D_t), lográndose sólo un valor aceptable de r (0.38) en el caso de edades menores de 1000 años, cuando se introducía una corrección $\Delta D = 10^\circ$ a los valores experimentales, lo que puede justificarse por el hecho de haber asignado valor cero a la D media para la confección del magnetograma, cuando esto podía no ser exactamente así.

4. APLICACION DE LOS MODELOS DEL CAMPO GEOMAGNETICO A AUSTRALIA

Se decidió aplicar sólo aquellos modelos que resultaron adecuados para el sudoeste argentino.

Para la elección de los valores de los parámetros de cada uno de los modelos se emplearon dos caminos diferentes: a) utilizar los valores calculados para América del Sur, b) recalcular algunos parámetros (en particular los períodos de oscilación de intensidad y las velocidades de deriva de los dr) aplicando un criterio semejante al usado en América del Sur, pero basándose en los datos experimentales de Australia. Este último criterio dio los resultados más satisfactorios. Para la aplicación del mismo se calculó la influencia que tenía cada dr en forma individual en las variaciones de D e I del cmt en el lugar de estudio ($38^\circ S$, $143^\circ E$), resultando predominantes en el lugar los dipolos 5, 7, 8 y, en menor medida los 3 y 4. De acuerdo a ello, se les asignó, en el MAH2, a los dipolos mencionados los períodos característicos surgidos del análisis espectral. Se usó el mismo criterio utilizado por Hogg en el Hemisferio Norte y en este trabajo para América del Sur, es decir: el período que se identifica con la rotación del

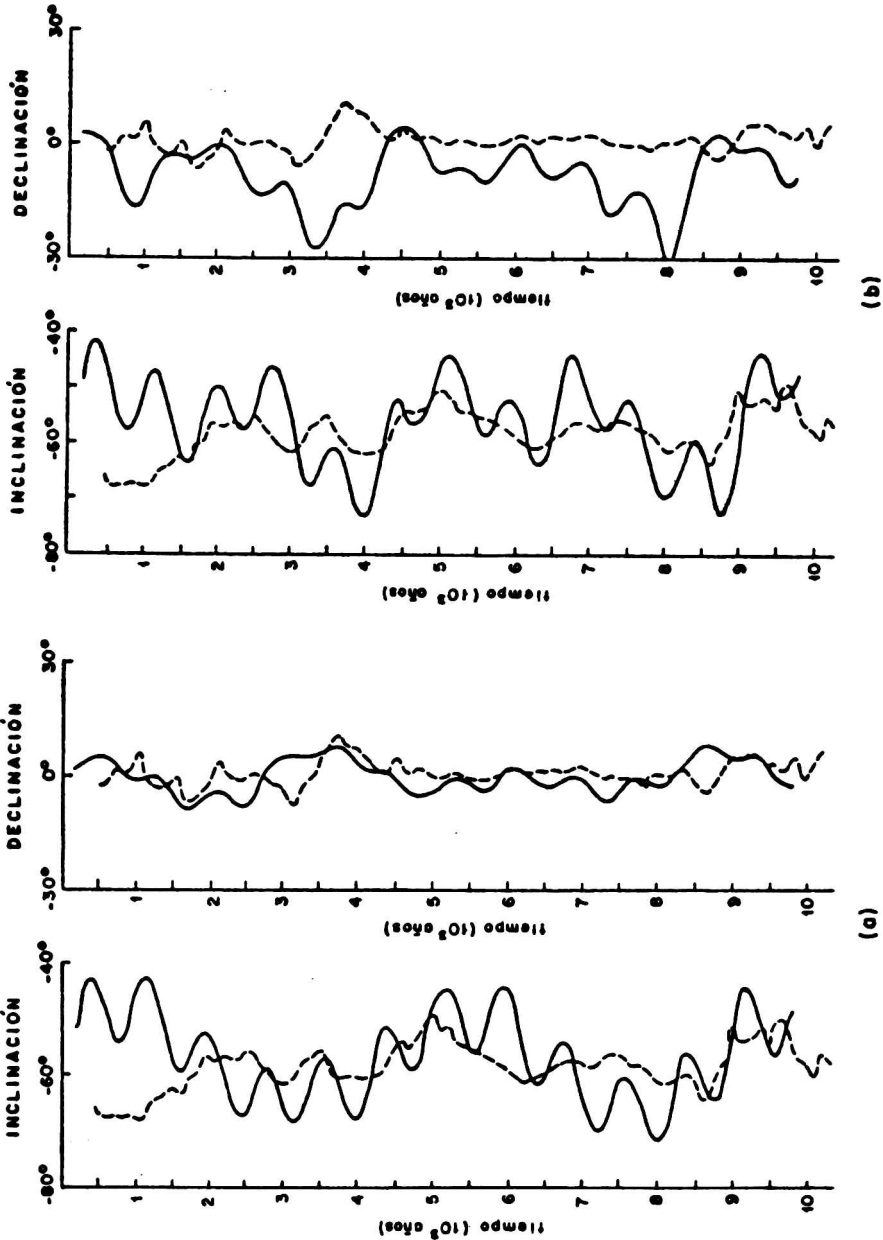


Fig. 3

Perfiles de I y D en función del tiempo (—) para los modelos: a) MAH2 y b) MAH3', suavizados ambos con una ventana de 300 años y superpuestos a los magnetogramas experimentales (- - -), para Australia.

vector geomagnético en sentido horario (2800 años) se asignó a los dipolos positivos y el que está vinculado con la rotación en sentido antihorario (4500 años) a los dipolos negativos. En cuanto al resto de los dr, se consideró que sus periodos podían diferir de los surgidos del análisis espectral y, de acuerdo con lo obtenido para América del Sur, se les asignó periodos menores, ajustando iterativamente los mismos hasta obtener la mejor coincidencia con los resultados experimentales. Los valores de colatitud, longitud y amplitud y fase de oscilación de intensidad de los dr son los detallados en la Tabla 3. En la Tabla 4a se hallan los valores de los periodos de oscilación de intensidad y en la Fig. 3a se observan los perfiles de I y D en función del tiempo, luego de ser sometido al proceso habitual de suavizado, en este caso con ventana de 300 años.

Dipolo	a Período (años)	b Velocidad deriva (grados/año)
1	800	0.00
2	800	0.00
3	2800	0.13
4	4500	-0.08
5	4500	-0.08
6	800	0.00
7	4500	-0.08
8	4500	-0.08

Tabla 4. a) Periodos de oscilación de intensidad para MAH2 y MAH3', b) velocidades de deriva para el MAH3'. Velocidades hacia el oeste: positivas, hacia el este: negativas. Parámetros ajustados con los datos experimentales de Australia.

Se aplicó luego el MAH3' utilizando los periodos de oscilación de intensidad ajustados para el MAH2. En cuanto a las velocidades de deriva, se les asignó valor cero a las de aquellos dr, cuyos periodos de oscilación no correspondían a las frecuencias surgidas del análisis espectral (1, 2 y 6) y se calcularon las velocidades correspondientes a los periodos de 2800 y 4500 años para el resto (0.13 grados/año hacia el oeste para el dipolo 3 y 0.08 grados/año hacia el este para los dipolos 4, 5, 7 y 8), siguiendo de esta forma el criterio utilizado para América del Sur. En la Tabla 4b se hallan las velocidades de deriva del MAH3' y en la Fig. 3b se observan los perfiles de I y D en función del tiempo surgidos del modelo, suavizados con ventana de 300 años.

Comparando los perfiles teóricos de ambos modelos con los experimentales, se observa que el MAH2 se ajusta mejor a los resultados paleomagnéticos en el periodo 0-4000 años, y el MAH3' en el periodo 4000-10000 años. Por tal motivo se aplicó, al igual que para América del Sur, un modelo combinado MAH4. Los valores resultantes para todos los parámetros de este nuevo modelo se hallan resumidos en la Tabla 5 y los perfiles de I y D en función del tiempo, surgidos del mismo y suavizados con ventana de 300 años se observan en la Fig. 4. Hay muy buena coincidencia entre los perfiles de I teórico y experimental, especialmente a partir de los 2000 años. Se puede señalar correlación entre los máximos de I correspondientes a, aproximadamente, 2000, 3500, 4500, 5000, 6700, 7500, 8500 y 9400 años, y los mínimos presentes a los 3200, 4000,

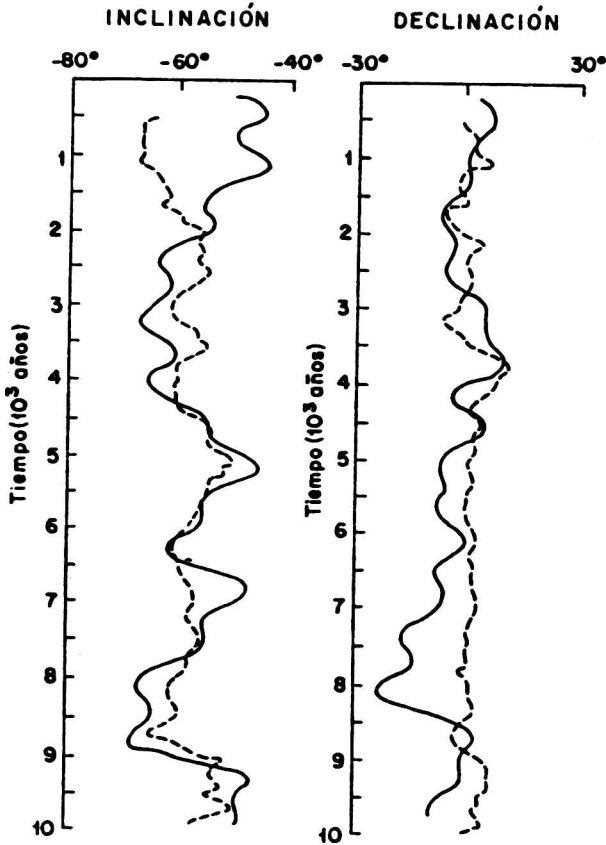


Fig.4 Perfiles de I y D en función del tiempo para el MAH4 suavizado con ventana de 300 años (—) superpuestos a los magnetogramas experimentales (---), para Australia.

6300, 8100 y 8700 años. En cuanto a la D, como en el caso de América del Sur, se pueden señalar tendencias similares entre los perfiles teórico y experimental: para edades menores de 2000 años, oscilación alrededor del valor cero, entre los 2000 y 4500 predominancia de valores positivos. El coeficiente de correlación, considerando todo el período (unos 10000 años) fue bajo, pero se obtuvo un valor satisfactorio en el lapso 1000-9000 años para la I ($r=0.64$) y en el lapso 3400-9000 años para la D ($r=0.36$).

Di- polo a t=0 (grad)	Long. a t=0 (grad)	Amplitud m/RT^2 ($10^{-3}mT$)	Fase (grad)	Periodo (años)	Velocidad deriva (grados/año)		
					a	b	
1	13.2	331.2	0.06500	127.6	800	0.00	0.00
2	47.0	182.0	0.06500	141.2	800	0.00	0.00
3	61.6	63.6	0.06500	172.1	2800	0.00	0.13
4	80.8	240.3	0.06500	315.2	4500	0.00	-0.08
5	101.8	89.6	0.06500	358.3	4500	0.00	-0.08
6	41.5	322.4	0.13458	270.0	800	0.00	0.00
7	139.0	52.0	0.07600	275.6	4500	0.00	-0.08
8	103.4	172.9	0.06500	313.0	4500	0.00	-0.08

Profundidad de los dr: 0.28RT

Amplitud del dipolo central (M/RT^2): $-0.56573 \cdot 10^{-3}mT$

Tabla 5. Parámetros del MAH4 ajustados con los datos experimentales de Australia. Velocidades hacia el oeste: positivas, hacia el este: negativas; para edades: a) menores de 4000 años, b) entre 4000 y 10000 años.

5. CONCLUSIONES

El hecho que exista una mejor correlación entre los perfiles de I que entre los de D puede atribuirse a que el registro de I es más confiable que el de D, ya que este último puede estar sujeto a alteraciones, difíciles de cuantificar, causadas por la rotación de los sedimentos dentro del sacatestigo, cuando éste se está hincando.

La introducción de una corrección a los valores de I de América del Sur, por posible efecto de curvatura es razonable, ya que si el sacatestigo se introduce curvado, va aumentando su desviación de la vertical con la profundidad; efectivamente, se observa que el factor de corrección es mayor en la parte inferior de la columna.

El procedimiento de suavizado aplicado a los perfiles teóricos es necesario pues los registros paleomagnéticos llevan implícito una atenuación dependiente de i) el tiempo que le ha llevado a cada estrato de sedimento adquirir su remanencia postdeposicional, el cual oscila alrededor de los 200 años y ii) la relación entre el tamaño de la muestra paleomagnética y la velocidad de sedimentación.

Es obvio que la naturaleza altamente compleja del campo total, así como de las vs, impide la formulación de un modelo simple que tenga en cuenta todas las características de dicho campo. Los modelos utilizados en este trabajo intentan reproducir sólo las características básicas de las vs y han permitido arribar a las siguientes conclusiones.

Surgen diferencias entre lo observado en el Hemisferio Sur y el Hemisferio Norte, ya que Hogg (1978) concluyó para Europa, que el mejor modelo era uno de dr oscilantes, mientras que de este trabajo surge, como más apropiado para América del Sur y Australia, un modelo mixto, donde se combinan dr sólo oscilantes con otros que oscilan y derivan al mismo tiempo entre los 6000 y 3000 años. Se ha postulado además, que las velocidades no son constantes sino que decrecen hasta que, finalmente, a partir de los 1700 años los dr quedan fijos.

Puesto que los dipolos utilizados en los modelos no son más que la representación matemática de circuitos de corriente producidos por torbellinos de material conductor en el núcleo

terrestre, sus variaciones reflejan variaciones en dichos circuitos. Así, oscilaciones de intensidad de los dr revelan cambios en la velocidad y/o área del material conductor involucrado en los torbellinos, y deriva de los dr significa un desplazamiento de dichos torbellinos.

El hecho que el mismo modelo no se ajuste a registros paleomagnéticos de los Hemisferios Sur y Norte, así como la diferencia en el valor de los parámetros óptimos para América del Sur y Australia, puede deberse a los efectos de apantallamiento del material altamente conductor del núcleo externo y manto sobre los torbellinos, el cual depende de la distancia entre cada fuente y el área en estudio. Esa es la causa por la cual estos modelos tienen un carácter regional.

Agradecimientos. La autora desea agradecer al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y a la Universidad de Buenos Aires, quienes proveyeron los medios materiales necesarios para la realización del presente trabajo. Asimismo hace extensivo su agradecimiento al Ing. D. A. Valencio y al Dr. J. F. Vilas por los fructíferos intercambios de ideas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aldredge, L.R. y Hurwitz, L., 1964. Radial dipoles as the sources of the Earth's main magnetic field. *J. of Geophys. Res.*, 69, 12, 2631-2635.
- Barton, C.E., 1983a. Palaeomagnetism of lake sediments: results from Australia, en *Geomagnetism of Baked Clays and Recent Sediments*. Eds. K.M. Creer, P. Tucholka y C.E. Barton. Elsevier, 235-239.
- Barton, C.E., 1983b. Spectrum analysis, en *Geomagnetism of Baked Clays and Recent sediments*. Eds. Creer, K.M., Tucholka, P. y Barton, C.E., Elsevier, Amsterdam, 262-272.
- Barton, C.E. y McElhinny, M.W., 1981. A 10000 years geomagnetic secular variation record from three Australian Maars. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 67, 465-485.
- Barton, C.E. y Mc Elhinny, M.W., 1982. Time series analysis of the 10000 yr geomagnetic secular variation record from SE Australia. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 68, 709-724.
- Creer, K.M. y Papamarinopoulos, S., 1983. The palaeomagnetism of cave sediments, en *Geomagnetism of Baked Clays and Recent Sediments*. Eds. K.M. Creer, P. Tucholka y C.E. Barton. Elsevier, 243-248.
- Creer, K.M. y Tucholka, P., 1983a. Lake sediments paleomagnetic research. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 74, 1, 223-238.
- Creer, K.M. y Tucholka, P. 1983b. Epilogue, en *Geomagnetism of Baked Clays and Sediments*. Eds. Creer, K.M., Tucholka, P. y Barton, C.E., Elsevier. Amsterdam.
- Creer, K.M., Valencio, D.A., Sinito, A.M., Tucholka, P., y Vilas, J.F., 1983. Geomagnetic secular variations 0-14000 yr BP as recorded by lake sediments from Argentina. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 74, 1, 199-222.
- Denham, C.R., 1975. Spectral analysis of palaeomagnetic time series: techniques and applications. *J. Geophys. Res.*, 80, 1897-1910.
- Hogg, T.E., 1978. The holocene geomagnetic field in Europe. Thesis. University of Edinburgh.
- Institute of Geological Sciences, 1981. Annual mean values of geomagnetic elements 1978. *Geomagn. Bull. Inst. Geol. Sci.*, n°10.
- Lund, S.P. y Banerjee, S.K., 1983. Late Quaternary secular

- variations recorded in central North American wet lake sediments, en *Geomagnetism of Baked Clays and Recent Sediments*. Eds. K.M. Creer, P. Tucholka y C.E. Barton, Elsevier, 211-222.
- Mazzoni, M.M. y Sinito, A.M., 1982. Estudio paleomagnético y sedimentológico de ambientes lacustres. Parte II: Lago Moreno. *Asoc. Geol. Arg., Rev.*, XXXVII, 3, 348-357.
- Mothersill, J.A., 1983. Palaeomagnetism of lake sediments: Results from the Great Lakes, en *Geomagnetism of Baked Clays and Recent Sediments*. Eds. K.M. Creer, P. Tucholka y C.E. Barton, Elsevier, 223-228.
- Rao, C.R., Mitra, J.K. y Matthal, A., 1966. *Formulae and tables for statistical work*. Calcutta: Statistical Publishing Society.
- Runcorn, S.K., 1959. On the theory of the geomagnetic secular variation. *Annals Geophys.*, 15, 87-92.
- Sinito, A.M., Alonso, M.S. y Ambrosini, G.L., 1983. Estudio paleomagnético y sedimentológico de ambientes lacustres. Parte III: Lago Nahuel Huapi, Brazo Campanario. *Asoc. Geol. Arg., Rev.*, XXXVIII, 2, 225-234.
- Skiles, D.D., 1970. A method of inferring the direction of drift of the geomagnetic field from palaeomagnetic data. *J. Geomagn. Geoelect.*, Kyoto, 22, 441-461.
- Turner, G.M., 1983. Palaeomagnetic results from recent european sediments, en *Geomagnetism of Baked Clays and Recent Sediments*. Eds. K.M. Creer, P. Tucholka y C.E. Barton, Elsevier, 202-211.
- Turner, G.M. y Thompson, R., 1982. Detransformation of the British geomagnetic secular variation record for Holocene times. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 70, 789-792.
- Valencio, D.A., Creer, K.M., Sinito, A.M., Vilas, J.F., Mazzoni, M.M., Spalletti, L.A., Romero, E.J. y Fernandez, C.A., 1982. Estudio paleomagnético, sedimentológico y palinológico de ambientes lacustres. Parte I: El Trébol. *Asoc. Geol. Arg., Rev.*, XXXVII, 2, 183-104.
- Valencio, D.A., Creer, K.M., Sinito, A.M., Mazzoni, M.M., Alonso, M.S. y Markgraf, V., 1985. Paleomagnetism, sedimentology, radiocarbon age determinations and palynology of the Llao-Llao area, south-western Argentina (41°S. 71.5°W): paleolimnological aspects. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 3, 109-147.