

ANALISIS DE LAS VARIACIONES GEOMAGNETICAS ECUATORIALES
EN PRESENCIA DE ANOMALIAS EN LA CONDUCTIVIDAD TERRESTRE

L. Romanelli, F.A. Hirsch y S. Duhau*

Centro Argentino de Estudios de Radiocomunicación y
Compatibilidad Electromagnética (CAERCEM)
Buenos Aires, República Argentina

RESUMEN

Se discuten los métodos usuales de separación de las variaciones geomagnéticas ecuatoriales en sus partes de origen externo e interno. Se muestra que éstos son inadecuados cuando existe una anomalía en la conductividad terrestre. Se propone una metodología que resuelve este problema y se la aplica a las variaciones geomagnéticas en las zonas ecuatoriales de Perú y Nigeria. Los resultados se comparan con los obtenidos en las mismas zonas por otros autores.

ABSTRACT

The usual methods of separating the equatorial geomagnetic daily variations into its internal and external parts are discussed. It is shown that they are inadequate in the presence of anomalies in the terrestrial conductivity. A methodology that solves this problem is proposed and applied to the geomagnetic variations at the equatorial zones of Peru and Nigeria. The results are compared with those obtained in the same zones by other authors.

* Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

1. INTRODUCCION

El objetivo de este trabajo es el análisis de las variaciones geomagnéticas diarias producidas por el electrojet ecuatorial en presencia de anomalías en la conductividad terrestre, para así poder inferir características de las corrientes ionosféricas que las producen. Es decir, para el estudio de estas corrientes a partir de las variaciones geomagnéticas, es necesario conocer sin ambigüedades qué partes provienen de fuentes externas y cuáles son inducidas por ellas en tierra.

En un trabajo reciente Duhau y Romanelli (1979) correlacionaron las variaciones geomagnéticas diarias en las proximidades del ecuador peruano con la corriente integrada en altura a partir de las mediciones obtenidas por Davis y otros (1967); Shuman (1970); Maynard (1967). Se mostro allí, que para obtener una buena correlación es necesario incluir corrientes que circulan a alturas de capa F y además, corrientes internas inducidas por el electrojet. Se encontró también que corrientes internas anómalamente grandes podrían ser producidas por una corriente extensa (planetaria).

Duhau y Romanelli (1980), analizaron este problema y concluyeron que una corriente incremental interna no nula es anómala y debería ser asociada con una parte interna planetaria anómala como aparentemente es el caso en las zonas analizadas. En consecuencia se ve la necesidad de introducir una metodología diferente que permita detectar anomalías en la conductividad terrestre y resolver este problema.

Un método que parece adecuado para separar corrientes localizadas en sus fuentes de origen externo de las de origen interno es el de las transformadas integrales propuesto por Siebert y Kertz (1957).

En este trabajo se presenta una metodología diferente para las zonas ecuatoriales de Perú y Nigeria que incluye el uso de transformadas integrales y evita hipótesis adicionales incompatibles con anomalías en la conductividad terrestre.

2. SEPARACION DE LAS VARIACIONES GEOMAGNETICAS DIARIAS EN SUS PARTES DE ORIGEN INTERNO Y EXTERNO

Para separar corrientes localizadas en sus fuentes de origen interno de las de origen externo, Siebert y Kertz (1957) propusieron el método de las transformadas integrales. A partir de entonces, los distintos autores que aplicaron ese método para zonas ecuatoriales (Forbush y Casaverde, 1961; Onwumechilli, 1967; Fambitakoye, 1973; Fambitakoye y Mayaud, 1976) han separado previamente la parte

planetaria del campo geomagnético de la parte incremental, lo que les lleva a incluir hipótesis adicionales que no resultan válidas en presencia de anomalías en la conductividad terrestre.

En efecto, se suele suponer que la tierra es una esfera conductora homogénea, es decir, condiciones de conductividad promedio, o normales, donde es válido suponer que el electrochorro no induce de manera apreciable y que la componente planetaria interna del campo geomagnético es una fracción β de la externa la que proviene del análisis en esféricos armónicos del campo global, siendo $\beta_{ph} = 0,4$ y $\beta_{pz} = -0,4$ las fracciones correspondientes a la componente vertical y horizontal de las variaciones.

Sin embargo, en trabajos recientes, Duhau y Romanelli (1979, 1980a) encontraron que el electrochorro induce de manera apreciable para las zonas ecuatoriales de Perú y Nigeria, zonas geográficamente equivalentes, y que una descripción adecuada de la corriente planetaria requeriría un valor de $\beta_{ph} = 0,7$ para Perú y cercano a éste para Nigeria (Duhau y Romanelli, 1980b) indicando, por lo tanto, anomalías en la conductividad terrestre.

Para la zona peruana, Forbush y Casaverde (1961) con las hipótesis de conductividad terrestre promedio separaron el campo planetario del incremental y luego aplicaron el método de Kertz a este último, encontrando un campo interno importante debido al electrochorro, y se lo atribuyeron a una corriente imagen que circula a 600 km de profundidad, pero en estas condiciones de conductividad, esta imagen estaría más allá de los 1000 km de profundidad (Duhau y Romanelli, 1980a) produciendo una componente inducida de la parte incremental despreciable, lo que indica, por lo tanto, que la conductividad terrestre en Perú es anómala, confirmando así los resultados expuestos anteriormente.

Por otra parte, Onwumechilli (1967) utilizando los mismos valores para β_{ph} y β_{pz} que Forbush y Casaverde, y separando previamente el campo planetario del incremental, al aplicar el método de Kertz a este último también encuentra un campo interno apreciable, indicando nuevamente que la conductividad terrestre es anómala en esa zona, aunque muy localizada, lo que llevaría a que se indujeran corrientes planetarias internas que impedirían describir el campo planetario interno mediante los coeficientes globales; además, este hecho cuestiona la existencia de una corriente imagen ubicada a 510 km de profundidad como la generadora de la parte incremental interna del campo como fuera supuesto por este autor.

Para la zona del Africa ecuatorial central, Fambitakoye (1973) encuentra que el electrochorro no induce apreciablemente. Con esta hipótesis y un modelo de corriente incremental propuesto por ellos, Fambitakoye y Mayaud (1976), determinaron simultáneamente los parámetros de esta corriente y de dos curvas que describen las partes planetarias de H y Z de manera independiente entre sí. Luego a

justaron los parámetros en juego de manera tal de reproducir correctamente los valores observados de las componentes horizontal y vertical del campo geomagnético para esas latitudes. Este método no asegura que ambas componentes provengan del mismo sistema de corrientes, no permite corroborar la validez de la hipótesis de partida de que el electrochorro no induce apreciablemente, y tampoco permite detectar posibles anomalías en la conductividad terrestre.

En vista de lo expuesto, es necesaria una metodología que permita separar el campo geomagnético en sus partes de origen interno y externo sin necesidad de recurrir a hipótesis adicionales o un conocimiento a priori del campo interno cuando existen anomalías en la conductividad terrestre.

2.2. Aplicación del método de Kertz.

Sean $Z(x)$ y $H(x)$ las componentes verticales y horizontales del campo geomagnético sobre un perfil permitido, el operador de Kertz está dado por:

$$Kf(u) = 1/\pi \int_{-\infty}^{\infty} f(u') du' / (u - u') \quad (1)$$

debiendo tomarse el valor principal de la integral.

De manera tal, que si H y Z son los valores observacionales de los campos geomagnéticos sobre la superficie de la tierra, los campos que provienen de las fuentes externas (e) y de las fuentes internas (i) están dados por:

$$\begin{aligned} H^e &= (H + KZ)/2 & Z^e &= (Z - KH)/2 \\ H^i &= (H - KZ)/2 & Z^i &= (Z + KH)/2 \end{aligned} \quad (2)$$

Los campos H y Z utilizados en este trabajo son aquellos medidos por Forbush y Casaverde (1961) para la zona ecuatorial peruana y por Ogbuehi y Onwumechilli (1964) para Nigeria.

Como estos campos están medidos en un intervalo finito y el método requiere el conocimiento de los mismos en el intervalo $(-\infty, \infty)$ los completamos con distintas funciones para evaluar la influencia de éstas sobre los resultados obtenidos, tal como fuera propuesto por Siebert y Kertz (1957).

Debido a que una corriente ionosférica no produce un campo substancial sobre la superficie de la tierra más allá de un radio de 600 km, lo que permite una extensión arbitraria del campo fuera del rango medido sin afectar mayormente los valores interiores a dicho intervalo, y sin el requerimiento usual de que el campo sea cero en los extremos del mismo, como fuera supuesto por Forbush y Casaverde (1961) y Fambitakoye (1973).

Se observó que H^e y H^i son insensibles a los distintos tipos de extrapolaciones usadas, por lo tanto el resultado es válido para todo el intervalo medido, mientras que para Z^e y Z^i es necesario restringirse al intervalo (-500 km, 600 km) en la zona peruana y (-300 km, 400 km) para Nigeria, ya que imponemos que las discrepancias entre las distintas extrapolaciones usadas sean menores que 2 nT.

3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En las figuras (1a y b) se comparan los resultados obtenidos por Forbush y Casaverde con los del presente trabajo. La discrepancia es más evidente en la componente H que en la Z, la causa podría ser que en esta última ha sido separada previamente la parte incremental de la planetaria e impusieron a ésta la condición, para eliminar asimetrías, que la zona norte sea idéntica a la sur.

Esto afecta más a la aplicación del operador de Kertz en esa componente que a la componente misma. También es importante notar que la suma de Z^i y Z^e no coincide para estos autores con la componente Z medida.

La existencia de anomalías en la conductividad terrestre surge inmediatamente de los resultados obtenidos. En condiciones promedio el signo de la parte inducida de la componente Z debe ser opuesto al de la parte externa, lo que no sucede en la zona sur (ver Figura 2b).

Asimismo, en estas condiciones de conductividad, una corriente localizada no induciría de manera apreciable, lo que no ocurre en este caso, como se observa en la figura 2a donde la componente H sigue la forma del electrochorro.

Debido al buen conocimiento que se tiene de la corriente externa en esa zona es posible analizar algunas de las características de la anomalía.

El electrochorro puede ser aproximado por una función dada por:

$$\alpha(x) = \left[\exp(-x/D_1)^{N_1} / (1 + (x/D_2)^{N_2}) \right]^{1/2}$$

con $N_1 = N_2 = 8$, $D_1 = 265$ km y $D_2 = 353$ km

con un máximo de corriente $J_0 = 0.094$ Amp.m⁻¹. Los campos planetarios externos H_p^e y Z_p^e (Ver Figura 3) se obtienen de la diferencia entre el campo externo total con la contribución del electrochorro considerando que toda la corriente incremental fluye en capa E.

En condiciones normales los campos internos H_n^i y Z_n^i serían $H_n^i = 0,4 H_p^e$ y $Z_n^i = -0,4 Z_p^e$. Se define además, H_a^i y Z_a^i , las contribuciones anómalas del campo interno, como diferencia entre el campo interno y la contribución normal inducida, los que se muestran superpuestos en la figura 4a.

Se desprende inmediatamente de allí, que un máximo de la contribución anómala para la componente Z se muestra en la zona de Yauca (190 km al sur del dip), donde el campo total presenta una importante asimetría. Una parte de la misma es debida a una asimetría en Z_p^e (Ver Fig. 3b), contrariamente a lo afirmado por Fambitakoye (1973), pero ésto no explica totalmente la asimetría en el campo total, ya que parte de ella es debida a una asimetría en Z_o^i , es decir una asimetría en la contribución anómala.

Lo expuesto confirma que una anomalía en la conductividad terrestre aparece no solamente como una contribución interna no nula del electrochorro sino que incluye una contribución interna planetaria también anómala.

En la fig. 5 se compara el resultado obtenido por Onwumechilli (1967) con el del presente trabajo. La mayor discrepancia se observa en los campos internos H^i y Z^i . Según nuestro resultado el primero es casi el doble en los extremos del intervalo mientras que el segundo difiere mucho en la zona norte. Esto conduce a que la separación dada por Onwumechilli no describa correctamente los campos totales.

Por otra parte, como fuera definido anteriormente, la contribución anómala de la componente Z surge de la observación directa de la fig. 6. Nótese que el campo anómalo es despreciable al norte del dip y mucho más grande que el campo normal al sur, siendo esta diferencia la que produce la asimetría en la componente Z.

4. CONCLUSIONES

a) Se propuso una nueva metodología para las zonas ecuatoriales que permite hallar las partes internas y externas del campo total sin separar previamente en una parte localizada (electrochorro) y en otra extensa (planetaria). Esto se logra aplicando el operador de Kertz a ambas componentes Z y H del campo geomagnético total.

b) Se encontró además que hay una importante anomalía en la conductividad terrestre en las zonas analizadas.

i) Para la zona sudamericana, esta anomalía produce un máximo de contribución interna de la componente Z en las proximidades de Yauca causando parte de la asimetría observada en esa componente.

ii) En Nigeria la conductividad terrestre es anómala y es la contribución anómala interna la que produce en la componente Z una mayor amplitud en el norte que en el sur.

RECONOCIMIENTOS

La publicación del presente trabajo cuenta con la autorización de la Dirección del CAERCEM. El mismo corresponde a un proyecto del Programa Nacional de Radiopropagación.

BIBLIOGRAFIA

- Davis, I.N., Burrows, K. y Stolarik, I.D., 1967: A Latitude Survey of the Equatorial Electrojet with Rocket-Borne Magnetometers; *J. of Geophys. Res.* 72, 1845.
- Duhau, S. y Romanelli, L., 1979: Electromagnetic Induction at the South American Geomagnetic Equator as determined from Measured Ionospheric Currents; *J. of Geophys. Res.*, 84, 1894.
- Duhau, S. y Romanelli, L., 1980a: The Ionospheric Current at the Nigerian Equator as determined from the Geomagnetic Daily Variation; *Planetary and Space Sci.* (en prensa).
- Duhau, S. y Romanelli, L., 1980b: La Inducción Electromagnética en el Ecuador Nigeriano; *Geoacta N°10*, 2, 65.
- Duhau, S., Romanelli, L. y Hirsch, F.A., 1980b: Anomalous Conductivity at the Peruvian Dip Equator (a publicarse)
- Duhau, S., Romanelli, L. y Hirsch, F.A., 1980c: The Geomagnetic Daily Variations and the Height Integrated Current at the Nigerian Dip Equator (a publicarse).
- Fambitakoye, O., 1973: Effects Induits par L'Electrojet Equatorial au Centre de l'Afrique; *Ann. Geophys.*, 29, 149.
- Fambitakoye, O. y Mayaud, P.N., 1976: Equatorial Electrojet and Regular Daily Variations SR. I. A determination of the Equatorial Electrojet Parameters; *J. Atmos. Terr. Phys.* 38, 1.
- Forbush, S. y Casaverde, M., 1961: Equatorial Electrojet in Peru; *Carn. Inst. Publ.* 620.
- Maynard, N.C., 1967: Measurements of Ionospheric Currents off the Coast of Peru; *J. of Geophys. Res.*, 72, 1863.
- Ogbuehi, P.O. y Onwumehilli, A., 1964: Daily and Seasonal changes in the Equatorial Electrojet in Nigeria. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 26, 889.
- Onwumehilli, A., 1967: Geomagnetic Variations in the Equatorial Zone: "Physics of Geomagnetic Phenomena" (Edited by Matsushita, S. y Campbell, W.H.) Vol. I, 427.
- Shuman, B.M., 1970: Rocket Measurement of the Equatorial Electrojet; *Geophys. Res.*, 75, 3889.
- Siebert, M. y Kertz, W., 1957: Zur Zerlegung eines lokalen erdmagnetischen Feldes in ausseren un inneren Anteil. *Nachr. Akad. Wiss. Gottingen, Math-Physik Fl, IIa. Math. Phys. Chem. Abt.* 87.

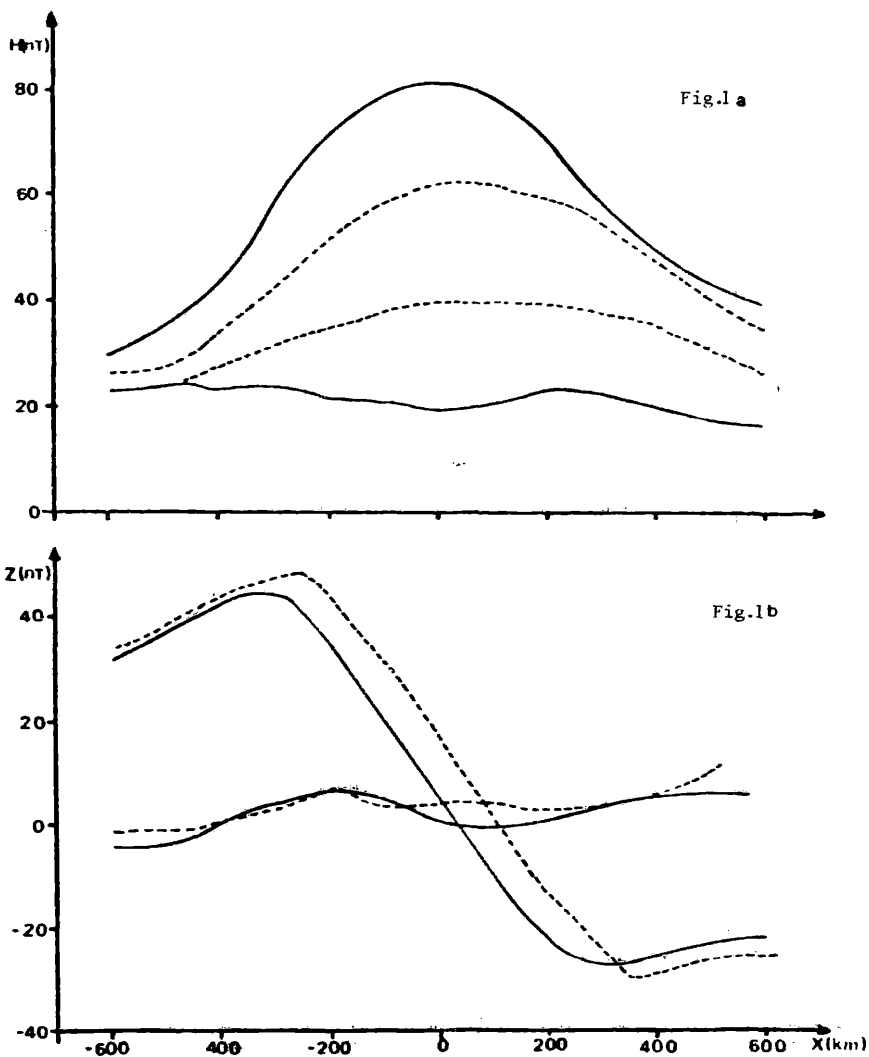


Fig. 1: Partes internas y externas de las componentes H y Z de las variaciones geomagnéticas diarias obtenidas por la aplicación del operador de Kertz. Línea llena, este trabajo; línea punteada, obtenido por Forbush y Casaverde (1961) para el Ecuador peruano. Ambos resultados normalizados a que el campo horizontal sea de 100 nT en Huancayo.

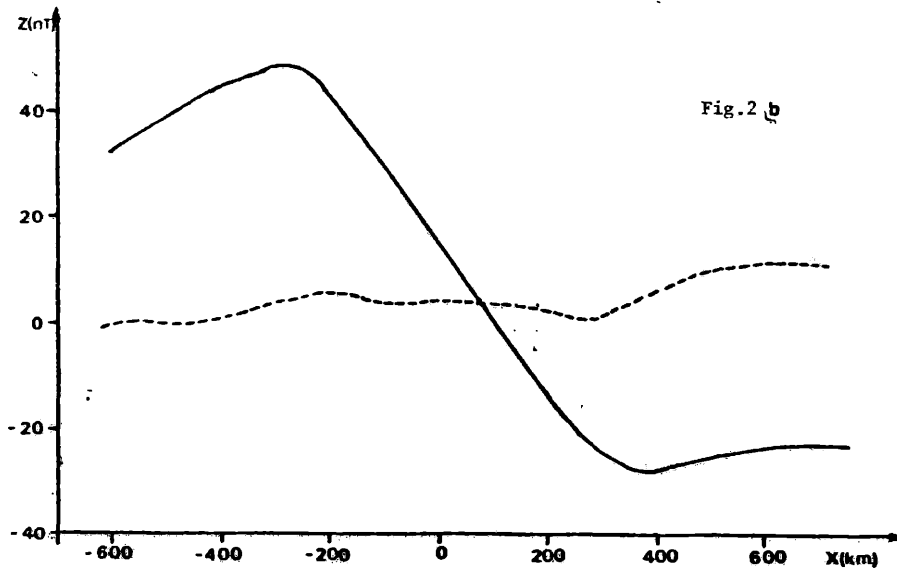
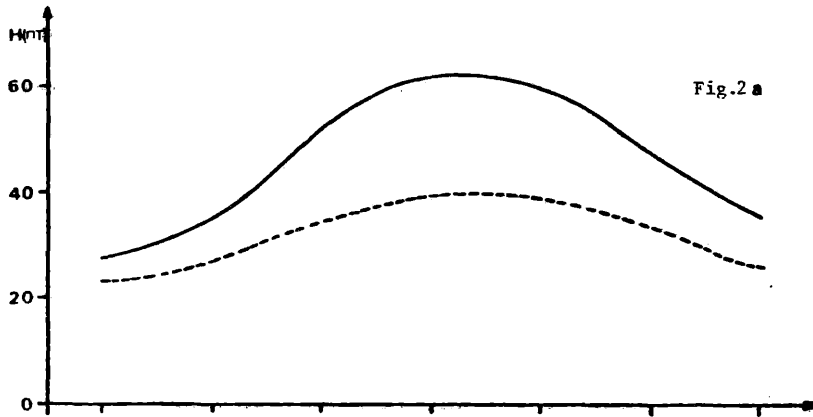


Fig. 2: Parte interna y externa de las componentes H y Z de las variaciones geomagnéticas obtenidas por la aplicación del operador integral. Como externo (línea llena); campo interno (línea punteada).

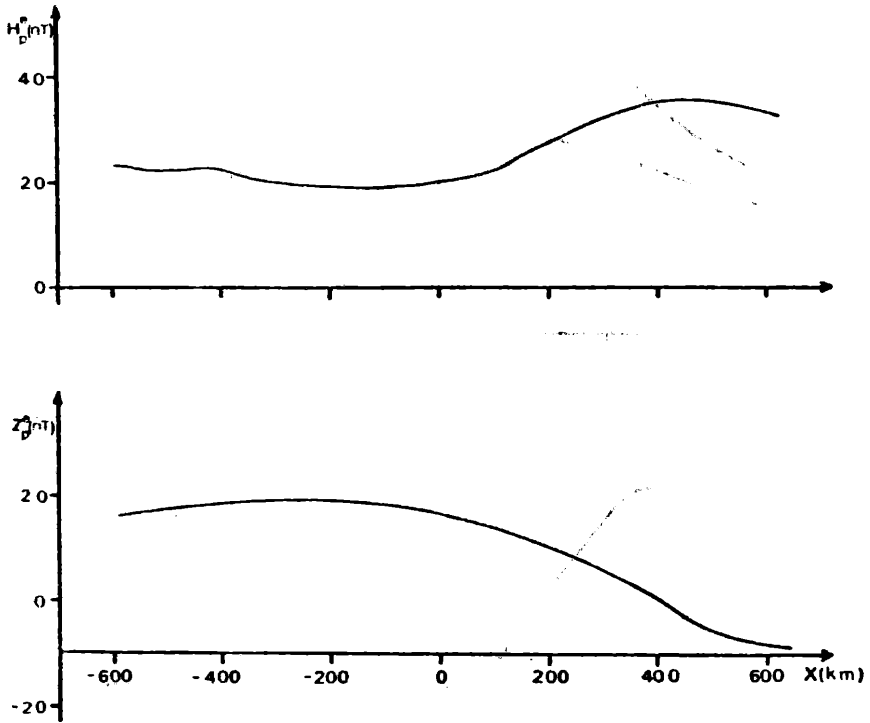


Fig. 3: Partes planetarias externas de las variaciones geomagnéticas para los componentes H y Z.

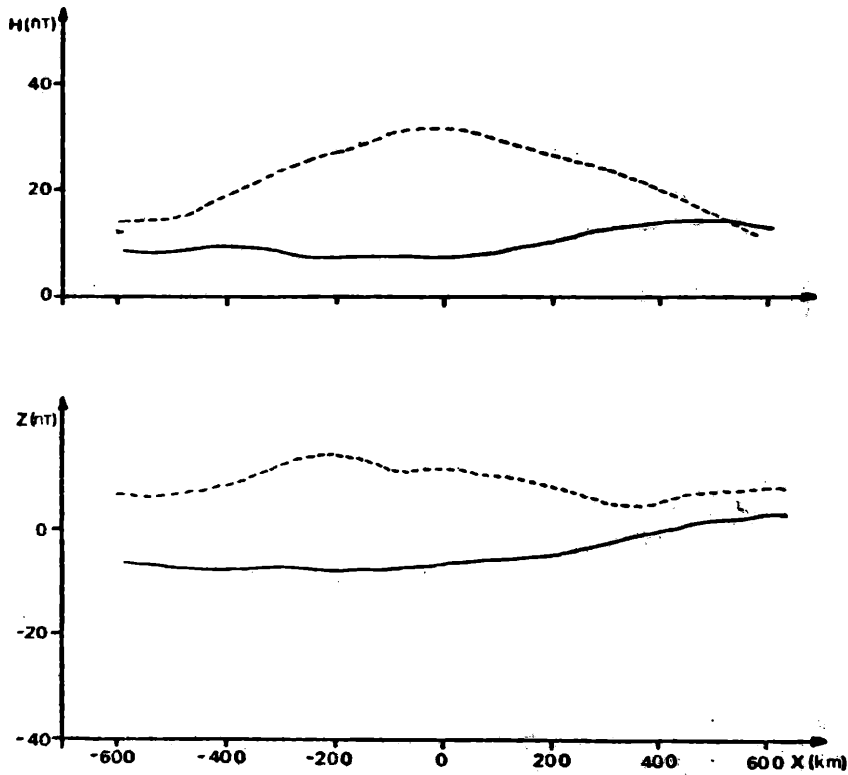


Fig. 4: Contribuciones normales $H_n = 0,4 H_p^e$; $Z_n = -0,4 Z_p^e$ (líneas llenas) y anomalías como diferencia entre el campo interno y la contribución normal (líneas punteadas) para las componentes H y Z del campo geomagnético. Ambos resultados están normalizados tal que el campo horizontal sea de 100 nT a 150 km del dip.

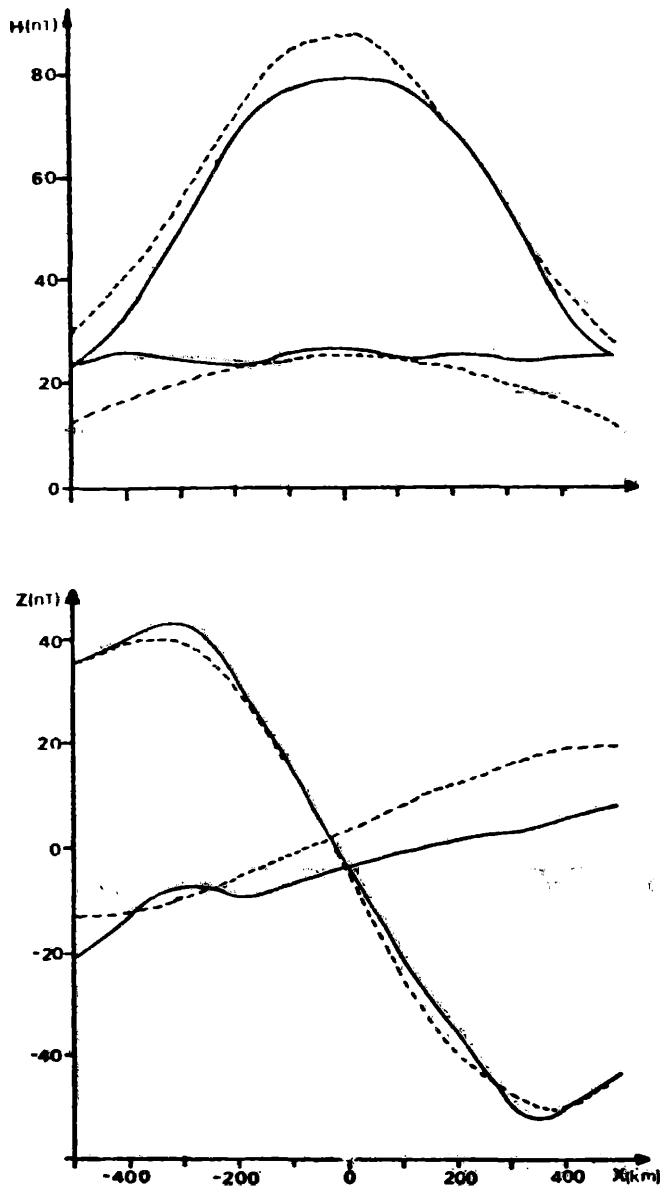


Fig. 5: Partes internas de las componentes H y Z de las variaciones geomagnéticas en Nigeria. Línea llena: el presente trabajo; línea punteada: obtenida por Onwumechilli (1967).

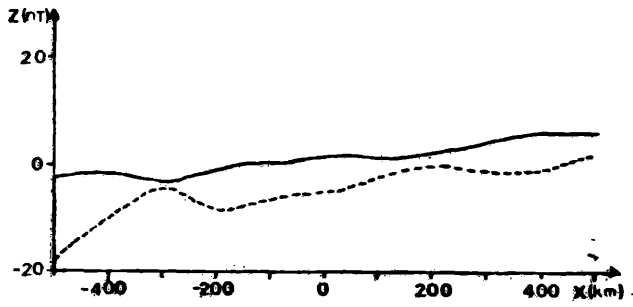


Fig. 6: Contribución normal $Z_n = -0,4 Z_p^e$ (línea llena), anomalía $Z_a^i = Z^i - Z_n$ (línea rayada) de la componente Z del campo geomagnético.

