

SONDAJE MAGNETOTELURICO PROFUNDO EN CHAMICAL, LA RIOJA
Jose Febrer (*), Bruno Baldis (**), y Hugo Fournier (***)

RESUMEN

Variaciones geomagnéticas en la banda de 10 a 10^4 seg. de período fueron registradas y procesadas para el sondeo magnetotelúrico (MT). Usando complementariamente un sondeo eléctrico vertical, tipo Schlumberger, con AB/2 hasta 1300 m se da una estimación del espesor sedimentario en el lugar.

El corte geoelectrico de interpretación para el sondeo profundo muestra: a) Una capa eléctricamente resistente de 170 Km de espesor, que se hace corresponder a las dos litosferas, Sudamérica y Nazca, superpuestas. No se ha detectado material conductor entre ambas placas. b) A partir de los 170 Km y hasta los 270 Km de profundidad se encuentra una capa conductora intercalada, que es interpretada como la astenosfera asociada a la placa de Nazca.

Con las evidencias provenientes de otros sondeos MT, los resultados sismológicos y el análisis geológico estructural, se propone un esquema - dando el espesor de las litosferas y la posición de la astenosfera - para la subducción de las placas. El mismo sería válido entre las latitudes 30 - 32°S.

ABSTRACT

Geomagnetic signals from 10 to 10^4 sec. of period were recorded and processed for the magnetotelluric (MT) sounding. Using complementarely a vertical electric sounding, Schlumberger type, with AB/2 up to 1300 m a sedimentary thickness estimation is provided in the site.

The interpreted geoelectrical cross section shows the following characteristics: a) A resistant layer, 170 Km thick, interpreted as the South America and Nazca superposed lithospheres. Not electrical conducting material is detected between them. b) From 170 to 270 Km an intercalated low resistivity layer, which is interpreted as the asthenospheric layer associated to the Nazca plate.

Taking into account additional evidencies coming from other MT soundings, seismo-

(*) Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales. Argentina.

(**) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina.

(***) Centre de Recherches Geophysiques. Francia.

logy and structural geology, a scheme for the subduction process of these plates is proposed. The asthenosphere position and lithosphere thickness are given. This model would be valid between 30 - 32 °S.

1. INTRODUCCION

El método magnetotelúrico (MT) y los llamados métodos magnetovariacionales se utilizan para investigar la resistividad eléctrica del interior de la tierra. El método MT se basa en la determinación de las funciones de transferencia que relacionan entre sí las componentes del campo electromagnético terrestre en un punto. Las mediciones se llevan a cabo sobre la superficie y la incógnita consiste en sintetizar la distribución de resistividad en el interior.

Fournier (1979), en la Reunión de Buenos Aires, expuso sobre los fundamentos, el desarrollo histórico y líneas de aplicación del método MT, lo que incluye el análisis de una extensa bibliografía.

2. EL SONDAJE MAGNETOTELURICO PROFUNDO EN CHAMICAL

El objeto del sondeo MT profundo en Chamical es avanzar en el conocimiento de la estructura interna en los primeros cientos de kilómetros en la región. La distribución de resistividad eléctrica de las rocas nos informa, entre otras cosas, sobre el estado térmico a estas profundidades. De allí es posible investigar circunstancias tales como la fusión parcial de las componentes y de esta forma sobre las propiedades reológicas de esas rocas, datos de utilidad para la comprensión de los mecanismos de la corteza terrestre.

2.1 Análisis previo de la geología regional

Ha sido demostrado y analizado cuantitativamente (Berdichevski, Dimitriev, 1976) que inhomogeneidades laterales de la cubierta sedimentaria pueden falsear la interpretación MT profunda.

Si lo que se desea es poner en evidencia la estructura eléctrica profunda es conveniente tomar algunos recaudos: a) Evitar de colocar el punto de sondeo sobre zonas fuertemente tectonizadas. b) Elegir una región de topografía suave, para evitar distorsiones de los campos electromagnéticos (Thayer, 1975) c). Descartar en lo posible las cuencas sedimentarias profundas, en especial si contienen estratos muy conductores. En efecto esto causa un efecto de pantalla con pérdida de definición de la estructura mas profunda (Fournier, 1970).

Todas estas consideraciones fueron tenidas en cuenta, dentro de lo posible, para la selección del lugar del sondeo.

Chamical se halla sobre la llanura conocida como Llanos Riojanos, 15 Km al E de la línea de fracturación principal de ascenso de la Sierra de los Llanos. Hacia el este la llanura se deprime en las Salinas Grandes. El campo de fallas regionales ha sido estudiado (Baldís et al., 1976). En la Fig.1 se muestra el mapa estructural regional, circunscripto a la zona del sondaje.

Topográficamente las condiciones en la llanura elegida son muy favorables. Desde el punto de vista estructural el lugar se halla convenientemente alejado de las grandes fracturas regionales conocidas. Al mismo tiempo en posición favorable, teniendo en cuenta los rasgos estructurales mayores, para caracterizar las condiciones geotectónicas en la escala que pretende el estudio.

En el ambiente de llanura, de acuerdo a los afloramientos de sedimentitas en la zona pedemontana adyacente, estarían presentes dos formaciones continentales Permo-Carbónicas, conocidas como Grupo del Paganzo. Este se compone de dos niveles, el Paganzo I o formación gris y el Paganzo II o formación roja. El espesor máximo total de las dos formaciones se estima en 630 metros (Castaño, Crespo, 1973). También de acuerdo a estos autores, regionalmente por datos de perforaciones, el espesor de cuartario en la zona aledaña a Chamical es reducido.

La conductancia total de la columna sedimentaria, S, fue determinada a través del sondaje eléctrico vertical (SEV) realizado y del sondaje MT, resultando,

$$S = \sum h_i / \rho_i = 250 \text{ Ohm}^{-1}$$

donde h_i y ρ_i son los espesores y resistividades respectivamente de los estratos sedimentarios. Este valor es satisfactorio en cuanto a no producir un apantallamiento de la estructura más profunda.

2.2 Realización del sondaje MT

El sondaje fue realizado sobre dos bandas de períodos que llamaremos "rápida" y "lenta". En la Fig. 2 se muestra un diagrama de bloques de la estación MT utilizada. La banda rápida abarca desde 10 a 2000 seg de período. Las líneas telúricas fueron tendidas, una en dirección NS + 25°E con longitud de 200 metros y la otra perpendicularmente con 170 metros de longitud. Como electrodos se utilizó cinta de plomo de pureza industrial, con una superficie aproximada de 500 cm² enterrados a un metro de profundidad.

El sensor magnético estaba compuesto por dos magnetómetros de inducción (Demicheli et al., 1975) construidos sobre la base de un diseño de Six y Petiau (1974).

Estos otorgan una salida eléctrica de 100 mV/nT en el centro de la banda. La banda lenta abarca las señales entre 500 a 86.400 seg. de período. En este caso se utilizó un magnetómetro tipo Flux-Gate, de tres componentes, cuya sensibilidad es de 10 mV/nT.

Las líneas telúricas fueron las mismas que las utilizadas en la banda rápida, la sensibilidad sobre el papel de registro se ajustó en ambos casos al valor $1.1 \text{ cm (mV/Km)}^{-1}$.

Se trabajó con registradores potenciométricos, de doble vía, marca Sefram. La velocidad de avance de papel fue de 10 mm/min para la banda rápida y de 0.1 mm/min para la banda lenta.

Los registros fueron procesados por lectura de oscilaciones individuales con la técnica descrita por Posterndorfer (1975) y las resistividades aparentes calculadas por la fórmula de Cagniard (1953),

$$\rho_a(T) = 0.2 T (E/H)^2$$

donde ρ_a es la resistividad aparente en Ohm m, T es el período en segundos de la oscilación, E y H las amplitudes de los campos eléctricos (mV/Km) y magnético (nT). El tratamiento estadístico se realizó tomando promedios de los logaritmos de la resistividad aparente (Fournier, Febrer, 1975).

Las resistividades aparentes, longitudinal y transversal, del sondeo están representadas en la Fig.4. La dirección longitudinal se refiere a la resistividad aparente calculada con la línea NS + 25°E, dirección coincidente con la de la tectónica regional obtenida por el análisis estructural.

El sondeo MT fue completado, para el estudio de las profundidades más someras, por un SEV, con el dispositivo Schlumberger, llevando la apertura AB/2 hasta 1300 m. La curva del SEV es la mostrada en la Fig.3, donde se da también el corte geoelectrico interpretado. Aquí el espesor de sedimentario es estimado en 580 metros.

2.3 Interpretación

Las curvas del sondeo MT, Fig. 4, muestran una rama ascendente común entre 15 y 150 seg. de período, lo que es indicativo de una disposición horizontal y homogeneidad de los estratos sedimentarios. Este hecho, junto con la moderada divergencia entre las curvas longitudinal y transversal a partir de los 150 seg. de período, a la vez que manteniendo la misma morfología, es argumento a favor de una distorsión por inhomogeneidad de la cubierta sedimentaria de pequeña magnitud.

La interpretación cuantitativa fue llevada a cabo por ajuste a la curva de resistividad longitudinal con modelos teóricos unidimensionales. Habitualmente la curva de resistividad longitudinal es la sujeta a menor efecto de distorsión.

En la Fig. 4, parte izquierda, se muestra el corte geoelectrico interpretado para el sondeo MT profundo de Chamental y también el obtenido en Pilar, Córdoba (Febrer et. al., 1977). Nótese la presencia, en Chamental, de una capa de baja resistividad intercalada con techo a 170 Km y cuya conductancia longitudinal

h/ρ se estima en 1000 Ohm^{-1} .

3. PERFIL DE SONDAJES M T POR LA BANDA DE PARALELOS 30 - 32°S EN SUDAMERICA

El sondeo M T de Chamental forma parte de un perfil de sondeos similares en la banda 30 - 32°S en Sudamérica. Con él se persiguen dos objetivos:

- 1) La zona activa asociada al borde de subducción de la placa de Nazca por debajo de Sudamérica.
- 2) La extensión hacia el este, para estudiar la transición hacia las zonas más estables del margen del Atlántico.

Las evidencias del momento actual (Proyecto ELAS, 1978) indican que la astenosfera, de ocurrencia global en el planeta, refleja en variaciones laterales de sus propiedades y de su profundidad las condiciones geodinámicas regionales. Los mecanismos de esta relación, en buena medida, restan aún a ser esclarecidos en todo su alcance. Una de las posibilidades de avanzar en esta línea de ideas es asociar la ocurrencia de capas de baja velocidad (Low Velocity Layer, L V L) y de baja resistividad eléctrica (Low Resistivity Layer, L R L) con la posición de la astenosfera.

Los estudios sismológicos en el borde occidental de Sudamérica coinciden en aceptar que los focos sísmicos se alojan dentro de las litosferas de Nazca y Sudamérica. Existen sin embargo opiniones desencontradas en cuanto al espesor de la litosfera en Sudamérica. Por otra parte los estudios sismológicos como de sísmica de refracción, sobre la existencia o posición de la L V L hasta el presente son aún escasos y no concluyentes.

En un trabajo reciente de Barazangul e Isacks (1976) se muestra, a través de una selección cuidadosa de los datos de sismos, que la subducción de la placa de Nazca bajo Sudamérica no se produce con un ángulo de buzamiento único, sino que existe una segmentación en sentido E W del plano de sismicidad asociado.

En la Fig. 5 b) se muestra, tomado de los autores citados, la distribución de hipocentros de sismos encontrada para la banda 27 - 33°S. La particularidad en esta banda latitudinal consiste en que el ángulo del plano de sismicidad (plano de Benioff) es de solo 10°.

En la Fig. 5 a) se indican en la misma escala la posición de las L R L observadas en Pilar y Chamental. Los conos en trazos, cuyo ángulo generatriz es de 45°, limitan la extensión lateral efectiva esperada en torno al punto de sondeo representado por el vértice del cono. De hecho la resistividad aparente M T - cuando aumenta el período considerado se interesan profundidades mayores en el estudio - representa el promedio de la resistividad real de las rocas contenidas en la sucesión de conos que se superponen.

En la Fig. 5 b) se indica la posición de las capas de baja resistividad, estable-

ciendo continuidad entre los sondeos, con respecto a la distribución de hipocentros.

Ensayemos ahora la hipótesis, ya mencionada, que la L R L corresponda al volumen asociado a la astenosfera. Desde el punto de vista de la sismología la astenosfera, formada por rocas que por su menor rigidez son incapaces de almacenar tensiones hasta el límite de ruptura, no deben alojar sismos. Inspeccionando la Fig. 5 b) las L R L no albergan hipocentros de sismos.

Un hecho remarcable es la ocurrencia de dos L R L superpuestas en Pilar. En Chamical sólo se observa la segunda de ellas, si la primera más superficial existe su espesor ha de ser inferior a 5 Km. Esta limitación está asociada al poder de resolución del método.

Dentro de la Teoría de la Tectónica Global o de Placas, se acepta que globalmente la litosfera, con un espesor de un centenar de kilómetros yace sobre la astenosfera cuyo espesor es del mismo orden. La subducción de las placas litosféricas que estamos estudiando podría mostrar en una sección transversal los siguientes elementos: litosfera de Sudamérica/ residual de la astenosfera de Sudamérica/ litosfera de Nazca/ astenosfera de Nazca.

En el esquema del corte transversal de la Fig. 5 b) se observa precisamente lo que podría ser la sucesión de capas mencionada más arriba. Nótese también que la interpretación de las L R L presenta un buen acuerdo con el ángulo de buzamiento de 10° para el plano de sismicidad propuesto por Baranzagui e Isacks (1976).

La astenosfera intermedia o residual se extingue en esta latitud por acunamiento a una distancia de la fosa oceánica mayor que la habitual; en efecto, en el esquema clásico esto ocurre en coincidencia con la línea de volcanes asociada al borde de subducción. Precisamente como fue señalado por Baranzagui e Isacks, entre los $27 - 33^\circ\text{S}$ no existe vulcanismo terciario-cuaternario en la cordillera andina en coincidencia con el bajo ángulo para el plano de sismicidad. Una situación similar se repite entre las latitudes $2 - 15^\circ\text{S}$. Este muestra bien que el estudio asociado a lo que ocurre en la banda $30 - 32^\circ\text{S}$ no puede ser desvinculado en ningún momento de los procesos en escala continental.

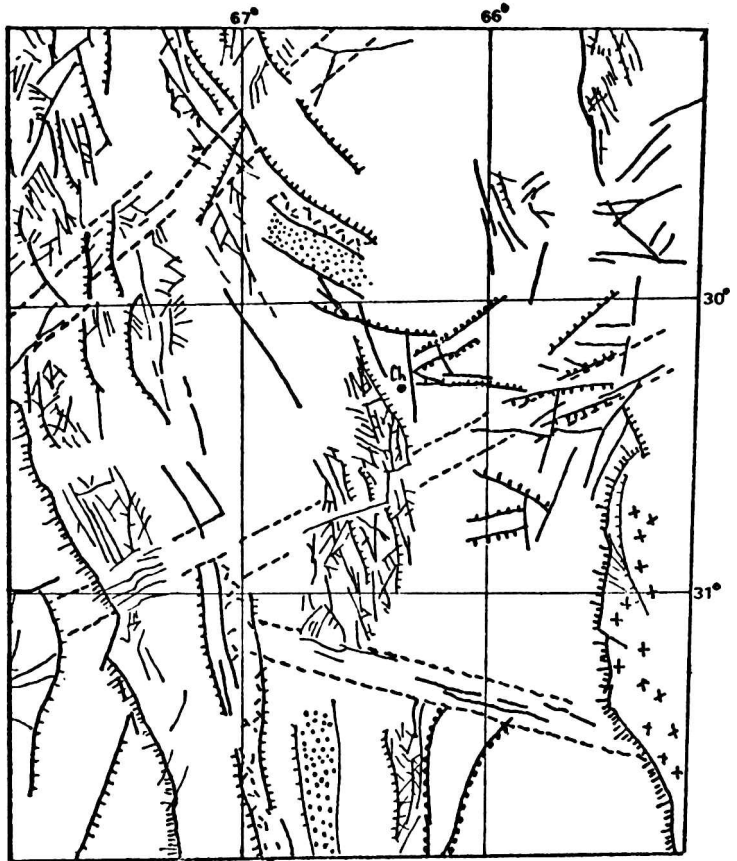
Los resultados M T, dando la posición de las capas de baja resistividad, L R L, cuya asociación a la astenosfera parece bien plausible, confirman la cuasi-ausencia de la misma sugerida también por el pequeño ángulo del plano de sismicidad en la banda $30 - 32^\circ\text{S}$. Al mismo tiempo indican, esta vez por ausencia, el papel preponderante de la astenosfera en asociación con las grandes efusiones magnéticas.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la ex-Comisión Nacional de Estudios Geoheliosfísicos y a la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales por la ayuda brindada merced a la cual fue posible la realización de este trabajo. En la misma

forma a la Jefatura y personal de la Base Chmical de la Fuerza Aérea por la asistencia otorgada; al Grupo de Geofísica del Observatorio Nacional de La Rioja por la colaboración prestada especialmente en la realización del sondaje eléctrico. Al técnico Sr. Horacio Irigoien que participó una vez más, con su efectividad habitual en las tareas del sondaje.

EPIGRAFES DE LAS FIGURAS

- Fig. 1: Mapa estructural de fallas geológicas en torno a Chamical
- Fig. 2: Diagrama de bloques de la estación de registro magnetotelúrico para la banda rápida.
- Fig. 3: El sondaje eléctrico vertical, con el dispositivo Schlumberger, en Chamical. $AB/2$ indica la semidistancia entre los electrodos de inyección de corriente. En la parte inferior, el corte geoelectrico de interpretación, en este caso la profundidad está indicada por la abscisa del gráfico superior, que es logarítmica.
- Fig. 4: Curvas M T de los sondajes magnetotelúricos en Pilar y Chamical. En la parte izquierdalo los cortes geoelectricos interpretados.
- Fig. 5: (a) Corte transversal E - W por la banda de paralelos $30 - 32^{\circ}S$. El origen de abscisas es tomado a partir de la fosa del Pacífico hacia el este. En grisado se indica la posición ocupada por las capas de baja resistividad en la interpretación de los sondajes de Pilar y Chamical. Los conos dibujados en líneas de trazos delimitan la extensión lateral efectiva esperable del sondaje. (b) Idem anterior, mostrando la distribución de hipocentros (Barazangi e Isacks, 1976), la zona rayada la posición de la astenosfera propuesta en base a los resultados M T presentados.











- | | | | |
|---|-------------------------------------|---|------------------------------------|
|  | Megafracturas |  | Fracturas detectadas por Geofisica |
|  | Principales frentes de fracturacion |  | Fosas notables |
|  | Fracturas Regionales |  | Pilares cubiertos |
|  | Fracturas menores |  | Núcleo Cretógeno de Córdoba |

fig.1

estacion MT

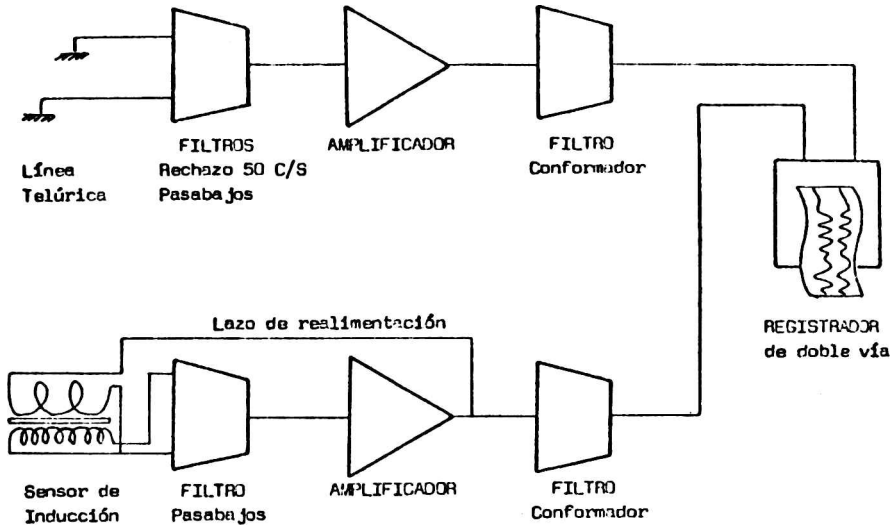


fig 2

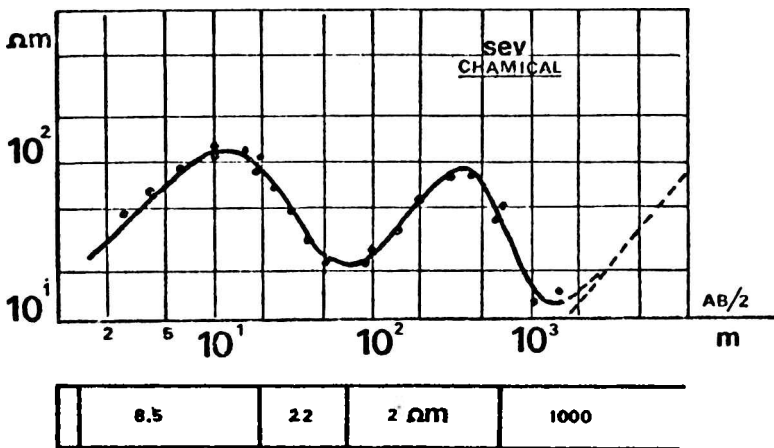
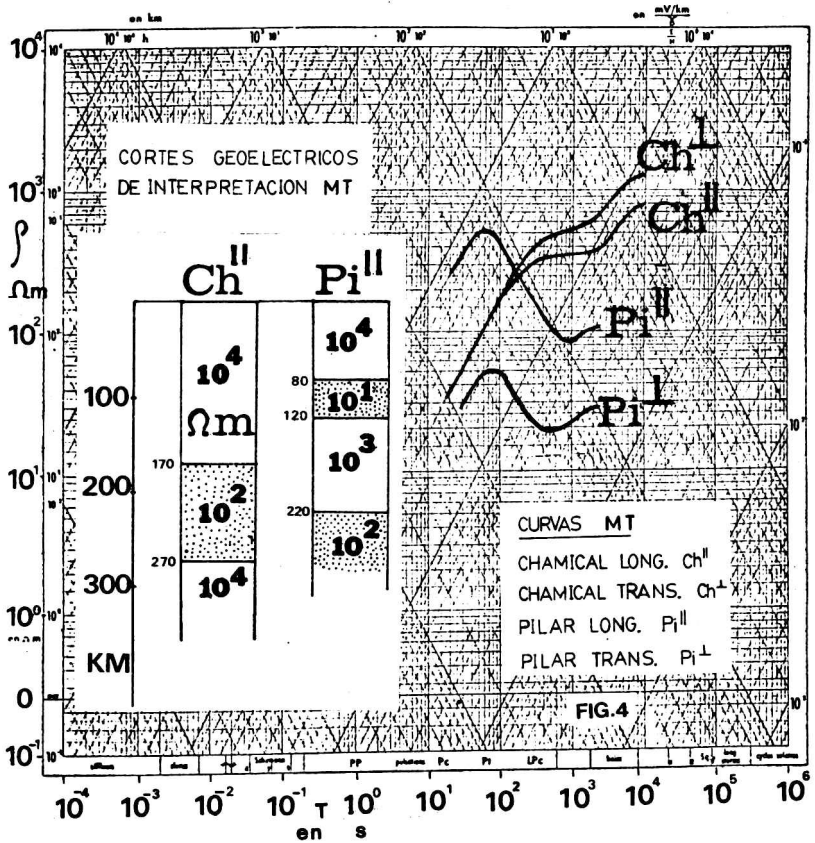


fig. 3

ANALISE DES SOLUTIONS DU SYSTEME $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sigma_0} \left(\frac{1}{\sigma} \right) ; k = \frac{\sqrt{\mu_0 \rho_0 T}}{\sigma}$
(Problème au sens de la méthode L. Capozzi)



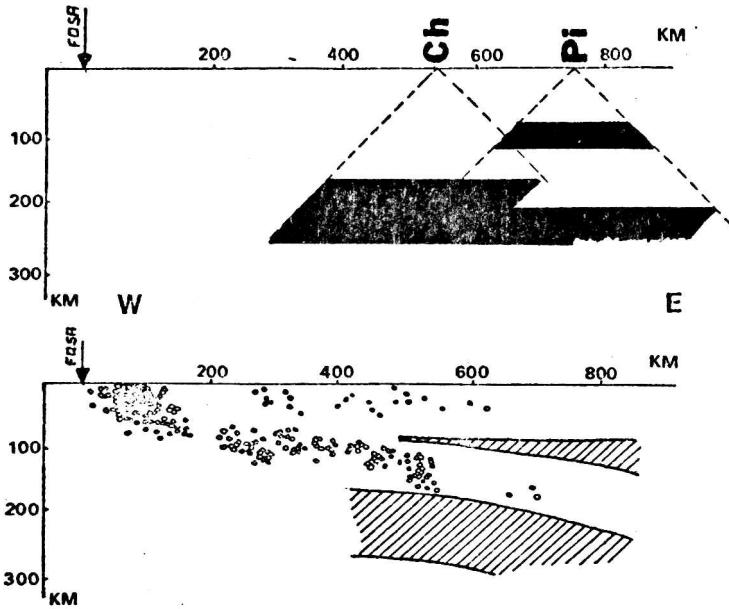


fig.5 a) y b)

BIBLIOGRAFIA

- Baldis, B., Viramonte, J., Salfity, J. y 1976: Geotectónica de la comarca comprendida entre el cratógono central argentino y el borde austral de la Puna.; Segundo Congr. Iberoam. de Geolog. Econom., Buenos Aires.
- Baranzagui, M. y Isacks, B., 1976: Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America; *Geology*, 4, 686-.
- Berdichevski, M. y Dimitriev, V., 1976: Distorsion of magnetic and electric fields by near surface lateral inhomogeneities; in *Geothermal and geoelectric studies* A. Adam, Editor, Akademiai Kiado, Budapest.
- Cagniard, L., 1953: Basic theory of magnetotelluric method of geophysical prospecting; *Geophysics*, 18, 3.
- Castañó, O. y Crespo, H., 1973: Estudio para abastecimiento de agua a Chamental; Dirección Provincial de Estudios Hidrológicos. Estudio Técnico.
- Demicheli, J., Febrer, J. y García, E., 1975: Un magnetómetro de inducción con realimentación de flujo y amplificación electrónica; 8a. Reunión AAGG, Salta.
- Febrer, J., Demicheli, J., García, E. y Fournier, H., 1977: The magnetotelluric sounding of Pilar, Cordoba, Argentine; *Acta Geoph. Geodaet. et Montanist.*, *Akad Sci. Hungary.*, 12, T. (1-3).
- Fournier, H., 1970: These Doctorat d'Etat Faculté des Sciences, Univ. de Paris.
- Fournier, H. y Febrer, J., 1975: Gaussian character of distribution of magnetotelluric results working in log-space.; *Phys. Earth and Plan. Int.*, 12, 359-
- Fournier, H., 1979: Exploración magnetotelúrica; *GEOACTA*, 9, 1.
- Posterdorfer, G., 1975: Principles of magnetotelluric sounding; Gebrüder Borntrager, West-Berlin.
- PROYECTO ELAS (1978-85) Proyecto de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía, Grupo 3, División I denominado : Electrical Conductivity of the Asthenosphere; *IAGA News*, Noviembre 1978.
- Six, M. y Petiau, G., 1974: Comunicación oral sobre desarrollo de magnetómetros a inducción en el Institut de Physique du Globe, Paris.
- Thayer, R., 1975: Topographic distorsion of telluric currents; *Geophysics*, 40, 1.