

SOBRE LA DETECTABILIDAD DE ESTRUCTURAS BIDIMENSIONALES
A PROFUNDIDADES SOMERAS . A PARTIR DEL METODO
AUDIO MAGNETOTELURICO

Maria Cristina Pomposiello

Centro de Investigaciones en Recursos Geológicos (CIRGEO CONICET)

Ana María Osella

Departamento de Física .Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
Universidad de Buenos Aires / CONICET

Buenos Aires , Republica Argentina

RESUMEN

Se analiza la sensibilidad del método Audio-Magnetotelúrico (AMT) para detectar estructuras presentes a profundidades someras y en el rango de frecuencias entre 10 Hz y 1000 Hz.

Se proponen distintos modelos bidimensionales y se calculan las respuestas magnetotelúricas utilizando un *Método de Elementos Finitos* y suponiendo una fuente externa uniforme . Se varían los parámetros del modelo para estimar la resolución con que estos pueden ser determinados . Se discuten los resultados.

ABSTRACT

The sensitivity of the Audio-Magnetotelluric method (AMT) for the determination of structures at shallow depths is analyzed at frequencies between 10 Hz and 1000 Hz.

Several two dimensional earth resistivity models are proposed and their magnetotelluric responses are calculated by a *Finite Element Method* , assuming an external source uniform.

The parameters of the model are modified to estimate their detectability . A general analysis of the results is made .

INTRODUCCION

El sondeo Audio-Magnetotelúrico (AMT) es probablemente uno de los métodos más adecuados para la determinación de las propiedades eléctricas de los primeros kilómetros de la corteza terrestre.

El rango de frecuencias utilizadas con fuentes naturales abarca entre 10 Hz a 1000 Hz. En el límite de las altas frecuencias la interpretación de los resultados es en la mayoría de los casos afectada por la relación señal-ruido.

Con el objetivo de analizar la sensibilidad de este método en la detección de estructuras a profundidades someras, en este trabajo se presentan las respuestas electromagnéticas de un conjunto de modelos bidimensionales en el rango de frecuencias entre 10 Hz a 1000 Hz.

Se realizó el análisis para varias estructuras, tales como un horst, una falla vertical, un cuerpo resistivo enterrado y un cuerpo conductor enterrado.

METODOLOGIA DE TRABAJO

El programa de cálculo utilizado, desarrollado por *Wannamaker et al. (1987)* permite determinar los campos electromagnéticos sobre la superficie de la tierra para los dos modos: a) transversal eléctrico (TE) (campo eléctrico paralelo al eje de simetría) y b) transversal magnético (TM) (campo magnético paralelo al eje de simetría).

Este método considera los campos eléctricos y magnéticos dentro y fuera de la inhomogeneidad (cuerpo bidimensional) como la suma de una componente primaria (que representa al campo cuando el cuerpo está ausente) y una componente secundaria (que representa la contribución debido a la presencia del cuerpo). Esta formulación es muy ventajosa, porque mejora la precisión en los cálculos (*Hohmann, 1983*).

Para medios isotrópicos, no ferromagnéticos y en ausencia de rocas ígneas, de modo de verificar la suposición de linealidad, las ecuaciones de *Maxwell* para el modo TE son:

(1)

$$\frac{\partial E_{xs}}{\partial z} = -z \hat{H}_{ys} \tag{2}$$

$$\frac{\partial E_{ys}}{\partial y} = -z \hat{H}_{zs} \tag{3}$$

$$\frac{\partial H_{zs}}{\partial y} - \frac{\partial H_{ys}}{\partial z} = \hat{\gamma} E_{xs} - \Delta \hat{\nu} E_{xp}$$

donde $\hat{\gamma} = \sigma + i\omega\epsilon$, $\hat{z} = i\omega\mu$, $\Delta \hat{\nu}$ da la diferencia entre los valores que toma el parámetro ν en el medio y en el cuerpo bidimensional , los suscriptos p y s se refieren a los campos primarios y secundarios , σ es la conductividad , ω es la frecuencia ϵ y μ_0 son la constante dieléctrica y la permeabilidad en el vacío. Sustituyendo (1) y (2) en (3) y agrupando se obtiene la ecuación de *Helmholtz* para el modo 1E :

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial E_{xs}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial E_{xs}}{\partial z} \right) - \hat{\gamma} E_{xs} - \Delta \hat{\nu} E_{xp} \tag{4}$$

Similarmente , las ecuaciones de Maxwell para las componentes secundarias en el modo 1H son :

$$\frac{\partial H_{xs}}{\partial z} = \hat{\gamma} E_{ys} - \Delta \hat{\nu} E_{yp} \tag{5}$$

$$\frac{\partial H_{ys}}{\partial y} = -\hat{\gamma} E_{zs} - \Delta \hat{\nu} E_{zp} \tag{6}$$

$$\frac{\partial E_{zs}}{\partial y} - \frac{\partial E_{ys}}{\partial z} = \hat{z} H_{xs}$$

Sustituyendo (5) y (6) en (7) , la ecuación de *Helmholtz* para el

modo IM es la siguiente :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\hat{y}} \frac{\partial H_{xs}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\hat{v}} \frac{\partial H_{xs}}{\partial z} \right) - \hat{z} H_{xs} = - \frac{\Delta k^2}{\hat{v}} H_{x0} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\Delta y}{\hat{v}} \right) E_{y0} \quad (H)$$

donde $\Delta k^2 = - \Delta y \hat{z}$ y E_{zp} es cero.

Observese que las ecuaciones de Helmholtz para los campos secundarios son las mismas que para el campo total (e.g. Coqoon, 1971) con la adición de términos fuentes que involucran a los campos primarios y la diferencia de conductividad entre el cuerpo y el medio que lo aloja.

Los algoritmos más usados para resolver estas ecuaciones diferenciales utilizan el método de *Elemento Finitos* o de *Diferencias Finitas*.

El método de *Elemento Finitos*, consiste en asumir una forma funcional de los campos, en pequeñas regiones de una geometría dada. El programa desarrollado por Wannamaker et al. (1987) utiliza el *Método de Elementos Finitos* con subdominios triangulares, considerando que los campos varían linealmente dentro de cada triángulo (*Técnica de Galerkin. (Hehner and Thornton, 1982).*)

El método de *Elemento Finitos* es más conveniente para modelar cuerpos bidimensionales que el método de *Diferencias Finitas*, por que éste permite trabajar con estructuras que presentan discontinuidades como en los casos analizados en este trabajo.

Para representar al *cuerpo bidimensional* hay que diseñar una malla que tenga en cuenta las dimensiones características de la estructura presente y las resistividades eléctricas.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 1 se presentan las estructuras estudiadas y en la Tabla I se especifican los parámetros geométricos y las resistividades eléctricas de los distintos modelos.

Para los dos modos (IE y IM) se han analizado las resistividades aparentes, las fases, la componente vertical Hz

del campo magnético en función de la distancia y en función de la frecuencia.

En las Figuras II a VII se presentan la resistividad aparente y la fase para algunos casos. La componente vertical Hz para el modo TE no se ha graficado por ser muy poco significativo su valor.

Con respecto a cuáles estructuras serán difíciles de detectar, se ha adoptado como criterio para este análisis, que respuestas que se aparten en menos de un 15 % de las respuestas obtenidas para el caso unidimensional no serán reconocidas por el sondeaje Audio Magnetoteléxico.

En los casos presentados se ha observado que en general estos modelos de estructuras serán detectados por lo menos para algún rango de frecuencias. Además, surge del análisis que la distorsión con respecto al modelo unidimensional es más pronunciada para el modo TM, pero se recupera más rápido con la distancia al centro de la estructura que el modo TE.

Por ejemplo, en el caso del *horst* (modelo 1) se detecta bien para todas las frecuencias en el modo TM y sólo para 100 Hz en el modo TE. Sucede algo similar para los modelos: 2, 3, 4, 5.

En el caso de la *falla vertical* para el modelo 1 se detecta bien los dos modos y en todas las frecuencias estudiadas, en cambio para los modelos: 4, 5, 6, 7 se está justo en el límite de detección (diferencias del orden del 15 %).

Los resultados obtenidos para el caso de *cuerpo enterrado* son similares a los obtenidos en el *horst*.

CONSIDERACIONES FINALES

Por último cabe destacar que los modelos presentados son teóricos y que en la naturaleza las estructuras reales son en general cuerpos tridimensionales. Es por esta razón que cuando se trabaja en el campo, no se reproduce la condición de bidimensionalidad. Sin embargo, muchas veces es posible encontrar un eje de simetría local que permita aproximar esos cuerpos tridimensionales a casos bidimensionales, al menos en algún rango de frecuencia.

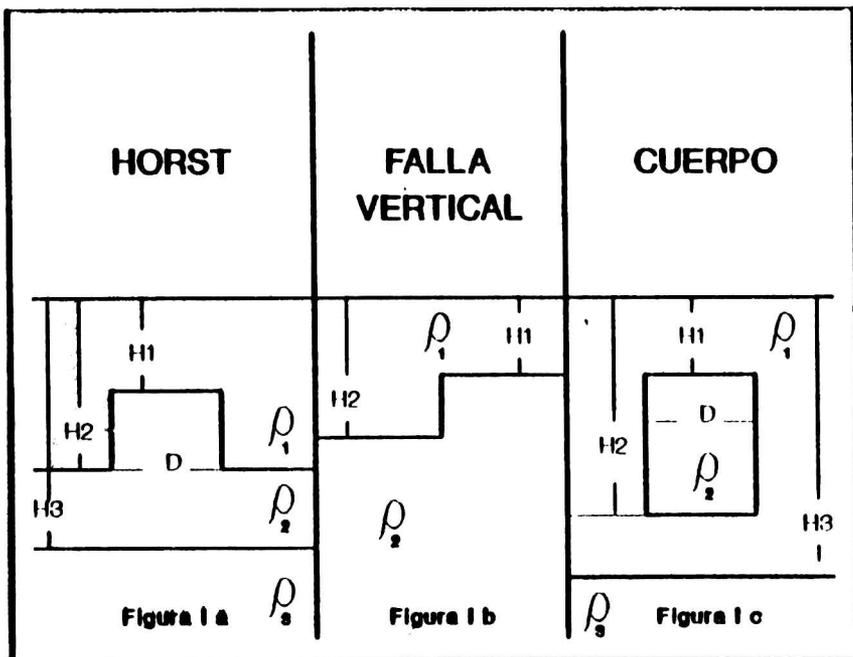
REFERENCIAS

- Coggon , J. H. , 1971 , Electromagnetic and electrical modeling by the finite-element method : Geophysics , 36 , 132-155.*
- Holmann , G. W. , 1983 , Three-dimensional EM modeling : Geop. Surv. 6 (1/2) , 27-54.*
- Huebner , K. H. and Thornton , E. A. , 1982 , The finite element method for engineers : John Wiley & Sons. Inc., New York , 623 p.*
- Mannamaker , P.E. , Stodt , J.A. , and Rijo , L. , 1987 , A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling : Geop. J. Roy. Astr. Soc. , 88 , 277-296.*

TABLA 1-ESTRUCTURAS BIDIMENSIONALES ESTUDIADAS

| MODELOS | H ₁ | H ₂ | H ₃ | D | ρ_1 | ρ_2 | ρ_3 |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|-----|----------|----------|----------|
| INRSI | | | | | | | |
| 1 | 50 | 100 | 200 | 500 | 15 | 120 | 8 |
| 2 | 50 | 100 | 200 | 250 | 15 | 120 | 8 |
| 3 | 50 | 100 | 200 | 50 | 15 | 120 | 8 |
| 4 | 50 | 75 | 175 | 500 | 15 | 120 | 8 |
| 5 | 50 | 75 | 175 | 50 | 15 | 120 | 8 |
| FALLA VERTICAL | | | | | | | |
| 1 | 300 | 455 | | | 25 | 2000 | |
| 2 | 300 | 400 | | | 25 | 2000 | |
| 3 | 140 | 210 | | | 25 | 2000 | |
| 4 | 140 | 180 | | | 25 | 2000 | |
| 5 | 140 | 160 | | | 25 | 2000 | |
| 6 | 140 | 150 | | | 25 | 2000 | |
| 7 | 140 | 145 | | | 25 | 2000 | |
| CUERPO CONDUCTIVO | | | | | | | |
| 1 | 30 | 60 | | 30 | 16 | 1 | 80 |
| 2 | 30 | 45 | | 30 | 16 | 1 | 80 |
| 3 | 30 | 37.5 | | 30 | 16 | 1 | 80 |
| 4 | 30 | 35 | | 30 | 16 | 1 | 80 |
| 5 | 30 | 60 | | 30 | 16 | 5 | 80 |
| CUERPO RESISTIVO | | | | | | | |
| 1 | 30 | 80 | | 30 | 16 | 120 | 80 |
| 2 | 30 | 60 | | 30 | 16 | 120 | 80 |
| 3 | 30 | 45 | | 30 | 16 | 120 | 80 |
| 4 | 30 | 37 | | 30 | 16 | 120 | 80 |
| 5 | 30 | 45 | | 30 | 16 | 120 | 180 |

Distancia (H.D) en metro y Resistividad aparente (ρ_i) en ohm-metro.



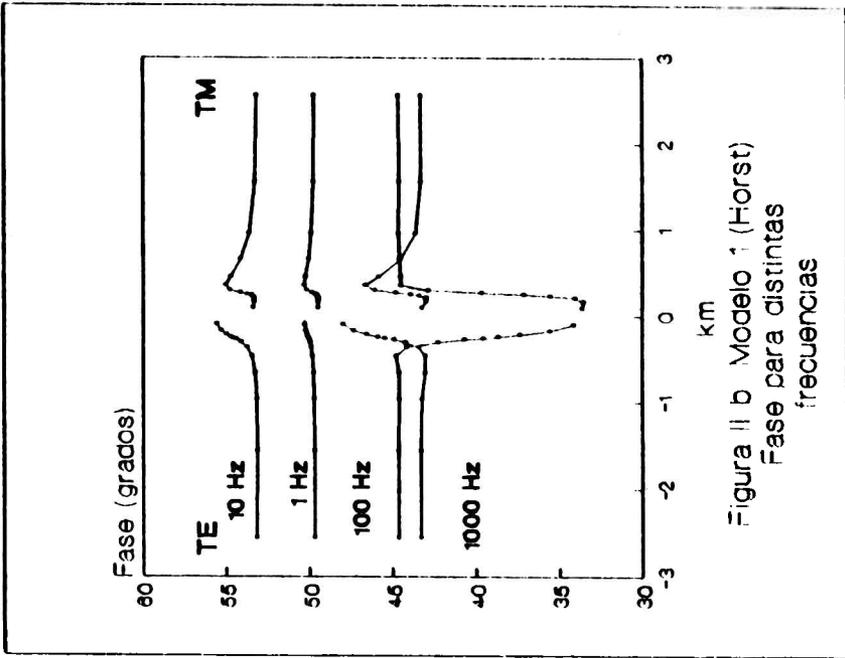


Figura 11 b Modelo 1 (Horst)
Fase para distintas
frecuencias

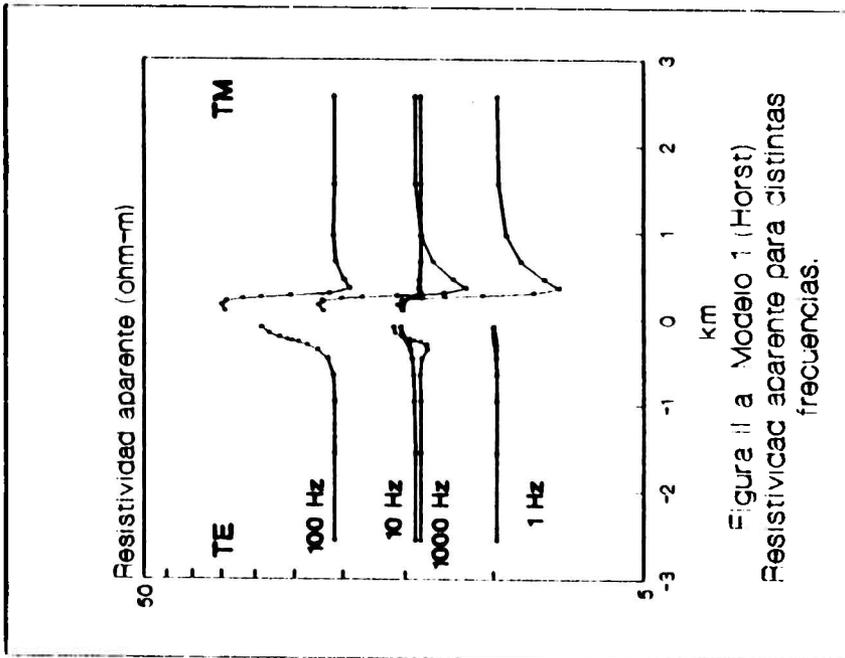


Figura 11 a Modelo 1 (Horst)
Resistividad aparente para distintas
frecuencias.

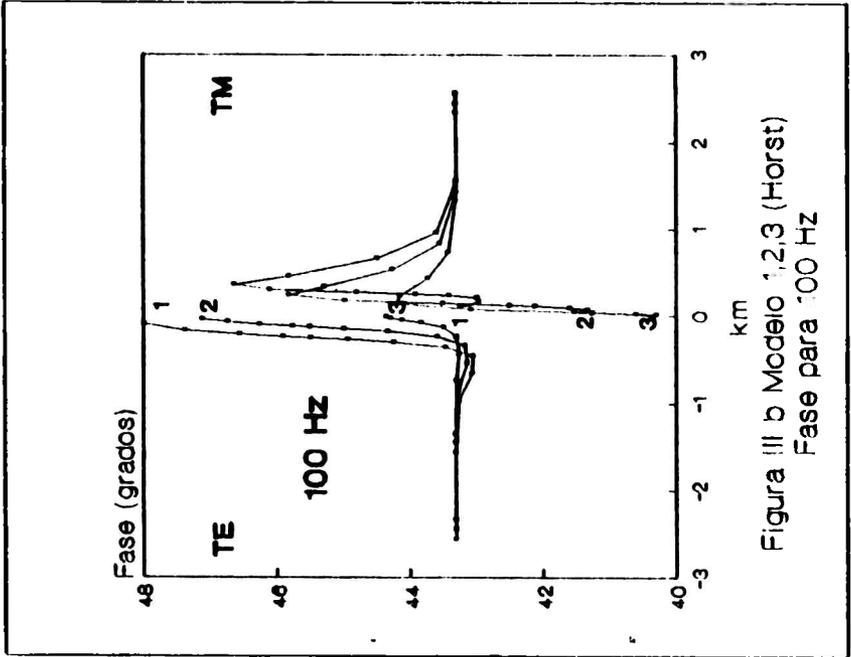


Figura III b Modelo 1,2,3 (Horst)
Fase para 100 Hz

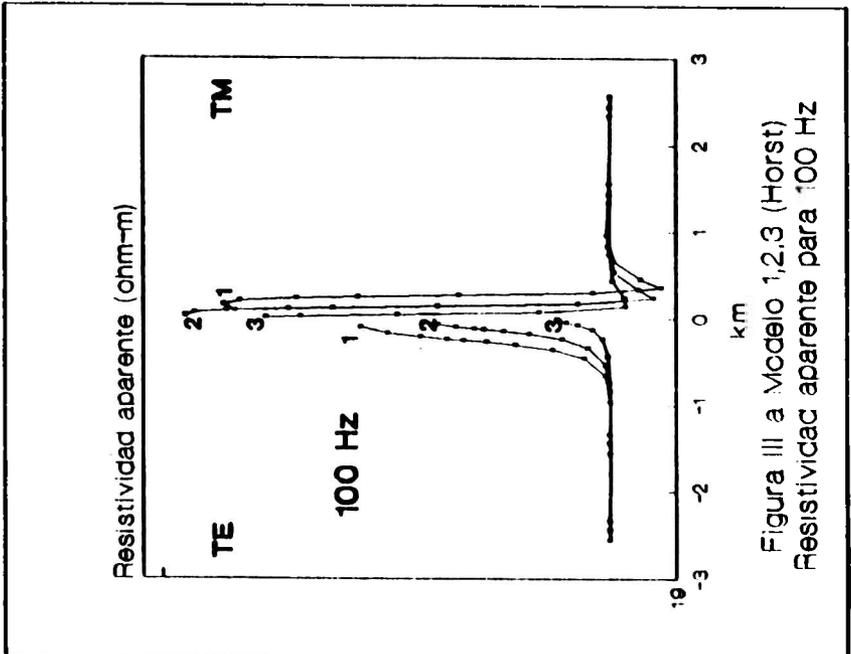


Figura III a Modelo 1,2,3 (Horst)
Resistividad aparente para 100 Hz

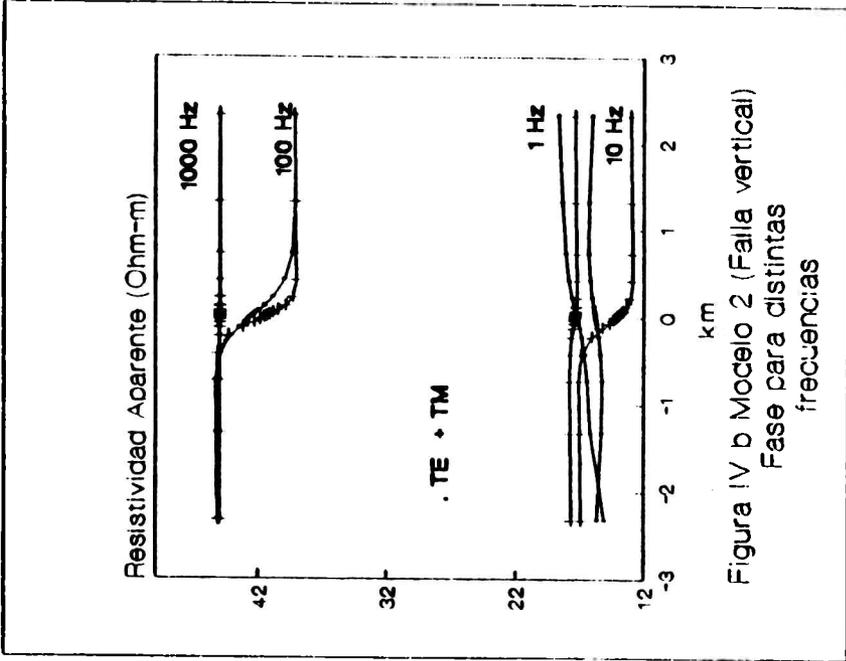


Figura IV b Modelo 2 (Falla vertical)
Fase para distintas
frecuencias

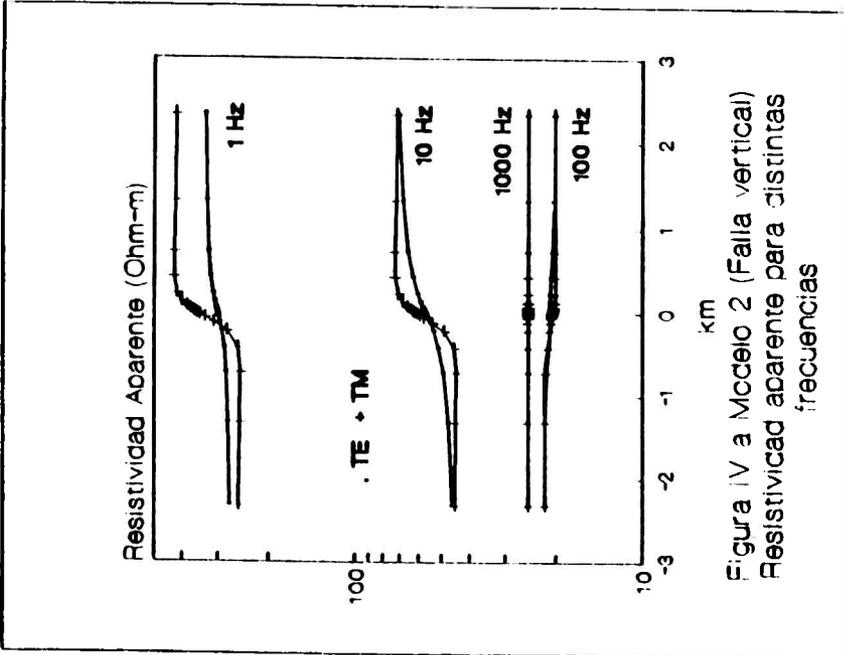


Figura IV a Modelo 2 (Falla vertical)
Resistividad aparente para distintas
frecuencias

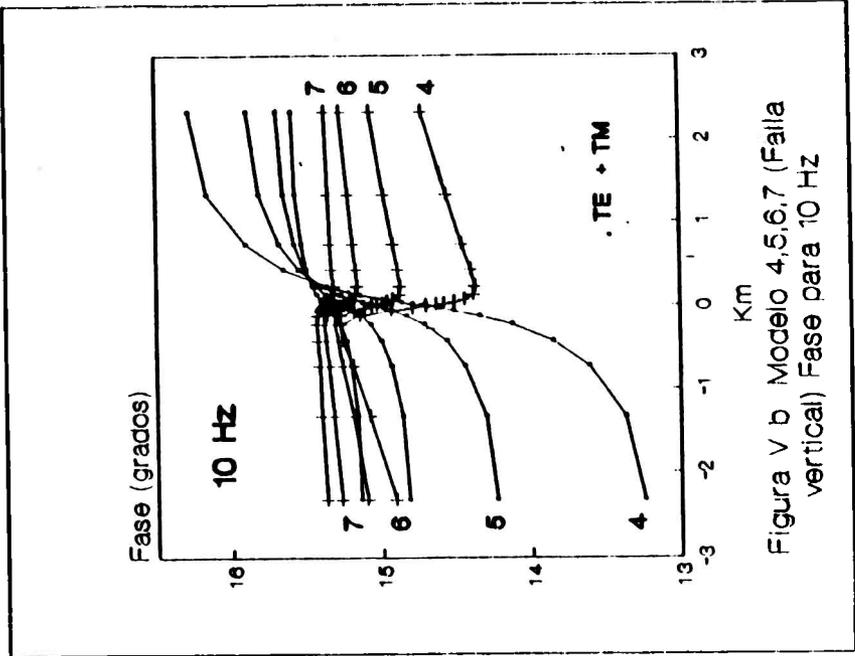


Figura V b Modelo 4,5,6,7 (Falla vertical) Fase para 10 Hz

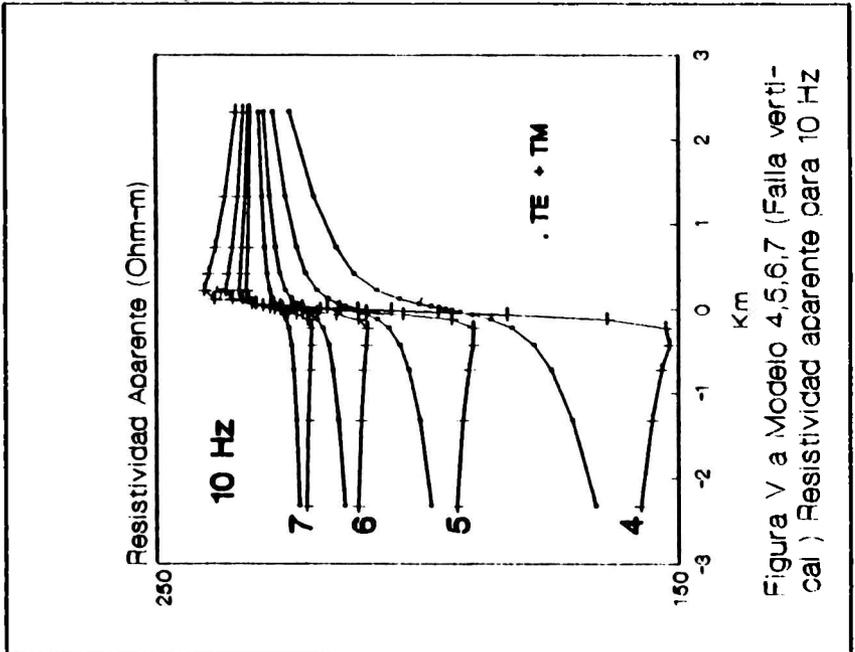


Figura V a Modelo 4,5,6,7 (Falla vertical) Resistividad aparente para 10 Hz

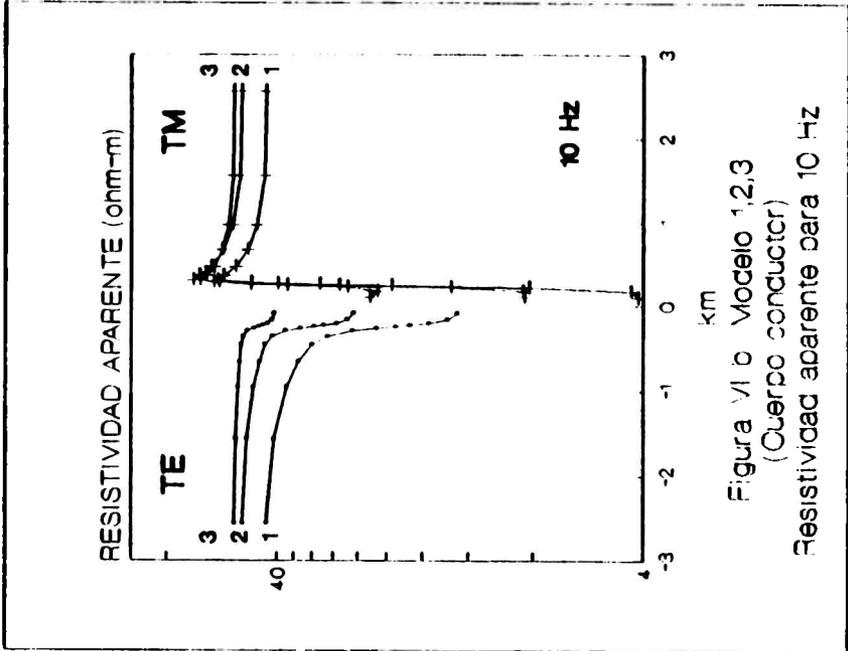


Figura VI b Modelo 1,2,3
(Cuerpo conductor)
Resistividad aparente para 10 Hz

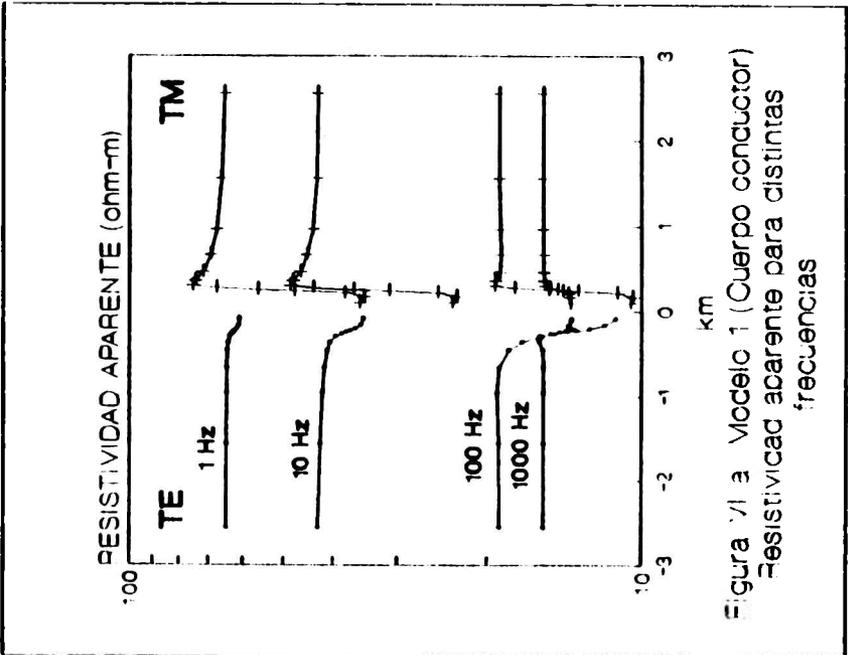


Figura VI a Modelo 1 (Cuerpo conductor)
Resistividad aparente para distintas
frecuencias

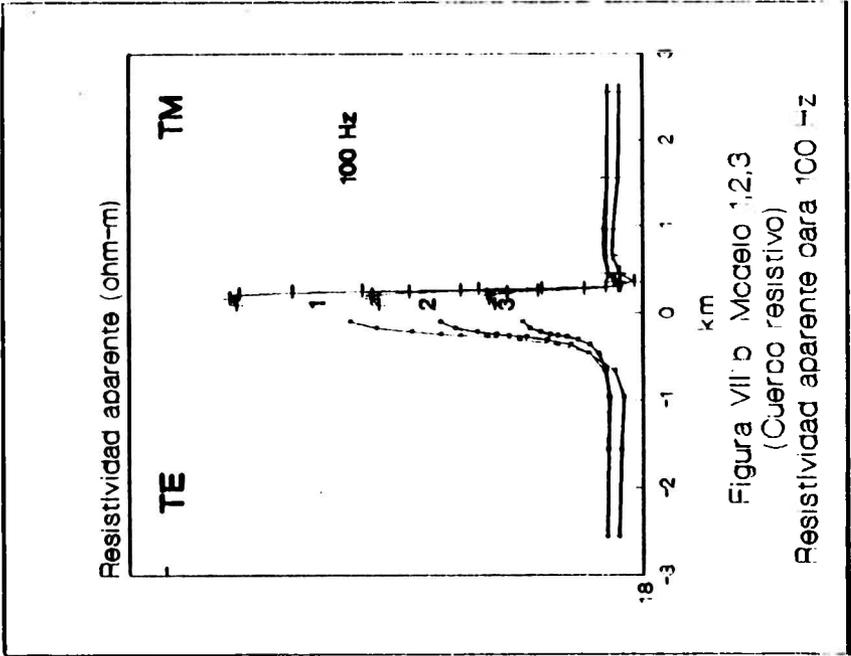


Figura VII b Modelo 1,2,3
(Cuerpo resistivo)
Resistividad aparente para 100 Hz

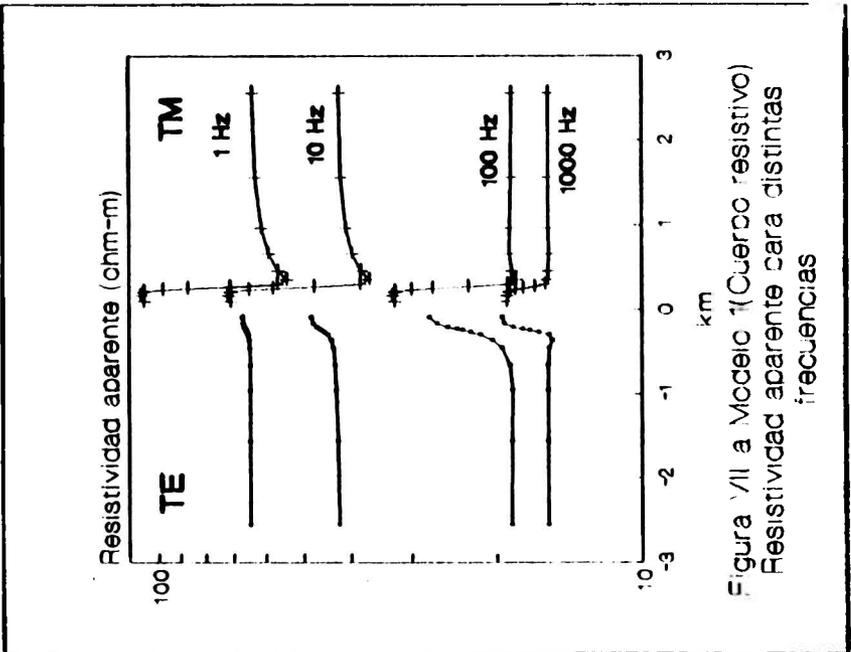


Figura VII a Modelo 1 (Cuerpo resistivo)
Resistividad aparente para distintas
frecuencias