

# METODO AMT. INFLUENCIA DE LA ORIENTACION DE LOS EJES DE MEDICION EN LA POSIBILIDAD DE DETECTAR LAS CARACTERISTICAS DE UNA ESTRUCTURA 2D

A.M.Osella y P.Martinelli

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria, Pabellón 1, 1428 Buenos Aires.*

A partir de los espectros de resistividad aparente  $\rho_{ap}(\omega)$ , medidos en la superficie terrestre, es posible obtener información sobre la distribución de conductividades en el interior. El método AMT utiliza frecuencias entre 10 y 1000 Hz., las cuales permiten estudiar los primeros 100 m. Los valores de  $\rho_{ap}(\omega)$  se miden en dos direcciones perpendiculares entre sí, generalmente E-O y N-S.

Una estructura con simetría 2D puede modelarse realizando una inversión 1D de los espectros obtenidos para distintas estaciones a lo largo de un perfil. Los valores de  $\rho_{ap}(\omega)$ , y por ende los modelos inversos a obtener, dependerán de la orientación de las direcciones de medición respecto del eje de simetría de la estructura.

En el presente trabajo se investiga la influencia que tendrá dicha orientación sobre el modelo inverso a obtener y en qué medida diferirá el mismo de la estructura propuesta, utilizando espectros teóricos obtenidos mediante un método de modelado directo bidimensional.

## INTRODUCCION

Para el rango de frecuencias utilizado tanto en AMT (10-10000 Hz) como en MT (0.1 - 10 Hz) el campo inductor  $H_0$  producido por fuentes naturales puede suponerse uniforme espacialmente y con una dependencia temporal armónica  $e^{-i\omega t}$ .

Las componentes horizontales de los campos en la superficie terrestre cumplen la siguiente relación tensorial:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z} \mathbf{H} \quad (1)$$

$\mathbf{Z}$  es el llamado tensor de impedancia, el cual depende de la frecuencia y de la distribución de conductividades bajo la superficie, pero no del campo inductor  $H_0$  (cuya polarización e intensidad en general no se conocen).

Para estructuras 2D (ver figura 1) existen dos modos desacoplados de propagación, TE y TM ( $\mathbf{E}$  o  $\mathbf{H}$ ) paralelos al eje de simetría y, respectivamente). En el sistema de ejes principales x-y, el tensor de impedancia toma entonces la forma:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{TM} \\ Z_{TE} & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

En el método MT se miden simultáneamente las componentes de los campos en dos direcciones ortogonales arbitrarias. Mediante una rotación adecuada del tensor de impedancia obtenido, se lo

lleva a la forma (2). Se hallan entonces los espectros de resistividad aparente asociados a cada uno de los modos, dados por:

$$\begin{aligned} \rho_{TE}(\omega) &= |Z_{TE}(\omega)|^2 / \omega \mu \\ \rho_{TM}(\omega) &= |Z_{TM}(\omega)|^2 / \omega \mu \end{aligned} \quad (3)$$

con

$$\begin{aligned} Z_{TE} &= E_y / H_x \\ Z_{TM} &= E_x / H_y \end{aligned} \quad (4)$$

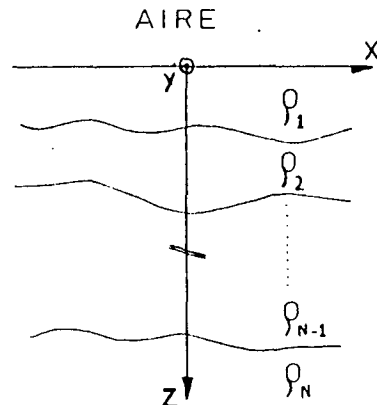


Figura 1:

La estructura se modela, usualmente, realizando una inversión 1D de los espectros correspondientes al modo TE, obtenidos en cada sitio de medición.

En AMT se miden primero  $E_1$  y  $H_2$ , y luego  $E_2$  (donde 1 y 2 son las direcciones de medición, generalmente E-O y N-S). Por lo tanto no puede

obtenerse, a partir de los datos, el tensor  $Z$ .

La interpretación se basa entonces en la inversión 1D de las resistividades aparentes  $\rho_1$  y  $\rho_2$ , definidas como:

$$\begin{aligned} \rho_1(\omega) &= |Z_1|^2 / \omega \mu \\ \rho_2(\omega) &= |Z_2|^2 / \omega \mu \end{aligned} \quad (5)$$

con

$$\begin{aligned} Z_1 &= E_1 / H_2 \\ Z_2 &= E_2 / H_1 \end{aligned} \quad (6)$$

Esto encierra dos dificultades importantes. Por un lado, a menos que las direcciones de medición coincidan con los ejes principales,  $\rho_1$  y  $\rho_2$  dependerán de la polarización del campo inductor. Por otro, tanto en  $\rho_1$  como en  $\rho_2$  aparecen acoplados los modos TE y TM (debe tenerse en cuenta que la componente TE es la más representativa de la verdadera distribución de conductividades).

En el presente trabajo se investiga la influencia de ambos factores en los modelos a obtener para distintos tipos de estructuras 2D, en base a espectros teóricos obtenidos mediante un método de modelado directo 2D.

#### OBTENCION DE LOS ESPECTROS DE RESISTIVIDAD APARENTE

El campo inductor, para frecuencias de audio, tiene su origen en las descargas asociadas con tormentas eléctricas. Puede escribirse en el sistema de ejes principales x-y (ver figura 2), como:

$$H_0 = H_0^i e^{-i\omega t} (\cos \phi x + \sin \phi y) \quad (7)$$

$H_{0x}$  genera el modo TE y  $H_{0y}$  el modo TM. Las componentes de los campos en  $z = 0$  son, entonces:

$$\begin{aligned} E_x &= a_x H_{0y} & E_y &= a_y H_{0x} \\ H_x &= b_x H_{0x} & H_y &= b_y H_{0y} \end{aligned} \quad (8)$$

Los coeficientes complejos  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $b_x$  y  $b_y$  dependen sólo de la frecuencia y de las características de la estructura y se calculan mediante un método de modelado directo 2D (Osella y Martinelli, 1991). Nótese además que de acuerdo a la ecuación (4), se tiene que  $Z_{TE} = a_y / b_x$  y  $Z_{TM} = a_x / b_y$ . Reemplazando (7) en (8) y escribiendo  $E_1$ ,

$E_2$ ,  $H_1$  y  $H_2$  en función de  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$  y  $H_y$  se obtienen  $Z_1$  y  $Z_2$ :

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{a_x + a_y \operatorname{tg} \theta \operatorname{cotg} \phi}{b_y - b_x \operatorname{tg} \theta \operatorname{cotg} \phi} \\ Z_2 &= \frac{a_y - a_x \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \phi}{b_x + b_y \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \phi} \end{aligned} \quad (9)$$

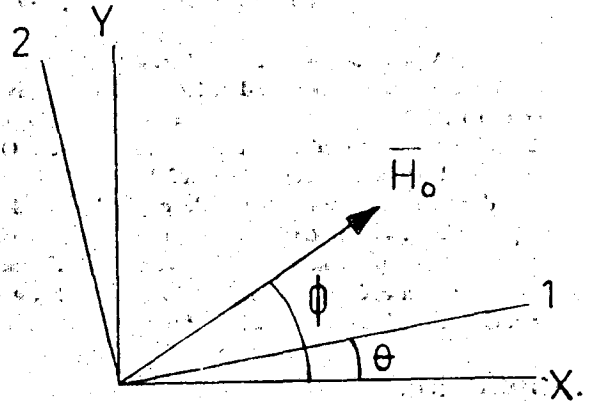


Figura 2:

El ángulo entre las direcciones 1-2 y los ejes principales x - y,  $\theta$ , se supone conocido,  $\phi$  es la dirección de polarización del campo inductor.

En cada sitio de medición, las resistividades  $\rho_1$  y  $\rho_2$  correspondientes a cada frecuencia se evalúan realizando un promedio de los valores de  $Z_1$  y  $Z_2$  medidos a distintos tiempos (el número de mediciones es, en general mucho mayor que uno). Si  $\phi$  no depende del tiempo (polarización lineal,  $\phi = \phi_0$ ), los valores esperados para  $\rho_1$  y  $\rho_2$  son:

$$\rho_1(\omega, \theta, \phi_0) = |Z_1(\omega, \theta, \phi_0)|^2 / \omega \mu \quad (10)$$

$$\rho_2(\omega, \theta, \phi_0) = |Z_2(\omega, \theta, \phi_0)|^2 / \omega \mu$$

En los modelos inversos a obtener influyen tanto  $\theta$  como  $\phi_0$ , que determinan en qué forma se acoplan los modos TE y TM.

Cuando  $\phi$  depende del tiempo aparece una dispersión adicional en los valores medidos de  $Z_1$  y  $Z_2$  asociada con dichas variaciones. Si la distribución de probabilidades para  $\phi$  es uniforme entre 0 y 180 (polarización natural) los valores esperados son:

$$\rho_1(\omega, \theta) = \frac{1}{\pi} \left| \int_0^\pi Z_1(\omega, \theta, \phi) d\phi \right|^2 / \omega \mu \quad (11)$$

$$\rho_2(\omega, \theta) = \frac{1}{\pi} \left| \int_0^\pi Z_2(\omega, \theta, \phi) d\phi \right|^2 / \omega \mu$$

y dependen de  $\theta$  pero no de  $\phi$ .

### APLICACION

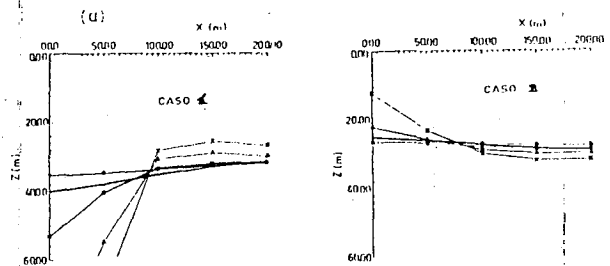
Las estructuras 2D propuestas están formadas por dos capas, con resistividades  $\rho_1=100$  m y  $\rho_2=300$  m., cuya interfase de separación es de la forma  $P(x)=F+D/(1+(x/G)^2)$  (simétrica respecto de  $x=0$ ). F, D y G valen 30, 10 y 100 m. para el caso A y 30, -5 y 100m para el caso B, respectivamente.

Para cada caso, se calculan los espectros teóricos de resistividad aparente, y luego se modela la estructura mediante un proceso de inversión 1D (Jupp y Vozoff, 1975) punto a punto de los mismos. Finalmente se analiza como dependen los modelos obtenidos de la orientación de los ejes de medición y de la polarización del campo inductor.

1. Caso en que el plano de polarización del campo externo depende del tiempo, con probabilidad uniforme entre 0 y 180°.

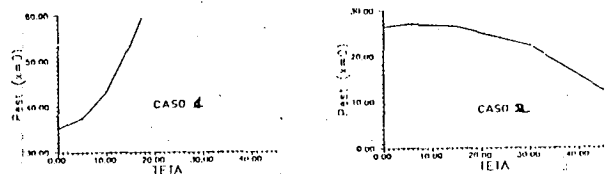
En la figura 3a se muestra como dependen de  $\theta$  los modelos inversos obtenidos a partir de  $\rho_2$ , y se los compara con la real distribución de conductividades (sólo se utiliza  $\omega_2$  ya que  $\rho_1(\theta) = \rho_2(90-\theta)$ ). Los modelos dependen fuertemente de  $\theta$  en la zona central de la estructura. Los mejores resultados se obtienen cuando el ángulo entre la dirección en que se mide E y el eje de simetría y, es pequeño (modo TE), al aumentar dicho ángulo, y debido al acoplamiento del modo TE con el TM, los errores en la estimación de P se incrementan. El caso menos favorable se tiene para un ángulo de 45°.

En 3b se muestra la dependencia con  $\theta$  de los valores estimados de P en  $x=0$  ( $P_{est}(x=0)$ ).



- $\theta = 0^\circ$  (modo TE)
- $\theta = 15^\circ$
- ▲  $\theta = 30^\circ$
- ×  $\theta = 45^\circ$

Figura 3 a: Modelos inversos obtenidos a partir de  $\rho_2$  para distintos valores de  $\theta$  junto con la distribución de conductividades propuesta.



- $\theta = 0^\circ$  (modo TE)
- $\theta = 15^\circ$
- ▲  $\theta = 30^\circ$
- ×  $\theta = 45^\circ$

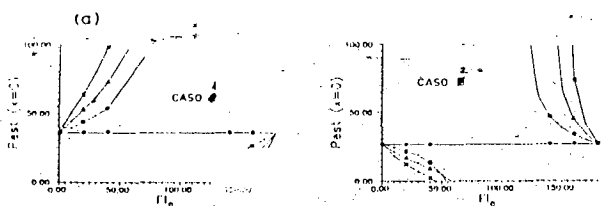
Figura 3b: Dependencia con  $\theta$  del valor estimado de P en  $x = 0$ .

2. Caso en que el plano de polarización del campo externo no varía con el tiempo, es decir  $\phi = \phi_0$ .

Los modelos inversos dependen tanto de  $\theta$  como de  $\theta_0$ . En la figura 4a. se muestra la dependencia con  $\phi_0$  de  $P_{est}(x=0)$  para distintos valores de  $\theta$  (los valores de P se estiman en base a  $\rho_2$ , los resultados que se obtendrían para  $\rho_1$  pueden deducirse teniendo en cuenta que  $\rho_1(\theta, \phi_0) = \rho_2(90-\theta,$

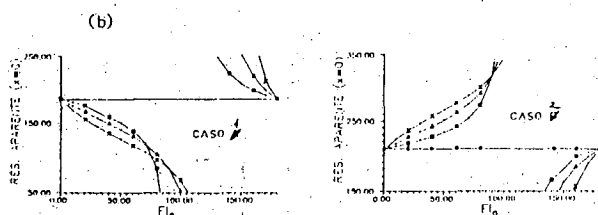
180- $\phi_0$ ).

Observando la figura 4b se comprende porque los mejores modelos inversos se obtienen cuando  $\phi_0$  es cercano a 0° ó 180° y empeoran cuando  $\phi_0$  es cercano a 90°.



- $\theta = 0^\circ$  (modo TE)
- $\theta = 15^\circ$
- ▲  $\theta = 30^\circ$
- ×  $\theta = 45^\circ$

Figura 4a: Dependencia con  $\phi_0$  de valor estimado (en base a  $\rho_2$ ) de  $P'$  en  $x = 0$  para distintos valores de  $\theta$ .



- $\theta = 0^\circ$  (modo TE)
- $\theta = 15^\circ$
- ▲  $\theta = 30^\circ$
- ×  $\theta = 45^\circ$

Figura 4b: Dependencia con  $\phi_0$  de la resistividad aparente  $\rho_2$  para distintos valores de  $\theta$ , con  $x = 0$  y  $\omega = 1000$  Hz.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en sondeos AMT con fuentes naturales sobre estructuras 2D y 3D dependerán de la polarización del campo inductor y de la orientación de los ejes de medición.

La dirección que tiene el plano de polarización del campo externo en el instante en que se realiza cada medición no se conoce, pero generalmente vale la hipótesis de que la misma tiene probabilidad uniforme en el intervalo 0° - 180°, en ese caso los valores esperados para  $\rho_1$  y  $\rho_2$  están dados por la ecuación (11).

Para estructuras con características predominantemente 2D y cuando se conozcan otros datos geológicos de la zona, es importante orientar los ejes de medición con los ejes principales de la estructura.

Los resultados obtenidos dan una idea de la dependencia con  $\theta$  de los errores cometidos en la interpretación. El caso 1 es el menos favorable, ya que para  $\theta$  mayor que 15° los errores serán mayores que el 25%, en cambio para el caso 2 el error es menor al 12% si  $\theta$  es menor que 30°.

Por último debe tenerse en cuenta que en el caso de existir una pequeña componente linealmente polarizada, los valores promedio obtenidos para  $\rho_1$  y  $\rho_2$  tendrán un cierto grado de acoplamiento con términos como los que se muestran en la figura 4.

## BIBLIOGRAFIA

- Jupp, D.L.B. y K. Vozoff, Geophys. J.R. Astr. Soc., vol. 42, pgs. 957-976, 1975.
- Osella, A.M. y P. Martinelli, Rev. Bras. Geofís. vol.9(1), pgs. 1-10, 1991.

