RESPUESTA MAGNETOTELURICA DE MEDIOS ANISOTROPOS

A. M. Osella* y P. Martinelli**

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

Se propone un método para calcular la respuesta electromagnética de estructuras multicapas bidimensionales formadas por medios anisótropos. Los campos eléctricos y magnéticos se desarrollan en series de Fourier, cuyos coeficientes se calculan resolviendo las ecuaciones de Maxwell en cada medio anisótropo y aplicando las correspondientes condiciones de contorno en cada interfase, las cuales están representadas por funciones analíticas arbitrarias. Se aplica dicho desarrollo para calcular la respuesta de algunas estructuras particulares y se evalúa el efecto introducido debido a la anisitropía del medio.

INTRODUCCION

El método magnetotelúrico permite, a partir del análisis de la respuesta EM de la tierra a fuentes naturales, obtener información sobre la distribución de conductividades en el interior.

Existen distintos métodos directos que permiten calcular la respuesta de estructuras bidimensionales (2D), formadas por medios isótropos.

Para contornos angulosos o intrusiones de forma geométrica bien definida, se aplican generalmente elementos finitos (Wannamaker, 1987), diferencias finitas (Ngoc, 1980) o ecuaciones integrales (Ting y Hohmann, 1981).

En trabajos previos se ha desarrollado un método aplicable a estructuras multicapas con contornos irregulares de variación suave, y se lo aplicó al estudio de estructuras 2D representando una cuenca sedimentaria (Osella y Martinelli, 1989, 1990).

Debido a la forma en la cual se van depositando los estratos de una estructura de ese tipo, las resistividades de las capas de sedimentos presentan generalmente anisotropía en la dirección vertical.

En el presente trabajo se generaliza el método de modo que permita tener en cuenta la presencia de un número arbitrario de capas anisótropas y se evalúa el efecto de dicha anisotropía en la respuesta magnetotelúrica (MT) de una cuenca sedimentaria.

DESCRIPCION DEL MODELO

En la Fig. 1 se muestra el modelo propuesto y se

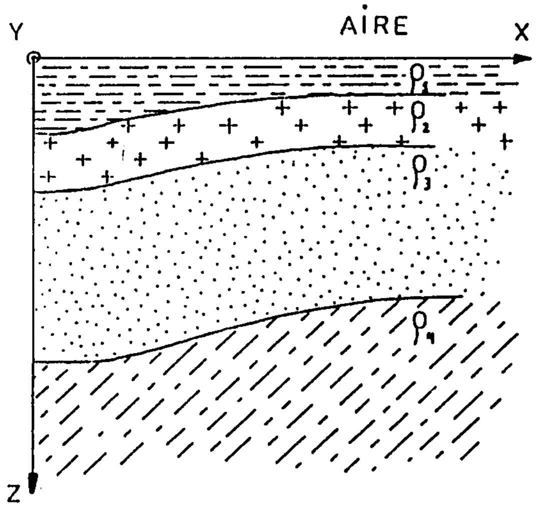

Figura 1: Modelo propuesto

indica el sistema de referencia utilizado (y es el eje de simetría). Cada interfase está dada por una función $f_i(x)$ que vamos a suponer simétrica respecto de x = 0 y periódica (para poder reproducir los campos en la zona de interés deberá elegirse la periodicidad λ mucho mayor que las longitudes características del modelo), la conductividad de cada medio estará dada por un tensor:

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v \end{bmatrix}$$

donde σ_h y σ_v son las conductividades en la dirección horizontal y vertical respectivamente

Según la hipótesis usual, el campo externo, para el rango de períodos de interés, puede suponerse uni-

* Investigador CONICET

** Becaria CONICET

forme espacialmente y con una dependencia temporal de la forma $e^{-i\omega t}$. Para obtener la respuesta EM se deben resolver las ecuaciones de Maxwell con la hipótesis de cuasiestacionariedad. En el caso 2D la solución se puede expresar como combinación lineal de dos modos desacoplados TE (**E**//y) y TM (**H**//y).

MODO TM

El modo TM corresponde a un campo inductor de la forma $\mathbf{H}_{ext}=H_o\, e^{-i\omega t}$ **y**. En este caso, las únicas componentes de los campos que resultan distintas de cero son H_y, E_x y E_z, debiendo ser además H_y y E_x simétricos en x, y E_z antisimétrico. Además los campos no pueden depender de la coordenada y.

Como en el aire debe valer $\nabla \times \mathbf{H} = 0$, se deduce que la única componente no nula de campo magnético H_y debe ser constante.

Para el medio i se tiene que H_y debe cumplir:

$$1/\sigma_h\, \gamma_z^2\, H_y^i + 1/\sigma_v\, \gamma_x^2\, H_y^i + i\omega\mu = 0$$

mientras que: $E_x^i = -1/\sigma_h\, \gamma_z\, H_y^i$

$$E_Z^i = 1/\sigma_h\, \gamma_z\, H_y^i$$

Estas ecuaciones admiten soluciones de la forma;

$$H_y^i = \sum_{n>0}(A_n^i \exp(R_n^i z)+B_n^i \exp(-R_n^i z)) \cos(K_n x)$$

$$E_x^i = -1/\sigma_h \sum_{n>0}(A_n^i \exp(R_n^i z)-B_n^i \exp(-R_n^i z))\, R_n^i \cos (K_n x)$$

$$E^i = -1/\sigma_v \sum (A^i \exp(R^i z)+B^i \exp(-R^i z))\, K_n \operatorname{sen} (K_n x)$$

donde

$$K_n = 2n/\lambda,\ R_n^i=(\sigma_h/\sigma_v\, K_n^2 - \gamma_i^2)^{1/2} \text{ con } \gamma_i^2 = i\omega\mu\sigma_h$$

En la última capa (N) se deben tomar los coeficientes A_n^i iguales a cero para todo valor de n, para evitar que los campos diverjan cuando z tiende a ∞.

Se observa que los campos, para el modo TM, resultan sensibles a la anisotropía del medio. Ello se debe a que las corrientes inducidas presentan componentes no nulas en la dirección horizontal y en la vertical. El efecto depende del valor del cociente σ_h/σ_v.

MODO TE

Corresponde a un campo inductor de la forma

$$\mathbf{H}_{ext} = H_0\, e^{-i\omega t}\, \mathbf{x}$$

La respuesta Em que se obtiene es similar a la que se obtendría para una estructura isótropa con conductividades $\sigma_{h,i}$ (en este caso las corrientes inducidas en los medios sólo tienen componente en la dirección horizontal y)

CALCULO DE LOS CAMPOS PARA EL MODO TM

De suponer $\varepsilon = \varepsilon_0$ y $\mu = \mu_0$ para toda las capas, que es la hipótesis usual, y debido a que no hay cargas ni corrientes superficiales en las interfases, se deduce que los vectores **E** y **H** son continuos. A partir de estas condiciones de contorno pueden calcularse los coeficientes A_n^i y B_n^i.

Las condiciones de contorno se independizan de x, luego, teniendo en cuenta que existirá un valor M tal que los términos de las series n >M puedan despreciarse, las mismas se reducen a un sistema de 2N ecuaciones matriciales de dimensión (M+1) x (M+1) cuyos coeficientes dependen solo de las características de la estructura (resistividades de las capas y forma de las interfases) y no del campo externo. El método seguido para resolver un sistema de este tipo está desarrollado en un trabajo previo (Osella y Martinelli, 1989) donde se lo aplicó para resolver el modo TE de una estructura formada por medios isótropos. Conociendo el valor de los coeficientes A_n^1 y B_n^1 se pueden calcular los campos en la superficie terrestre.

Finalmente, la impedancia superficial se obtiene como: $Z(\omega) = E_x(x, z=0, \omega)/H_y(x, z=0, \omega)$, su fase es $\phi_p = \operatorname{arctg}[\operatorname{Im}(Z)/\operatorname{Real}(Z)]$, siendo la resistividad aparente $\rho_{ap}(x, \omega) = |Z|^2/\omega\mu_0$.

Tanto ρ_{ap} como ϕ_p no dependen de la intensidad del campo inductor pues todas las componentes de los campos son proporcionales a H_0.

APLICACION

Se aplica ahora el método para estudiar el efecto de la anisotropía en la respuesta MT (modo TM) de una cuenca sedimentaria.

Para describir las interfases se eligieron funciones $f_i(x) = P_i + D_i / [1+(x/G_i)^2]$ con i = 1, 2 y 3.

Los valores de $\rho_{h,i}$, P_i, D_i y G_i son los siguientes:

$\rho_{h,1} = 50$ m $\quad \rho_{h,2} = 300$ m $\quad \rho_{h,3} = 100$ m $\quad \rho_{h,4} = 1500$ m

$P_1 = 400$ m $\quad P_2 = 1300$ m $\quad P_3 = 6000$ m

$D_1 = 150$ m $\quad D_2 = 225$ m $\quad D_3 = 300$ m

$G_1 = 1500$ m $\quad G_2 = 2000$ m $\quad G_3 = 3000$ m

Los P_i representan la profundidad de cada capa, D y G_i el espesor y ancho de cada desnivel.

Las tres primeras capas corresponden a los depósitos sedimentarios y la cuarta al basamento cristalino..

Se supone además que las $\rho_{v,i}$ están dadas, en función de las $\rho_{h,i}$, como $\rho_{v,i} = a\,\rho_{h,i}$, donde el coeficiente de proporcionalidad a tiene el mismo valor para todos los medios (usualmente es $a \geq 1$).

La sensibilidad e la anisotropía se estudia variando el valor de a: Caso A: a=1, Caso B: a=1.5, Caso C: a=2.

Se calcularon ρ_{ap} y ϕ_ρ como funciones de x para los perídodos T=0.1,1 y 10 s.

Los resultados obtenidos indican que la sensibilidad de ρ_{ap} a la anisotropía en la zona central de la cuenca es importante, en cambio para x > 3 km las diferencias porcentuales con el caso isótropo de los casos B y C son despreciables.

En la Fig. 2 se muestra el comportamiento de ρ_{ap} en la zona central, la mayor sensibilidad se tiene para $x \approx 0$ y aumenta al aumentar T. Para el caso C, las diferencias porcentuales con el caso isótropo en x=0 van desde un 34 hasta un 50%, mientras que para el caso B están entre el 17 y el 27%.

Se observa, además, que la fase de la impedancia ϕ_ρ no es sensible a la anisotropía.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un método que permite calcular la respuesta MT de estructuras multicapas con contornos irregulares de variación suave, formadas por medios anisótropos. En este tipo de estructuras es usual obtener los parámetros del modelo invirtiendo los espectros medidos correspondientes al modo TE. En este trabajo se muestra que el modo TE sólo brinda información sobre la componente horizontal de resistividad de las distintas capas. En los espectros correspondientes al modo TM está contenida la información sobre el grado de anisotropía en

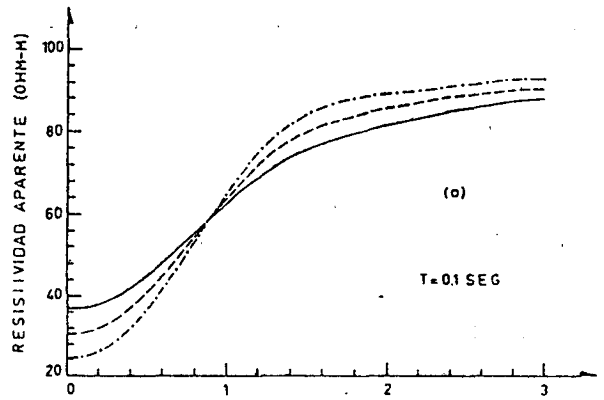

Figura 2 (a)

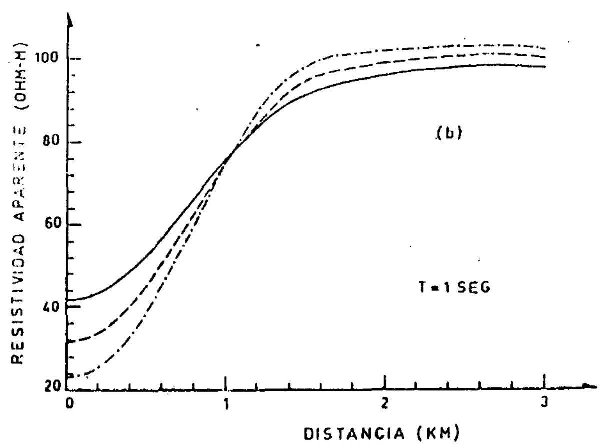

Figura 2 (b)

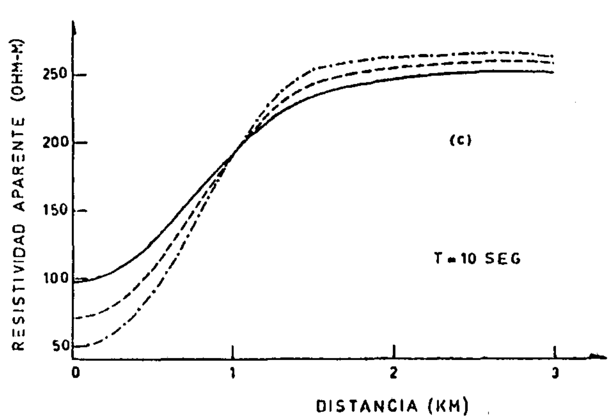

Figura 2(c)

Figura 2: Dependencia de ρ_{ap} con la anisotropía para los casos: A (línea llena), B (línea de raya), C (Línea de punto y raya).

la dirección vertical, el método desarrollado constituye una herramienta útil para realizar una interpretación cuantitativa de la misma.

REFERENCIAS

Wannamaker, P., Stodt, J. y Rijo, L., Geophys. J. R. Astr. Soc., 88, 2740, 1987.

Ngo, P. V., Geomagnetic Service of Canada, Of. Rep. 80-8-E, 1980.

Ting, S. y Hohman, G., Geophys, 46, 182, 1981.

Osella, A. M. y Martinelli, P., Rev. Bras. Geofís, 1989.

Osella, A. M. y Martinelli, P., 1990. Inversión de espectros MT en casos bidimensionales. Geoacta, en prensa.