

IMÁGENES ELECTROMAGNÉTICAS DEL INTERIOR DE LA TIERRA: PARTE VII

Enrique Gómez Treviño

CICESE, Ensenada, Baja California, 22860, México

Parte I:	GEOS, 1996, Vol. 16, No. 3, 152-154
Parte II:	GEOS, 1977, Vol. 17, No. 2, 104-106
Parte III:	GEOS, 1977, Vol. 17, No. 3, 172-176
Parte IV:	GEOS, 1998, Vol. 18, No. 1, 24-30
Parte V:	GEOS, 1999, Vol. 19, No. 1, 29-32
Parte VI:	GEOS, 1999, Vol. 19, No. 3, 187-189

PARTE VII.

En este número veremos una técnica más con la que se puede obtener directamente la resistividad de una tierra homogénea. En realidad existen muchas más técnicas que las tres que ya hemos explicado y la que trataremos aquí. Sin embargo, estas cuatro son de las pocas que permiten despejar la resistividad del medio y expresarla directamente en términos de las mediciones. Esta característica permite analizar la fórmula correspondiente y facilita la comprensión del papel que juegan los diferentes parámetros involucrados, pues además de las mediciones electromagnéticas también tienen un papel importante parámetros como la distancia y la frecuencia de oscilación de los campos. La comprensión que se logra de esta manera puede extenderse en términos generales a situaciones de medios heterogéneos, algo que sería muy difícil de lograr si tratamos de comprender desde un principio los casos más complicados. Por lo general, cuando el medio es heterogéneo, las diferentes variables se combinan de una manera tan complicada que no permite entender fácilmente el papel que están jugando en la determinación de la distribución de la resistividad. Estas complicaciones se presentan también en casos de medios homogéneos, cuando se utilizan algunas técnicas que no permiten despejar directamente la resistividad. En esos casos se utilizan curvas patrón o programas de computadora para determinar el valor de la resistividad. Obviamente con ello se pierde toda oportunidad de comprender los aspectos básicos de cualquier técnica.

Se mencionó en un de los números anteriores que las variaciones armónicas seno y coseno, consideradas como funciones del tiempo, son las únicas que conservan su forma al propagarse o difundirse en diferentes medios conductores. Si la fuente de los campos electromagnéticos oscila a una frecuencia determinada, así lo harán los campos en los diferentes medios que se encuentren en el radio de acción de la fuente. Los campos oscilarán en el tiempo a la misma frecuencia y en la forma de funciones seno o coseno. Lo que puede variar de un lugar a otro son la amplitud y la fase de estas funciones. No importa a qué distancia estemos de una estación de radio, o el valor de la resistividad de la tierra en el lugar: la frecuencia a la que sintonizamos la estación no cambia. Lo que puede variar, y de hecho así sucede, es la amplitud de los campos y la fase de los mismos.

En este número trataremos un caso que tiene similitud con la transmisión y recepción de las ondas de radio, aunque la frecuencia que utilizaremos es mucho menor. Las ondas de radio de AM, por ejemplo, tienen una frecuencia de varios cientos de miles de ciclos por segundo. Las que supondremos aquí sólo alcanzan varios cientos de ciclos por segundo. Esto es, las ondas de radio tienen una frecuencia mil veces mayor. La razón de esta diferencia tiene que ver, por supuesto, con las exigencias particulares impuestas por los dos diferentes tipos de aplicaciones.

7.4 MÉTODOS DE FUENTE CONTROLADA

Se conocen como métodos de fuente controlada a los métodos electromagnéticos que utilizan fuentes artificiales como cables puestos a tierra o bobinas que se cierran sobre sí mismas, por los que se hace circular corriente alterna que varía en el tiempo como una función coseno o en la forma de escalón. De esta última característica, la de controlar la corriente en la fuente a una forma particular de variación, toman su nombre los métodos de fuente controlada. De esta manera se les diferencia de los métodos que, como el magnetotélúrico, utilizan fuentes naturales sobre las que no se tiene ningún control, ni sobre su geometría ni sobre la variación temporal de la corriente.

En los métodos de fuente controlada se fija tanto la geometría de la fuente como la variación temporal de la corriente. Sobre este último aspecto las formas de variación más utilizadas son las de funciones coseno y escalón. Estas funciones facilitan las cosas tanto en aspectos teóricos como prácticos. Como se dijo anteriormente, las variaciones tipo coseno son las únicas que producen campos en el espacio y en la tierra que conservan la forma de variación de la fuente. En todas partes los campos oscilan a la frecuencia de la fuente, por lo que para caracterizarlos sólo hay que medir su amplitud y su fase. Por otro lado, la fuente misma es relativamente fácil de construir, pues con componentes básicos se pueden construir circuitos cuya forma natural de comportarse es precisamente oscilando en el tiempo como una función coseno. También desde el punto de vista de la teoría son muy convenientes las funciones coseno, pues las ecuaciones de Maxwell son más fáciles de resolver cuando se supone que la fuente varía de esa forma. Recordemos que la solución de estas ecuaciones permite simular el campo electromagnético que medimos en la superficie de la tierra, lo cual es absolutamente necesario si queremos conocer la distribución de resistividad en el subsuelo.

El caso del escalón resulta también relativamente fácil de resolver matemáticamente. El campo electromagnético transitorio generalmente se obtiene mediante la transformada de Fourier de la

solución para la variación de coseno, por lo que la mitad del problema ya está resuelto de antemano. Y desde el punto de vista práctico: la función escalón es la más fácil de producir en una fuente. Basta con interrumpir la corriente —cortando el cable, por ejemplo— para que el campo magnético de la fuente desaparezca y se inicie la inducción en la tierra.

Existe una gran variedad de métodos que utilizan fuentes controladas, lo cual puede fácilmente deducirse de las posibles combinaciones de geometrías y variaciones temporales. Por lo general, todos tienen una profundidad máxima de penetración menor a la del método magnetotélúrico que utiliza fuente natural. Esto se debe principalmente a que la fuente natural en la ionosfera tiene dimensiones mucho mayores que las de las fuentes artificiales que se utilizan en los métodos de fuente controlada. A continuación se describe un método particular que típicamente utiliza como fuente una bobina de alrededor de un metro de diámetro, y como receptor otra bobina más o menos de las mismas dimensiones. La corriente eléctrica en la fuente varía temporalmente siguiendo una función coseno.

7.4.1 VIVIENDO CERCA DE UNA ESTACIÓN DE RADIO

Las fuentes que se utilizan en geofísica para crear campos electromagnéticos son como las antenas de radio y televisión. Por ellas se hace circular corriente alterna, la cual produce campos eléctricos y magnéticos en el espacio circundante. Sin embargo, existen diferencias importantes que vale la pena señalar. En el caso de la radio y televisión los campos se utilizan como medios para transmitir información de un punto a otro. El efecto de la resistividad de la tierra se minimiza para que interfiera lo menos posible con el objetivo de transmitir información. Por el contrario, en el caso de las aplicaciones geofísicas de lo que se trata es de maximizar el efecto de la tierra. También tenemos que en el caso de la radio y televisión, se intenta obtener el máximo alcance posible en términos de distancia horizontal, mientras que en las aplicaciones geofísicas se intenta maximizar la profundidad de penetración.

Las consideraciones anteriores llevan, por un lado, a que la longitud de onda de las ondas para comunicación sea del orden de cientos de metros y, por el otro, a que dicha longitud en aplicaciones geofísicas sea por lo menos mil veces mayor, para que las ondas penetren lo suficiente en la tierra.

Por otro lado, cuando escuchamos radio o vemos televisión lo hacemos generalmente a distancias equivalentes a muchas longitudes de onda. Lo más común es que estemos a varios kilómetros de la estación recibiendo información que viene en longitudes de onda de apenas cientos de metros. En el caso de las mediciones geofísicas la situación es exactamente al revés. El receptor por lo general está solamente a algunos cientos de metros mientras que la longitud de onda es de cientos de kilómetros. Es como escuchar radio cuando se vive a pocos metros de la estación: prácticamente no existe retraso de la señal debido a la corta separación entre transmisor y receptor. En la jerga de los métodos electromagnéticos a esta situación se le conoce como aproximación cuasi-estática. El retraso de la señal en el receptor es prácticamente nulo con respecto a la señal original en el transmisor. Es como si los campos fueran estáticos, pero no completamente, de donde proviene el término de cuasi-estáticos.

7.4.2 LA TIERRA MODIFICA LA LONGITUD DE ONDA

Si la fuente se alimenta con corriente directa, los campos que produce son estáticos, no se puede transmitir información y tampoco se puede obtener información sobre la resistividad de la tierra, a no ser que la corriente se haga circular por la tierra como en los métodos ya descritos de corriente directa. En el presente caso estamos suponiendo que no hay contacto galvánico entre la tierra y la fuente. Cuando los campos varían en el tiempo necesariamente se induce corriente en la tierra. Recordando la Ley de Faraday, la misma que todos aprendimos desde la escuela secundaria, la corriente que se induce en tierra es mayor en la medida que la frecuencia de oscilación es mayor. Esto es, la corriente inducida será mayor en la medida en que la longitud de onda sea menor. Esto significa que para que las corrientes inducidas tengan en el receptor efectos apreciables, deberemos de utilizar longitudes de onda lo más pequeñas posibles. Sin embargo, la libertad para escoger la longitud de onda apropiada se ve severamente limitada por la necesidad que tenemos de que la corriente inducida penetre lo suficiente en la tierra. De este compromiso se deriva el hecho de que utilicemos campos cuasi-estáticos. Esto es, que a pesar de que se induzca relativamente poca corriente en la tierra utilizando longitudes de onda extremadamente grandes, aseguramos que lo poco que se induce penetre a grandes profundidades.

Es bastante común que a pesar de las gigantescas longitudes de onda que se utilizan, y de las cortas distancias entre transmisor y receptor, se midan retrasos de hasta un cuarto de longitud de onda. ¿Cómo es esto posible? La explicación de esta aparente contradicción es que la longitud de onda se acorta considerablemente en la tierra. La longitud de onda en la tierra puede llegar a ser menor a una milésima de su valor en el aire, dependiendo de la resistividad de la tierra. La frecuencia no cambia, como explicamos antes, lo que cambia es la velocidad y por ende la longitud de onda. Tenemos entonces, que midiendo el retraso, tendremos una manera de conocer la resistividad.

La resistividad también afecta a la forma en que disminuye la amplitud de la onda con la distancia. La amplitud disminuye de por sí con sólo alejarnos de la fuente, simplemente por efectos geométricos, en forma parecida a como disminuye la intensidad de la luz al alejarnos de un foco. Cuando existe polvo en el aire, la intensidad de la luz disminuye aún más al alejarnos del foco, de tal forma que el grado de la disminución extra nos permite evaluar la calidad del aire. El mismo efecto en la amplitud de los campos tiene la resistividad de la tierra. La amplitud disminuye al alejarnos de la fuente no sólo por efectos geométricos: la tierra también pone su parte. Entonces tenemos que ambas cantidades, la fase y la amplitud, proveen información sobre la resistividad de la tierra. Por lo general, a mayor atenuación y diferencia de fase, menor la resistividad.

7.4.3 TODO ES LINEAL EN PEQUEÑAS CANTIDADES

No es fácil obtener una fórmula para la resistividad de una tierra homogénea en el caso de los métodos electromagnéticos de fuente controlada. De hecho es imposible. Aún en el caso más simple en que tanto el transmisor como el receptor sean bobinas pequeñas

horizontales colocadas sobre el terreno, no es posible obtener una fórmula para la resistividad en función de la frecuencia, la separación entre transmisor y receptor y la medición misma de los campos. El efecto de las corrientes inducidas es simplemente demasiado complicado para que puedan separarse las diferentes variables, particularmente la resistividad. Esto no significa que no exista una fórmula para el campo electromagnético en función de la separación, la frecuencia y la resistividad. Esta fórmula sí existe, incluso existen soluciones para situaciones mucho más complicadas. A estas fórmulas se les conoce como soluciones al problema directo: dadas la separación, la frecuencia y la distribución de resistividades, la solución de las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético es la solución del problema directo. Aunque este problema tiene sus dificultades intrínsecas, es relativamente menos difícil que lo que se conoce como el problema inverso: dadas la separación, la frecuencia y el campo electromagnético, encontrar la distribución de resistividades en el subsuelo. En el presente caso, el problema inverso no tiene solución: ¡Ni para una tierra homogénea!

Y sin embargo, como se mencionó al inicio del presente texto, es muy importante contar con una fórmula para la resistividad de una tierra homogénea, aunque la misma no se aplique en general para cualquier frecuencia o separación. Puede tratarse de una fórmula que sólo se aplique, por ejemplo, para frecuencias muy bajas. Como el campo electromagnético depende de la frecuencia, podemos buscar la forma en que depende cuando la frecuencia es muy baja. Sabemos, por nuestras clases de cálculo diferencial, que cualquier función se puede expresar como una serie de potencias de la variable independiente. Esta serie de potencias, cuando la variable independiente es pequeña, se puede aproximar tomando solamente el término de potencia uno, despreciando todos los demás, dado que el cuadrado, cubo, etc., de una cantidad pequeña resultan mucho más pequeños que la cantidad misma. De esta manera se pueden obtener fórmulas sencillas partiendo de expresiones complicadas. Es claro que las fórmulas simplificadas serán válidas sólo para frecuencias pequeñas. Sin embargo, esto representará un gran avance si permite despejar la resistividad de una tierra homogénea, como de hecho lo permite en el presente caso, según se explica con mayor detalle en el siguiente punto. Pero no sólo es una cuestión de álgebra. De hecho se pueden diseñar y en realidad existen equipos que funcionan usando frecuencias para las que se cumple la relación lineal entre los campos y la frecuencia.

7.4.4 NADA MÁS PRÁCTICO QUE UNA BUENA TEORÍA

Si se quiere diseñar un instrumento utilizando una relación como la descrita en el punto anterior, se requiere conocer con exactitud la relación lineal entre el campo electromagnético y la resistividad de un medio homogéneo. Esto es, para proceder con sabiduría en la práctica, necesitamos apoyarnos en la teoría. Teoría es la solución de las ecuaciones de Maxwell para dos pequeñas bobinas, una transmisora y la otra receptora, colocadas sobre el suelo en la presencia de un medio homogéneo. Teoría también es el desarrollo de la solución en términos de una serie de potencias de la frecuencia. Y teoría también es la reducción de la serie de potencias a la relación lineal requerida. Sólo así, y no antes, sabremos cómo combinar la frecuencia, la separación entre transmisor y receptor y

la medición misma de los campos para obtener como resultado la resistividad del medio. No haremos estas derivaciones aquí. Como en los casos anteriores, nos limitaremos a presentar la fórmula resultante. La fórmula es: $\tan \phi = \omega \mu_0 \sigma s^2 / 4$, donde ϕ es el retraso de fase, $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular y f la frecuencia de oscilación, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ es la permeabilidad del vacío, σ (el inverso de la resistividad) es la conductividad del medio homogéneo y s la separación entre las bobinas. Como esperábamos, la fase, o mejor dicho la tangente de la fase, aumenta en forma lineal al aumentar la frecuencia. La relación también indica que la fase aumenta linealmente con la conductividad y en forma cuadrática con la separación. Esta relación se cumple solamente cuando la frecuencia es muy pequeña. A frecuencias arbitrarias la relación es mucho más complicada. La ventaja que se obtiene de la simplificación es que nos provee de una fórmula para la conductividad en términos de cantidades conocidas. Efectivamente: $\sigma = (4/\omega \mu_0 s^2) \tan \phi$. Todas las cantidades del lado derecho se conocen: ω es la frecuencia angular de la función coseno que rige la variación de la corriente en la bobina que actúa como fuente, μ_0 es una constante, s es la separación entre las bobinas transmisora y receptora, y ϕ es la fase del campo magnético en la posición del receptor con respecto a la corriente en la fuente.

La fórmula anterior también se aplica cuando las bobinas se colocan verticales en un mismo plano y a la misma separación que las horizontales. Para una situación dada en que ambos tipos de mediciones se realicen sobre una tierra homogénea, el valor numérico de la conductividad será exactamente el mismo. Sin embargo, como veremos en uno de los próximos números, las dos determinaciones de la conductividad no son enteramente equivalentes. Esto se debe a que cada una representa un promedio diferente de la distribución de conductividad o resistividad del subsuelo. En un medio homogéneo el promedio es el mismo, pero la forma de promediar no es la misma. Ocurre igual cuando utilizamos un mismo arreglo de bobinas a diferentes separaciones. La resistividad o conductividad resultante es la misma, pero la forma de promediar con respecto a la profundidad no lo es. Si la separación es mayor, la profundidad a la que se promedia es mayor. Esto se explica considerando que las corrientes inducidas en el subsuelo son más intensas cerca de la fuente, tanto respecto a la distancia horizontal como a la profundidad. Si el receptor está muy cerca del transmisor, se estará midiendo sobre todo el efecto de corrientes superficiales, ya que las corrientes profundas no podrán competir con las superficiales, cuyo efecto en el receptor será proporcionalmente mayor. A medida que nos alejamos, las corrientes superficiales pierden intensidad más rápidamente que las profundas, por lo que aumenta el efecto relativo de las corrientes a mayores profundidades.

A partir del próximo número iniciaremos la explicación detallada de las fórmulas presentadas en los apartados anteriores. Particularmente, *el por qué y el cómo* de las diferentes formas de promediar la distribución de conductividad del subsuelo.