

IMÁGENES ELECTROMAGNÉTICAS DEL INTERIOR DE LA TIERRA: PARTE VI

Enrique Gómez Treviño
CICESE, Ensenada, Baja California, México

Parte I:	GEOS, 1996, Vol. 16, No. 3, 152-154
Parte II:	GEOS, 1997, Vol. 17, No. 2, 104-106
Parte III:	GEOS, 1997, 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.

En este número veremos una técnica más con la que se puede obtener directamente la resistividad de una Tierra homogénea. La técnica consiste en hacer circular corriente eléctrica en la Tierra mediante el efecto de campos magnéticos variables en el tiempo, por lo que no existe contacto material entre la fuente y el terreno como en la técnica de corriente directa, en donde la corriente se inyecta mediante varillas clavadas en el suelo. Trataremos aquí con corrientes que se producen simplemente en respuesta a variaciones temporales de campos magnéticos como en el caso de las corrientes telúricas. Ya vimos en una sección anterior los procedimientos que se han ideado para medir la resistividad mediante el flujo de corriente directa. También consideramos la forma en que se procede en el caso de las corrientes telúricas, particularmente en relación con el uso de variaciones armónicas o sinusoidales. Explicamos que cuando la fuente de los campos magnéticos oscila armónicamente, las corrientes en el terreno, así como los campos que éstas generan, también oscilan en la misma forma, y que el periodo de oscilación es exactamente el mismo para fuentes y corrientes. Ninguna otra forma de variación temporal posee esta importante propiedad, la cual facilita enormemente la aplicación de la teoría electromagnética a una variedad de problemas. Sin embargo, lo anterior no significa que no podamos utilizar otras formas de variación. En la práctica, se realizan más sondeos con variaciones del tipo de escalón o impulso que con variaciones armónicas. En este número explicaremos estos métodos, a los cuales, por lo general, se les denomina métodos del dominio del tiempo o transitorios.

Como en los casos anteriores, nos limitaremos a explicar los procedimientos para obtener la resistividad de un medio homogéneo. Con estos nuevos casos tendremos a nuestra disposición una serie de recetas o fórmulas diferentes que producen exactamente el mismo resultado. Esto es, en todos los casos se obtendrá un único y mismo valor: la resistividad del medio en cuestión. Sin embargo, veremos que cada fórmula se caracteriza por una forma muy particular de realizar el muestreo de la resistividad a diferentes profundidades. Y no sólo las diferentes fórmulas son distintas: la misma fórmula muestrea de diferente forma las profundidades, dependiendo de parámetros como la separación entre electrodos o el periodo

de oscilación. Todos estos aspectos los veremos en su oportunidad, cuando pasemos al caso de medios heterogéneos, lo que a su vez, nos llevará directamente al problema de recuperar la distribución de resistividades del subsuelo. Las imágenes electromagnéticas del interior de la Tierra no serán otra cosa que representaciones gráficas de estas distribuciones de resistividad.

7.3 TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS

7.3.1 CATÁSTROFE DE FIN DE MILENIO

Una de las mil y una catástrofes que se antojan para el fin del milenio es la repentina desaparición del campo magnético de la Tierra. Nadie ha vaticinado este posible desastre porque sus consecuencias no son tan obvias como las de los terremotos y las erupciones volcánicas. Además, los pronósticos de fin de milenio están diseñados para asustar a la gente y difícilmente, se podría asustar a alguien diciéndole que las brújulas dejarían de funcionar. Inmediatamente nos replicarían que las brújulas ya no se usan pues lo moderno es usar el sistema de posicionamiento por satélite. Sin embargo, tal vez ningún evento tendría mayor impacto sobre nuestro planeta que el desvanecimiento del campo magnético. No solo las brújulas dejarían de funcionar, lo que, para geólogos y geofísicos sí representaría una verdadera catástrofe, sino que además las condiciones para la vida desaparecerían muy pronto de nuestro planeta. Entre otras cosas, nuestro querido campo magnético nos protege como una sombrilla cósmica de los efectos del viento solar, lo cual, a pesar de ser un tema muy interesante, excede los fines de este escrito. En realidad, para los propósitos de obtener imágenes electromagnéticas del interior de la Tierra, sería muy conveniente que el campo magnético se desvaneciera y resurgiera de vez en cuando. De esta manera podríamos realizar mediciones de los fenómenos transitorios asociados a la desaparición, que nos permitirían inferir la distribución de la resistividad eléctrica desde la superficie hasta el núcleo mismo del planeta. Así como es, estático, el campo magnético no tiene ninguna utilidad para estudios que involucren el flujo de corriente eléctrica. Esta limitación es producto de las leyes naturales: los campos magnéticos estáticos no hacen fluir corriente en los materiales conductores. Para que esto suceda es necesario que el campo cambie de magnitud o de dirección. Las corrientes aparecen durante el periodo de transición.

La transición entre el tener y ya no tener campo magnético en la Tierra seguramente resultaría muy espectacular, pues no faltarían las luces de colores que iluminarían el cielo en pleno día. La transición estaría caracterizada por la aparición

repentina de gigantescas corrientes eléctricas que circularían en la atmósfera, los océanos y los continentes. Como sabemos, cuando un campo magnético varía en el tiempo, se producen corrientes eléctricas en los materiales conductores que se encuentran presentes, de tal forma que las corrientes son mayores en la medida en que los cambios son más rápidos. Ahora bien, la desaparición repentina de un campo es una de las formas más rápidas de variación que puedan producirse; incluso más rápida que cualesquier variación armónica. Esto significa que la desaparición del campo magnético de la Tierra posee un gran potencial para producir corrientes eléctricas, siempre y cuando estén presentes materiales conductores. Al respecto, sabemos que los continentes son buenos conductores de la electricidad y que los océanos y algunas partes de la atmósfera lo son aún más. Tenemos entonces todos los ingredientes para que aparezcan corrientes eléctricas en *tierra, mar y cielo*. En los continentes, las corrientes más fuertes se concentrarían en lugares donde predominan las rocas sedimentarias, ya que su resistividad tiende a ser menor que la de las rocas ígneas y metamórficas. Por otro lado, independientemente del tipo de roca, en el momento mismo en que se apagara la fuente del campo magnético, las corrientes estarían concentradas en las partes más superficiales. Al transcurrir el tiempo las corrientes se extenderían gradualmente a mayores profundidades, por lo que podríamos literalmente detectar el valor de la resistividad desde la superficie hasta el centro de la Tierra. Esta combinación de variaciones laterales que dependen del tipo de roca, con variaciones verticales que dependen del tiempo, permitirían, en principio, obtener la distribución tridimensional de la resistividad de la Tierra. Podríamos entonces saber muchas cosas sobre la evolución de la Tierra, sobre su régimen térmico, sobre la dinámica de la tectónica de placas y sobre un sinfín de enigmas que aun no tienen respuesta. Sin embargo, por nuestra propia salud mental es muy conveniente que en este preciso instante volvamos a la realidad: nada de esto ocurriría, pues es imposible que el campo magnético de la Tierra desapareciera repentinamente. Además, —para nuestra fortuna— no tenemos control sobre su fuente, por lo que no podemos apagarla ni prenderla a voluntad.

7.3.2 EVITANDO LA CATÁSTROFE

El que quiere puede, reza el dicho. Aunque podemos experimentar con el campo magnético natural de la Tierra, sí podremos experimentar con campos artificiales sin poner en peligro a nuestro planeta. Basta con hacer que circule corriente directa por un cable para producir un campo magnético, y basta con cortar el cable, para que el campo desaparezca, creando así las condiciones de un campo variable capaz de inducir corrientes en el subsuelo. En la práctica generalmente se tienden en el suelo espiras de varios cientos de metros de diámetro por donde se hace circular una corriente de varios amperios. Como el campo magnético no depende de la resistividad del terreno, las líneas de campo se continúan del aire al suelo como si el terreno no existiera. De hecho, el campo en el subsuelo será idéntico al campo de la espira en el vacío

o en el aire. Muy cerca de los cables el campo generalmente es mucho mayor que el campo natural de la Tierra, y tiende a ser mucho menor al alejarse de ellos. Debido a esta disminución del campo con la distancia, el volumen afectado por la espira no es muy grande. Típicamente la penetración del campo no va más allá del doble del diámetro de la espira. En comparación, el campo magnético natural afecta significativamente a toda la Tierra. Ahora bien, al cortar el cable se inducirán corrientes en el terreno, mas no en el aire, ya que este último no es conductor. Como veremos, la intensidad de la corriente en el suelo dependerá de la resistividad eléctrica del terreno, así como del tiempo transcurrido desde la interrupción de la fuente. Típicamente la corriente desciende a cero en menos de un segundo. Generalmente en el centro de la espira se coloca una espira más pequeña mediante la cual se mide el decaimiento de las corrientes que circulan en el subsuelo. Una vez conocido este decaimiento, se procede a utilizarlo en la fórmula que relaciona el tamaño de las espiras con la resistividad del terreno. El proceso de despejar la resistividad del terreno no es nada simple, aun considerando que se trate de un medio homogéneo. De hecho, para el caso que estamos considerando, no existe una fórmula algebraica que exprese la resistividad en términos de las demás cantidades. Conocemos la ecuación que relaciona las diferentes cantidades, pero resulta imposible despejar la resistividad. Por lo general se recurre a aproximaciones o a familias de curvas patrón para recuperar la resistividad del terreno.

7.3.3 AYUDA DEL CIELO

Para ilustrar con un ejemplo sencillo el uso de los transitorios electromagnéticos recurriremos a los campos magnéticos que se originan en el cielo. El caso que veremos permite despejar la resistividad del terreno en términos de las demás cantidades. Como se recordará, en la sección dedicada al método magnetotelúrico mencionamos que en el cielo, en la ionosfera, el viento solar produce corrientes eléctricas que varían en el tiempo en forma caprichosa. También mencionamos que estas variaciones se pueden representar como una suma de variaciones armónicas, y que las amplitudes y las fases de estas variaciones armónicas se pueden obtener directamente de los registros de las señales originales. En otras palabras, que una vez que conocemos estas amplitudes y estas fases, podemos reconstruir las variaciones originales mediante una simple suma de armónicos. Una cosa que no dijimos, pero que mencionaremos ahora, es que podemos reconstruir el decaimiento de corrientes en la Tierra para el supuesto caso de un campo magnético estático que repentinamente desaparece. Esto en realidad no se observa en la naturaleza: ninguna de las variaciones caprichosas que se originan en la ionosfera se aproxima siquiera a esta situación. Sin embargo, es perfectamente posible sumar los armónicos del campo magnético asignando diferentes pesos a cada uno de ellos, de tal forma que la suma resulte en la variación deseada. Sumando ahora los armónicos del campo eléctrico con los mismos pesos usados para el campo magnético, obtendremos el decaimiento

del campo eléctrico que corresponde a la desaparición repentina del campo magnético. A este decaimiento se le conoce generalmente como la respuesta de la Tierra a un escalón de campo magnético. El resultado es equivalente a haberlo medido realmente en la naturaleza. Se trata de un proceso de síntesis muy útil en la práctica. También se puede sintetizar el decaimiento del campo eléctrico cuando el campo magnético aparece repentinamente y enseguida desaparece. A este decaimiento generalmente se le conoce como la respuesta de la Tierra a un impulso de campo magnético. A ambos tipos de decaimiento se les conoce como respuestas en el dominio del tiempo o simplemente como transitorios electromagnéticos.

Los procedimientos de síntesis descritos en el párrafo anterior se refieren a mediciones de campo. Lo que ahora procede para poder utilizar los decaimientos es conocer la forma precisa en que el campo eléctrico depende de la resistividad. Al respecto, ya sabemos la fórmula que expresa esta dependencia en el caso de variaciones armónicas. Se trata de la fórmula que se discutió en la sección sobre el método magnetotelúrico. Siguiendo el mismo razonamiento que en el caso de las mediciones, en donde se sumaron con diferentes pesos las respuestas de diferentes armónicos, podemos sumar igualmente las respuestas de los diferentes armónicos, pero ahora utilizando los valores que predice la teoría. El paso formal de un dominio a otro se realiza mediante la Transformada de Fourier de las fórmulas correspondientes. Para el caso de la respuesta al escalón el decaimiento del campo eléctrico se puede expresar como $E(t)=2H(\mu_0\rho/t\pi)^{0.5}$, donde t representa el tiempo transcurrido desde la desaparición del campo magnético, H es la intensidad del campo magnético antes de su desaparición, μ_0 representa la permeabilidad magnética del aire o vacío, la cual puede encontrarse en casi cualquier libro de Física, ρ es la resistividad de la Tierra y π es simplemente 3.1416. Como puede observarse, el decaimiento del campo eléctrico posee información sobre la resistividad del terreno. Además, en este caso sí se puede despejar ρ de la fórmula. Por otro lado, en el caso de la respuesta al impulso, el decaimiento del campo eléctrico se puede expresar como $E(t)=(H/t)(\mu_0\rho/t\pi)^{0.5}$, donde ahora H representa la amplitud del impulso del campo magnético y las demás variables son como en la fórmula anterior. Puede fácilmente apreciarse que el decaimiento en este caso es más rápido que para el escalón. Sin embargo, la fórmula sigue siendo lo suficientemente simple como para despejar la resistividad del terreno. En ambos casos la resistividad queda expresada en términos de cantidades conocidas o que pueden conocerse a través de las mediciones.

Es interesante observar que las fórmulas anteriores proporcionarán un único y mismo valor independientemente del tiempo t que se utilice, con tal de que éste corresponda al tiempo en que se efectuó la medición. Esto no podría ser de otra manera ya que se trata de un medio homogéneo. Sin embargo, las mediciones a diferentes tiempos no son enteramente equivalentes. Esto se debe a que a diferentes tiempos, las corrientes en el subsuelo fluyen a diferentes

profundidades. A tiempos cortos las corrientes están limitadas a fluir en las partes más superficiales y a medida que transcurre el tiempo, se van extendiendo a mayores profundidades. Como en el caso de las corrientes telúricas, la penetración también depende de la resistividad del terreno. En el presente caso la profundidad de penetración se puede estimar con la fórmula $d=1500(\rho t)^{0.5}m$. Procediendo de manera similar a como se hizo en el caso de las corrientes telúricas, podemos decir que la zona de influencia de una medición en el dominio del tiempo está limitada por una esfera de radio d y centrada en el punto de medición. Tenemos entonces que mediciones realizadas a diferentes tiempos t no son enteramente equivalentes, aun en el caso en que los resultados de las diferentes mediciones arrojen exactamente el mismo valor de resistividad. En realidad, mediciones realizadas a diferentes tiempos estarán siendo afectadas por volúmenes muy diferentes. Esto tiene la gran ventaja de que podemos controlar el volumen que afecta a las mediciones. En muchos otros métodos geofísicos, como el gravimétrico, no se tiene control alguno sobre el volumen que afecta a una medición de gravedad.