Prospección hidrogeológica en zonas áridas de baja permeabilidad (Tifariti, Sahara Occidental) con el método EM de inducción

Hydrogeological survey in a dry and low-permeability area (Tifariti, Western Sahara) with the induction EM method

Antonio J. Olaiz [1,2], Alfonso Muñoz-Martín [1], Fermín Villarroya [1], Javier de Lorenzo [2], Cristina Castanedo [2] y Antón Padín [2]

[1] Departamento de Geodinámica, Facultad de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. ajolaizc@geo.ucm.es
[2] Geosolidarios

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate electromagnetic induction methods to analyze low permeability rocks in desert areas, as a tool for groundwater surveying. We have focused the field work in large faults zones, previously mapped by satellite images and digital elevation models. This is because in low-permeability rocks (i.e. granites) the groundwater flow is mainly controlled by these discontinuities. The objective is to map the high conductivity zones and their geometry in depth. Obtained results allow us to identify well defined fractures with low apparent resistivities that are the most suitable areas to locate groundwater extractions.

Key words: *Electromagnetic method, hydrogeology, fracture, granite, EM-34*

Geogaceta, 46 (2009), 43-46
ISSN: 0213683X

Introducción y objetivos

Las zonas graníticas presentan generalmente una baja permeabilidad, siendo las zonas de fractura las vías de flujo preferencial del agua subterránea. De este modo la caracterización, tanto en superficie como en profundidad, de estas zonas resulta fundamental. Desde el punto de vista geofísico los métodos más utilizados para la investigación hidrogeológica son los eléctricos (medición de resistividades con sondeos eléctricos verticales o tomografía eléctrica) y electromagnéticos de inducción (EM), bien en dominio de tiempos (TDEM) o en frecuencias (FDEM). En ambos casos el parámetro utilizado es la resistividad eléctrica (o su inversa la conductividad), cuyo valor está fuertemente controlado por la presencia de agua y la litología, debido a que la conducción eléctrica en medios rocosos (exceptuando las arcillas y materiales metálicos) es, fundamentalmente electrolítica. Este parámetro es especialmente útil para la detección de fracturas en granitos, ya que el contraste de resistividades entre el granito fresco y el granito alterado es elevado. En este tipo de áreas graníticas y desérticas, las zonas más probables para la acumulación del agua son las fracturas, por lo que el objetivo del trabajo es localizar dichas fracturas y marcar puntos apropiados para la perforación.

Para abordar el estudio de este tipo de áreas debemos integrar la información geológica existente (cartografía, análisis de la fracturación) y geofísica (principalmente métodos eléctricos y electromagnéticos), con la información hidrogeológica (Muñoz-Martín ,*et al.*, 2007 y De Vicente *et al.*, 2009 (este volumen).

El objetivo de este trabajo es localizar las zonas más favorables para la realización de sondeos de explotación de aguas subterráneas en un extenso batolito granítico proterozoico localizado en las proximidades de Tifariti (Sáhara Occidental, Fig. 1).

Para alcanzar este objetivo se realizó una campaña geofísica de investigación de las zonas más favorables para la extracción de agua con un método EM de inducción ligero en el dominio de frecuencias (EM-34). La localización de los estudios geofísicos se realizó mediante perfiles transversales a las principales zonas de fractura cartografiadas mediante interpretación de análisis de las imágenes de satélite.

Marco geológico y estructural

El área de estudio se encuentra en el núcleo del anticlinal conocido como Dorsal Reguibat, al sur del sinclinal de Tindouf (Hernández-Pacheco *et al.*, 1949). En la zona de Tifariti encontramos las facies Ain Bentili, granitos calcoalcalinos de génesis intraplaca, que aparece cortada por diques gábricos. La edad de la facies Ain Bentili es de 2037 Ma y la de los diques 1573 Ma (Bronner *et al.*, 1985). De forma discordante, con un buzamiento muy bajo (5º-10º), y orlando al granito, encontramos Cuarzoarenitas (Ordovícico), Calizas azules con ortoceras (Silúrico Medio-Superior) y las areniscas de Ratmia (Devónico Inferior) (Hernández-Pacheco *et al.*, 1949) (Fig. 1).

El estudio de las imágenes de satélite, modelo digital del terreno (SRTM - 90 m), de la base topográfica existente y de la red de drenaje (Fig 1.), así como el

Copyright ® 2009 Sociedad Geológica de España / www.geogaceta.com

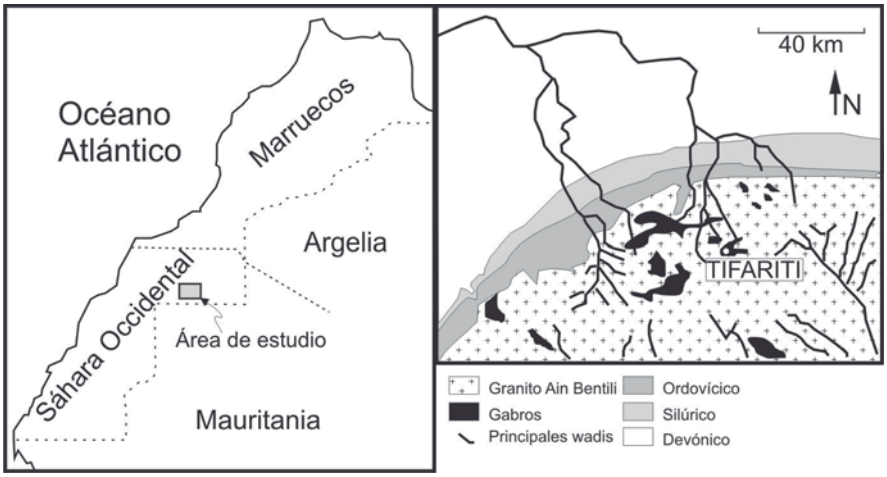

Fig. 1.- Localización y mapa geológico de la zona de estudio.

Fig. 1.- Location and geological map of the studied area.

posterior estudio estructural en campo (Fig 2.), permite confirmar que: 1) el granito se encuentra intensamente fracturado según dos direcciones principales (NO-SE y NE-SO) y 2) estas fracturas condicionan claramente el flujo de agua superficial y subterránea.

Metodología y trabajos realizados

Como aplicación a la hidrología, los métodos de prospección geofísica más utilizados son los eléctricos y electromagnéticos, que permiten cuantificar la distribución de resistividades en el subsuelo, parámetro muy dependiente del contenido en agua. Esto es así especialmente si el trabajo se desarrolla en zonas graníticas donde los valores de resistividad son elevados cuando la roca está sin alterar, en contraste de las medidas obtenidas cuando la roca aumenta su permeabilidad y contenido en agua por alteración y/o fracturación. En este caso se utilizó el método electromagnético de inducción ligero EM-34, debido a la gran extensión que se quería estudiar, a su alcance en profundidad (60 m), y a que los datos previos obtenidos con otros métodos (sondeos eléctricos verticales y sondeos mecánicos, Unidad Hidrología del Sáhara, comunicación personal), que indicaban la presencia de agua a partir de 30 metros de profundidad.

El método EM-34 utiliza una corriente eléctrica alterna que circula por una bobina Transmisora (Tx), produce un campo magnético en fase con el eléctrico (campo primario o normal, (Hp) que induce corrientes eléctricas en el subsuelo. Estas corrientes eléctricas secundarias generan, a su vez, un campo magnético secundario (Hs) que es detectado, junto con el primario, en una bobina receptora (Rx). La diferencia entre estos dos campos, si se conoce la separación de las antenas y las frecuencias utilizadas, permite calcular el valor de la resistividad aparente y/o conductividad eléctrica hasta una profundidad que depende de estos parámetros. Si se cambia la separación de las antenas, su frecuencia, o bien la orientación de sus ejes, resulta posible obtener resistividades aparentes a diferentes profundidades de investigación.

En este trabajo se utilizó el sistema EM-34 con una separación de 40 m, y con el eje del dipolo en la vertical y en la horizontal, lo que permite obtener medidas de conductividad aparente a 30 y 60 m de una profundidad (Tabla I). Se estudiaron 3 zonas de especial interés, donde se realizaron un total de 193 medidas a dos profundidades distintas (30 y 60 metros) con una separación de 20 metros entre ellas. Todas ellas fueron posicionadas con GPS, con un error menor de 1 metro en la horizontal (Fig 3.). La obtención de las medidas se realizó en perfiles transversales a las estructuras principales, y, posteriormente estos valores fueron interpolados a una malla regular mediante kriging con variograma lineal. De esta manera se construyeron para cada zona dos mapas de resitividades aparentes a 30 y 60 m de profundidad.

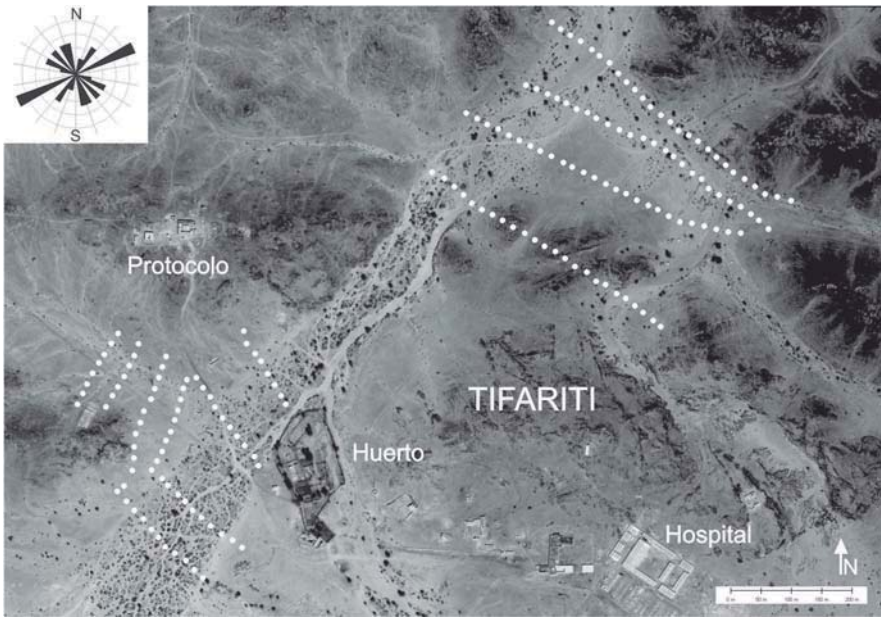

Fig. 2.- Ortoimagen de Tifariti y localización de los puntos de medida (puntos blancos). Rosa de orientaciones de planos de falla en la zona de Tifariti.

Fig. 2.- Orthoimage from Tifariti and measure points (white dots). Rose diagram with faults orientation in Tifariti.

Resultados

La primera zona estudiada, al norte de Tifariti, se encuentra en una zona de intersección de dos orientaciones principales de fracturación (NO-SE y NE-SO). En ella se realizaron cuatro perfiles de toma de datos orientados NO-SE. En el mapa de resistividad aparente a 30 metros (Fig. 4A), se aprecia claramente como los valores más altos corresponden al granito fresco (resistividad aparente $\geq$ 130 W·m) y como los valores más bajos (resistividad aparente $\leq$ 50 W·m) se corresponden con la intersección de las fracturas, dando un mínimo muy marcado y muy bien constreñido por gran can-

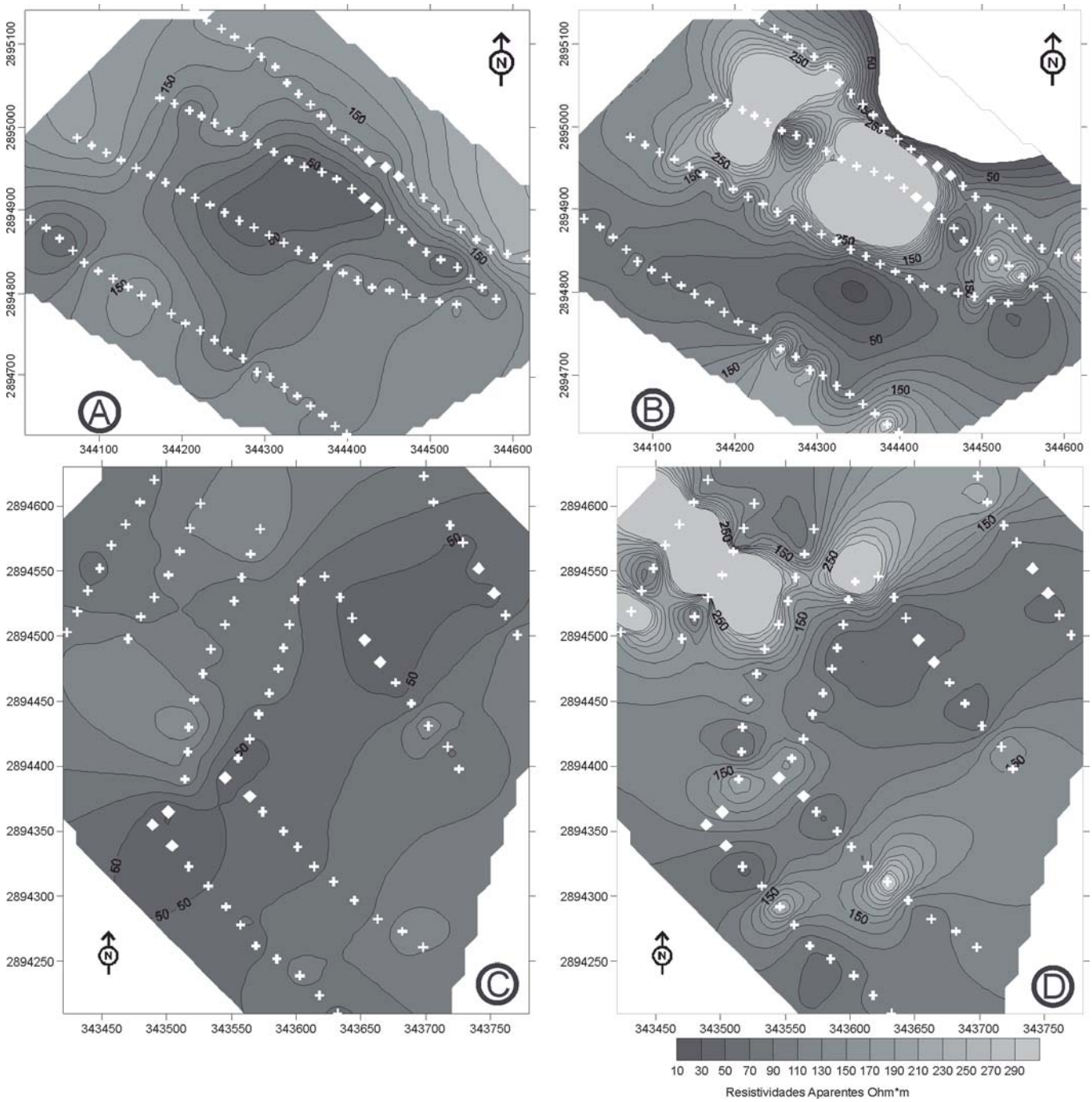

Fig. 3.- Mapas de isoresistividades aparentes. A) Zona norte de Tifariti a 30 metros de profundidad. B) Zona norte a 60 metros de profundidad. C) Zona oeste de Tifariti a 30 metros de profundidad. D) Zona oeste a 60 metros. Cruces: puntos de medida. Rombos: valores negativos.

Fig. 3.- Apparent isoresistivity plots. A) Tifarity´s northern zone 30 meters in depth. B) Northern zone 60 meters in depth. C) Tifarity´s western zone 30 meters in depth. D) Western zone 60 meters in depth. White crosses: measure points. White rombs: negative values.

tidad de datos. En el mapa a 60 metros (Fig. 4B) se observa que el mínimo está desplazado hacia el sur, manteniéndose la orientación, lo que induce a pensar que la zona menos resistiva buza hacia el S. Observamos también que los valores de resistividad del granito aumenta en el mapa a 60 m, lo que indica una menor alteración del mismo en profundidad. Por otra parte se han obtenido an

Profundidad de exploración (metros)			
Frecuencias (Hz)	Separación antenas (m)	Dipolo Horizontal (HD)	Dipolo Vertical (HV)
6400	10	7.5	15
1600	20	15	30
400	40	30	60

Tabla I.- Profundidades de investigación para el EM-34 en función de la separación entre de los dipolos.

Table I.- Exploration depths for EM-34 at various intercoil spacings.

algunos casos valores de resistividad negativa alineados (Fig. 4), que Mcneill (1983) explica en relación con la presencia de diques básicos cuya potencia es mucho menor que la separación entre aros.

En el área al oeste de Tifariti (Fig. 4C) se realizaron 76 medidas distribuidas en 4 perfiles perpendiculares al valle principal y 4 paralelos a éste, que a su vez son perpendiculares otro «wadi» tributario. En el mapa de resistividades aparentes a 30 metros (Fig. 4C) se observa cómo los mínimos tienen la orientación principal, así como los máximos se corresponden con el granito aflorante. En el mapa a 60 metros (Fig. 4D) se observan las mismas directrices estructurales, aunque hacia el suroeste se aprecia que los valores no son tan bajos, lo que hace pensar que esa zona es menos favorable desde el punto de vista de explotación de aguas subterráneas. En esta zona también se obtuvieron medidas negativas paralelas a la zona de fractura, si bien en este caso no afloraban los posibles diques que las generarían.

Conclusiones

El método EM de inducción ligera se muestra como una herramienta adecuada para localizar las áreas más favorables desde el punto de vista hidrogeológico en macizos graníticos y ambientes áridos. Debido a su ligereza, y la rapidez y eficiencia de la toma de datos, este método permite abarcar grandes extensiones de terreno, lo que permite localizar las zonas más favorables donde focalizar estudios posteriores más detallados (sondeos eléctricos verticales o tomografía eléctrica), que permitan cuantificar en profundidad la presencia del nivel freático y/o los valores de resistividad real.

Se han cartografiado grandes zonas de granito fresco, con resistividades aparentes elevadas (≥130 W·m) y zonas de baja resistividad aparente (≤ 50 W·m), asociadas a las zonas de brecha del granito en las zonas fracturadas, así como a la posible presencia de agua a favor de dichas estructuras.

Resulta imprescindible el trabajo previo de identificación de las zonas fracturadas, mediante el estudio de modelos digitales del terreno, en este caso el SRTM, único disponible de la zona, así como de las imágenes de satélite para planificar los perfiles de investigación lo más transversales posibles a las estructuras principales.

En la zona al oeste de Tifariti y en la de Buertiguisit, se han realizado sondeos mecánicos, en los que se obtuvo agua. Desafortunadamente en el primero de ellos la calidad del agua no era adecuada para el consumo humano, y el nivel freático descendió acusadamente en pocos meses. Por su parte en Buertiguisit, aunque no conocemos los datos de calidad del agua, está siendo utilizada para consumo humano y el nivel freático se mantiene estable.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido llevado a cabo gracias a la colaboración de la asociación Geosolidarios (http://geosolidarios.blogspot.com/), formada por PDI, PAS y alumnos de la Universidad Complutense. Los autores quieren agradecer especialmente al Grupo de Geofísica del Departamento de Geodinámica la cesión de los equipos y su colaboración. Este estudio continúa gracias a la financiación del proyecto «Formación práctica avanzada de profesionales para la exploración de aguas subterráneas y mantenimiento de infraestructuras asociadas en los campamentos de refugiados saharauis» de la convocatoria 2008 de los proyectos de Cooperación Internacional de la Universidad Complutense. Gracias por el apoyo de la Unidad de Hidrología, a Salem Bouchrya, Kinti Mohamud y Sidi Ahmed, y del gobierno de la República Árabe Saharaui Democrática.

Los autores agradecen la revisión y enriquecedores comentarios a Isla Fernández.

Referencias

Bronner, G. Marchand, J. y Sougy J. (1985). *Sòcle Precambrien: Carte géologique du Maroc*. Ministère de l'energie et des mines.

De Vicente, R., Muñoz-Martín, A., Olaiz, A., Antón, L. y De Vicente, G. (2009). *Geogaceta*, 46, 39-42.

Hernández-Pacheco, E., Hernández-Pacheco, F., Alía-Medina, M., Vidal-Box, C. y Guinea-López, E. (1949). *El Sáhara Español, estudio geológico, geográfico y botánico*. CSIC, Instituto de Estudios Africanos, Madrid.

McNeill, J.D. (1983). *EM-34 Survey interpretation techniques*. Geonics Limited, Ontario, Canadá.

Muñoz-Martín, A., Olaiz, A., De Vicente, G., Antón, L., Elorza, F.J. y De Vicente, R. (2007). *Geogaceta*, 42, 35-38.