

## **APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN DESLIZAMIENTO DE LADERA EN UN VERTEDERO**

ARACIL ÁVILA, Enrique (\*) (\*\*). PORRES BENITO, José Ángel (\*).  
ESPINOSA GONZÁLEZ, Ana Belén (\*). MARURI BROUARD, Unai (\*\*).  
VALLÉS IRISO, Javier (\*\*). GARCÍA CASTILLO, Luis (\*). IBÁÑEZ  
GARCÍA, Sergio (\*).

(\*) Área de Ingeniería del Terreno. Universidad de Burgos.

(\*\*) Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L. c/ Luxemburgo 4. 28224-Pozuelo de  
Alarcón (Madrid)

### **RESUMEN:**

Este documento describe los trabajos llevados a cabo para la caracterización de un deslizamiento de ladera producido en uno de los taludes que configuran el material de relleno de un vertedero de RSU/RCD ya clausurado y recientemente restaurado.

Este antiguo vertedero de dimensiones aproximadas 400 x 250 m. se encuentra situado en el norte de la península ibérica y actualmente presenta un paisaje de pradera con pendiente pronunciada. La restauración se abordó mediante el recubrimiento con bloques de roca caliza y margocaliza con un importante aporte de margas, arcillas y tierras. En primavera del año 2003, como consecuencia de lluvias intensas, se produjo un deslizamiento semicircular de 200 x 100 m en su parte central. Mediante una campaña de prospección geofísica por Tomografía Eléctrica se pudo determinar la verdadera extensión del vertedero en profundidad así como identificar la superficie de despegue del deslizamiento y ver la relación de la misma con los materiales del sustrato infrayacente.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Durante la última década, se ha producido una notable adecuación en la aplicación de técnicas geofísicas en la resolución de conflictos geotécnicos o medioambientales. Concretamente, la prospección eléctrica de resistividades mediante corriente continua ha experimentado un notable avance con la aparición de sistemas automáticos de adquisición de datos y programas informáticos para la obtención de imágenes del subsuelo con estimación de la distribución real de la resistividad en una sección del terreno.

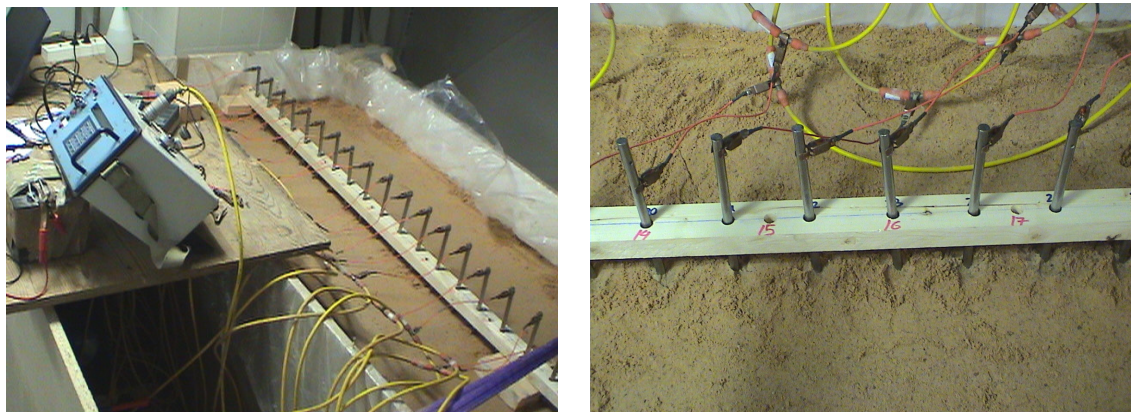
La implantación de dispositivos eléctrico-resistivos para la localización de contactos entre materiales del subsuelo se han venido utilizando con éxito desde 1950 (Beresnev, I.A. *et al.*, 2002), si bien las técnicas modernas permiten establecer una cada vez mayor aproximación entre los resultados obtenidos y la verdadera disposición de los materiales en el subsuelo. Con todo, el éxito de una campaña de investigación geofísica de resistividad mediante Tomografía Eléctrica depende en gran medida de múltiples factores, tales como la selección de la configuración tetraelectródica más sensible para nuestro propósito, la determinación de un espaciado interelectródico adecuado para el objetivo a localizar, la densidad y número de medidas o, por supuesto, la interpretación de los resultados por un técnico geofísico con suficiente experiencia en la materia. De este modo, se puede decir que la investigación mediante Tomografía Eléctrica dará buenos resultados o fracasará estrepitosamente en función de diversas decisiones que han de tomarse desde el inicio de una campaña de prospección (Porres, J.A., 2003).

Los antecedentes en la utilización de Tomografía Eléctrica para la localización de superficies de discontinuidad o contactos litológicos son múltiples y están bien documentados. Beresnev, I.A. *et al.* (2002) presenta buenos resultados empleando un dispositivo de 24 electrodos para la localización de depósitos de gravas y arenas, permitiendo hacer una valoración volumétrica con gran exactitud. Demanet, D. *et al.* (2001), Caputo, R. *et al.* (2003) y otros muchos han aplicado estas técnicas para localizar fallas activas en sedimentos cuaternarios recientes. La versatilidad de estas técnicas llega incluso a servir para el estudio de suelos contaminados (De la Vega, M. *et al.*, 2003; Aracil, E. *et al.*, 2003) o la evaluación de la potencialidad minera de terrenos para extracción de piedra ornamental (Aracil, E. *et al.*, 2002).

## **2. LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA DE RESISTIVIDAD**

La prospección geofísica de resistividades clásica combina en cada medición dos pares de electrodos. Se denominan A-B los electrodos que introducen corriente en el terreno y M-N los que detectan superficies de diferente potencial. Estas técnicas, exigían un cambio manual de los electrodos (tanto A-B como M-N) en cada nueva medida. Llevar a cabo una investigación 2D con suficiente calidad en

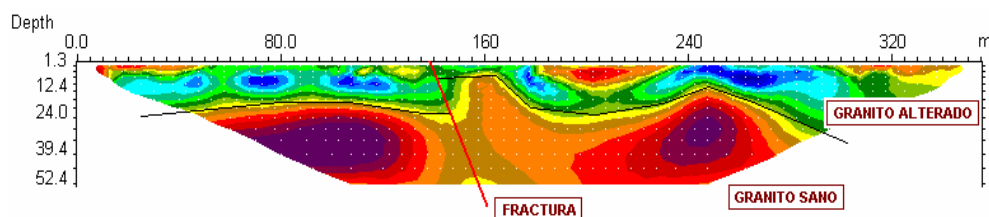
estas condiciones requería de un proceso lento y costoso. La Tomografía Eléctrica resuelve este problema de adquisición de datos ya que combina automáticamente un gran número de electrodos previamente clavados en el terreno con separación equidistante (Griffiths D.H. et al.,1990). Todos estos electrodos se conectan simultáneamente al equipo de medida y, mediante un programa secuencial específico para cada trabajo, el aparato "ordena" cuáles deben ser los conjuntos de cuatro electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición (Figura 1).



**Figura 1. Disposición de electrodos y equipo de Tomografía Eléctrica. Experimentación I+D+I sobre modelos a escala reducida en laboratorios del Área de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Burgos.**

El objetivo específico de esta técnica es determinar el valor de la resistividad eléctrica real y su distribución en el subsuelo a partir de mediciones realizadas en superficie o, en el ámbito comprendido entre dos sondeos. Posteriormente los datos son procesados con algoritmos mediante herramientas informáticas que tras un proceso de iteraciones aproximan la sección medida a un modelo teórico real (Loke, M.H., 1994).

El resultado final es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad eléctrica real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos (Figura 2).



**Figura 2. Sección de Resistividad eléctrica Real para la identificación de fracturas y rocas alteradas.**

Combinando adecuadamente resolución lateral y profundidad de investigación la Tomografía eléctrica es sin duda una de las herramientas de carácter no destructivo más eficaz para el estudio y caracterización del terreno en un amplio rango de profundidades.

### **2.1. Ámbitos de aplicación**

Por su capacidad resolutoria al investigar hasta profundidades que pueden llegar a centenares de metros, la Tomografía eléctrica es aplicable a cualquier estudio del subsuelo donde interese identificar todo tipo de accidentes o discontinuidades que representen un contraste suficiente en la distribución de resistividad del medio rocoso. Entre los objetivos más habituales a resolver mediante esta técnica cabe mencionar los siguientes:

- Detección y caracterización de fallas determinando su zona de influencia, rumbo, buzamiento y extensión en profundidad.
- Detección de contactos entre unidades litológicas de diferente naturaleza, determinando la morfología y localización precisa de tales discontinuidades.
- Detección y caracterización de cavidades y huecos, tales como accidentes kársticos, canalizaciones, depósitos, rellenos arcillosos, etc.
- Determinación de unidades acuíferas, niveles freáticos, intrusión marina, etc.

La capacidad resolutoria de la Tomografía eléctrica ofrece enormes posibilidades de aplicación en el ámbito de la prospección geológica, la geotecnia y la hidrogeología.

### **3. ADQUISICIÓN DE DATOS EN UN VERTEDERO**

La naturaleza y composición de las rocas, la textura más o menos alterada o más o menos porosa, unida al contenido en fluidos, son factores que van a condicionar la existencia de una mayor o menor concentración de iones. Una mayor movilidad de estos iones tiene como consecuencia una mayor conductividad o, lo que es lo mismo, una menor resistividad.

La prospección geoelectrica mediante perfiles continuos (tomografía eléctrica) se mostraba como el método geofísico más adecuado para diferenciar los materiales de estudio y de alcanzar los objetivos previstos. Así lo expresan Battayneh, A.T. y Al-Biabat, A.A. (2002) en su investigación de deslizamientos de ladera en una autopista de

Jordania mediante Tomografía Eléctrica. Ambos destacan la gran utilidad de esta técnica en el estudio de taludes inestables, permitiendo obtener imágenes 2D que reflejan con precisión la posición en el terreno de contactos entre roca sana y zonas superficiales alteradas. Localizada dicha discontinuidad y combinando los resultados con datos estructurales, estos trabajos permitirán delimitar la potencialidad del volumen inestable y definir medidas correctoras para su estabilización.

Se realizaron perfiles diversos, con orientaciones diferentes, pero todos ellos se midieron con un dispositivo mixto Schlumberger-Wenner, por haberse mostrado en experiencias previas como el más adecuado para la localización de contactos horizontales o subparalelos a la superficie del terreno (Porres, J.A., 2003).

#### **4. RESULTADOS**

Se pudieron diferenciar materiales conductores, representados en el perfil de resistividad con colores azulados y verdosos (rellenos con matriz limosa y arcillosa, bloques y residuos dispersos con mucha matriz, tierras). Los materiales de resistividad moderada, con colores amarillos y naranjas corresponden a zonas con predominio de bloques de roca y los materiales más resistivos, con colores rojos y morados reflejan la presencia de un sustrato rocoso infrayacente que se corresponde con la superficie de terreno original previa a los vertidos.

Estas distinciones son coherentes y semejantes a los resultados de Gallipoli, M.R. *et al.* (2000), que analizaron un deslizamiento en el sur de Italia con esta misma técnica, pudiendo localizar la superficie del deslizamiento a 30 m. de profundidad, en el contacto entre el techo de la roca compacta calcárea, de resistividad alta, y los materiales alterados superficiales, con contenido arcilloso y alto contenido en agua, lo que manifiesta una resistividad baja.

A partir de esta diferenciación de materiales geoelectricamente distintos se pudo observar que todos los perfiles mostraban una unidad superior de relleno antropogénico y una unidad inferior, que corresponde al sustrato rocoso natural.

El sustrato rocoso está formado por un conjunto de capas verticales (o casi verticales) alternantes de calizas, calizas margosas, margocalizas y margas). Se dispone a una profundidad variable, condicionada por un paleorrelieve irregular causado por la anterior erosión fluvial.

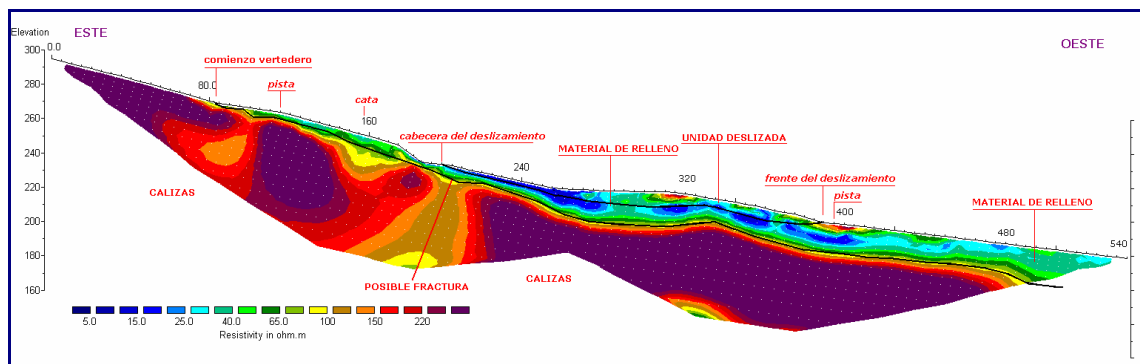
Esta antigua acción fluvial ha dejado unas vaguadas en el sustrato rocoso que se han podido identificar en los perfiles de tomografía eléctrica, y constituyen los "colectores" del agua que discurre bajo

los depósitos del vertedero; la circulación de agua bajo los rellenos genera inestabilidad en esta zona.

Por encima de este sustrato se dispone la unidad que forma el relleno antropogénico, que presenta variaciones muy importantes propias de esta tipo de depósitos, tanto en espesor como en características referentes a la naturaleza de los mismos. Respecto al espesor de estos materiales, se observa una variación entre 1 y algo más de 20 m, presentándose los espesores mayores a lo largo de una banda de dirección aproximada Este-Oeste, zonación coincidente con la trayectoria de las antiguas vaguadas, las zonas anteriormente más deprimidas y, consecuentemente, que más espesor de materiales podían acumular.

La buena caracterización de los materiales del vertedero ha permitido llegar a estimar en casi 500.000 m<sup>3</sup> el volumen de materiales de relleno y, por tanto, más o menos susceptibles de sufrir deslizamiento.

El análisis de la unidad que ha sufrido el despegue y posterior deslizamiento ha permitido identificar más materiales de relleno por debajo de la capa deslizada, lo cual implica que hay más depósitos susceptibles de sufrir el mismo proceso. Esta metodología ha facilitado realizar un diagnóstico de la unidad de relleno y de la capa deslizada y, a partir de ello, poder emplazar los sondeos de comprobación y análisis y, finalmente, diseñar las medidas correctoras a aplicar para evitar que dichos materiales de relleno más profundos puedan sufrir un nuevo despegue y, con ello, aumentar el volumen y extensión de la masa deslizada.



**Figura 3. Interpretación del perfil geoelectrico sobre la ladera deslizada del vertedero.**

## 5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos e interpretados, se presentan a continuación las principales conclusiones:

Se han identificado dos unidades geoelectricamente distintas en los perfiles de tomografía eléctrica: unidad de relleno (más conductora) y unidad rocosa (más resistiva).

La unidad que forma el relleno antropogénico presenta variaciones muy importantes tanto en espesor como en características. Los espesores varían entre 1 m y más de 20 m, siendo las más frecuentes potencias de este conjunto de materiales entre 5 y 10 m.

Los sectores donde esta unidad en conjunto presenta menor espesor se agrupan en torno a los bordes del actual vertedero restaurado así como en el sector central (por la "evacuación" de material a causa del deslizamiento sufrido) y sur.

Dentro de la unidad que forma el conjunto del relleno, se diferencian dos unidades muy claras, que se han denominado Unidad de Relleno de Tierras y Unidad de Relleno de Bloques. La Unidad de Relleno de Tierras está formada por un conjunto de materiales cuya proporción de tierras, arcillas y limos es muy importante y que presentan, además, un grado de humedad (agua) destacable. En la Unidad de Rellenos de Bloques la proporción de tierras, arcillas y limos es bastante baja.

Las principales acumulaciones de este tipo de depósitos más gruesos se han identificado en el extremo norte y noreste, así como en el sector sur del vertedero.

El originario vertedero de RSU's se ha identificado con unos depósitos bastante resistivos y que se distribuyen por el sector norte. El espesor medio oscila entre 5 y 9 m y la superficie ocupada por estos depósitos es de casi 5.000 m<sup>2</sup>.

Para una superficie investigada del vertedero cercana a los 200.000 m<sup>2</sup> se ha estimado un volumen total de materiales de relleno cercano a los 470.000 m<sup>3</sup>.

Se han identificado antiguas vaguadas debidas a la antigua acción fluvial y son los "colectores" del agua que discurre bajo los depósitos del vertedero. Se han definido las trayectorias de dos vaguadas principales, de dirección aproximada Este-Oeste, que parecen confluir en una común.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Aracil, E., Maruri, U., Porres, J.A., Espinosa, A.B. (2002) "La tomografía eléctrica: una herramienta al servicio de la piedra natural" Rock Maquina 76. 30-34.

Aracil, E., Maruri, U., Vallés, J., Martínez Pagán, J., Porres, J.A. (2003) "Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica" *Ingeopres* 122. 34-39.

Battayneh, A.T., Al-Biabat, A.A. (2002) "Application of a two-dimensional electrical tomography technique for investigating landslides along the Amman-Dead Sea highway, Jordan". *Environmental Geology*, 5 March 2002.

Beresnev, I.A., Hruby, C., Davis, C. (2002) "Exploration Geophysics". *Journal of Applied Geophysics*, 49. 245-254.

Caputo, R., Piscitelli, S., Oliveto, A., Rizzo, E., Lapenna, V. (2003) "The use of electrical resistivity tomographies in active tectonics: examples from the Tyrnavos Basin, Greece" *Journal of Geodynamics* 37. 19-35.

De la Vega, M., Osella, A., Lascano, E. (2003) "Joint inversión of Wenner and dipole-dipole data to study a gasolina-contaminated soil" *Journal of Applied Geophysics* 54. 97-109.

Demanet, D., Pirard, E., Renardy, F., Jongmans, D. (2001) "Application and processing of geophysical images for mapping faults" *Computers & Geosciences* 27. 1031-1037.

Gallipoli, M.R., Lapenna, V., Lorenzo, P., Mucciarelli, M., Perrone, A., Piscitelli, S., Sdao, F. (2000) "Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy". *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4. 117-128.

Griffiths D.H., Turnbull J., Olayinka A.I. (1990) "Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array". *First Break* 8, 121-129.

Loke, M.H. (1994) "The inversion of two-dimensional resistivity data". Unpubl. PhD thesis, Un. Of Birmingham.

Porres, J.A. (2003) "Caracterización de cavidades en el subsuelo mediante la interpretación de perfiles de Tomografía Eléctrica". Tesis Doctoral. Biblioteca central de la Universidad de Burgos, Burgos.