

Técnicas geoelectricas para la detección y monitorización de filtraciones en embalses

En este artículo se describe brevemente una serie de técnicas geoelectricas que han resultado positivas en la detección de filtraciones o fugas de agua a través del revestimiento de embalses, pantanos u otro tipo de estructuras hidráulicas de almacenamiento, con el fin de darlas a conocer entre el colectivo de profesionales que, de alguna forma, estén implicados con las obras hidráulicas (Administración, gestores, ingenieros, constructores, etc.). La información que proporcionan estas técnicas es muy adecuada tanto para conocer el estado del revestimiento frente a posibles roturas, cortes accidentales o perforaciones, como para determinar a tiempo la ubicación de una fuga y poder llevar a cabo la actuación correspondiente mitigando de esta manera el peligro que podría correr la integridad de la estructura hidráulica y evitando la pérdida del agua y sus graves efectos en el entorno.

El objetivo del revestimiento artificial en embalses de agua es asegurar la estanqueidad de los mismos, de ahí que la detección precoz de posibles filtraciones en este tipo de estructuras hidráulicas de almacenamiento de agua, construidas con materiales sueltos y que emplean como geomembrana impermeabilizante material plástico (polietileno de alta densidad o bien cloruro de polivinilo (PVC)), ha ganado interés en los últimos años. Este hecho, esta motivado, por un lado, por el desarrollo tecnológico de las técnicas geofísicas y las técnicas de

interpretación que las ha hecho más precisas y adecuadas a este tipo de investigaciones, y por otro lado, por la necesidad de controlar las características de estanqueidad de este tipo de estructuras hidráulicas, ya desde las primeras fases de su construcción (Reynolds, 1997), puesto que, como ha demostrado siempre la experiencia, el bajo coste de la imprevisión a largo plazo supera siempre el coste que pueda suponer este tipo de estudios preventivos, que por otra parte, se amortizan rápidamente por la información que proporcionan.



[Foto 1] Rotura de un gran embalse para agua de riego (Fotos cortesía de Vicente Vicens).

Palabra clave: EMBALSE, FILTRACIÓN, GEOFÍSICA, LIXIVIADOS, VERTEDERO.

Pedro MARTÍNEZ PAGÁN,
Ingeniero de Minas. Universidad Politécnica de Cartagena.

Enrique ARACIL ÁVILA,
Dr. Ciencias Geológicas. Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L.

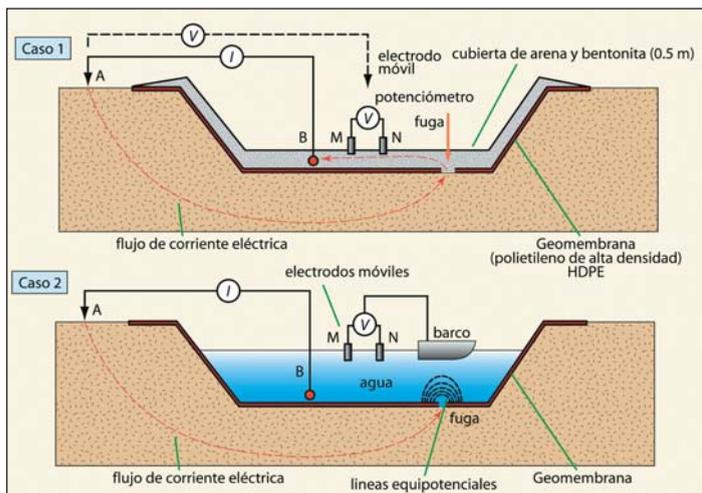
Ángel FAZ CANO,
Dr. Ciencias Biológicas. Universidad Politécnica de Cartagena.

Esta monitorización periódica de la característica de impermeabilidad del revestimiento puede ayudar a detectar esas fugas de forma fiable con la antelación suficiente para que esa posible perforación detectada en la geomembrana pueda ser reparada adecuadamente y no llegue a convertirse en un factor desencadenante de la rotura del embalse (por ejemplo a través de fenómenos de *piping*) y que conlleve a la pérdida irremediable del agua embalsada. Rotura, que por otro lado, si se produce de forma violenta, puede llegar a producir graves daños en sus inmediaciones tanto para el medio como para estructuras civiles o a la población [Foto 1].

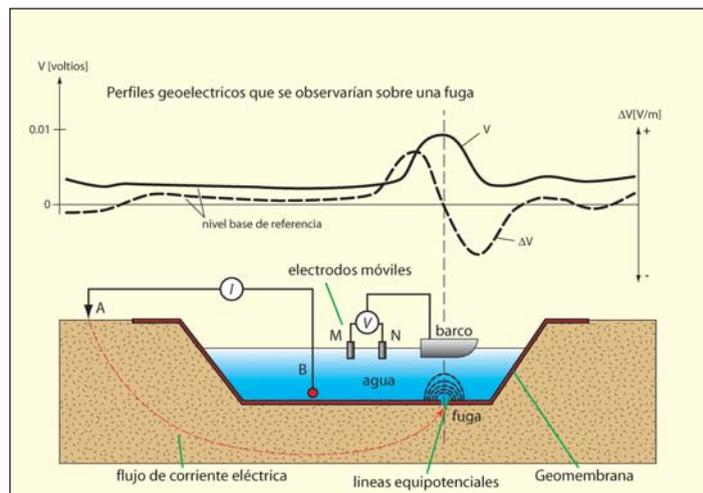
Varios métodos geofísicos han sido desarrollados para intentar localizar de forma fiable las posibles perforaciones producidas en los revestimientos, de modo que puedan ser reparados los daños o se adopten las medidas oportunas para mitigar sus efectos. Aunque este artículo trata sobre las técnicas geoelectricas aplicadas a embalses de agua, sin embargo su aplicación a otros escenarios semejantes es perfectamente factible, por ejemplo la monitorización de fugas de lixiviados en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos (Meju, 2000) o el seguimiento de los lixiviados ácidos en balsas mineras de lodos (Campbell y Fitterman, 2000) o de purines (Aracil et al., 2004).

Principio del método

Las técnicas geofísicas que aquí se describen son técnicas geoelectricas que caracteri-



[Figura 1] Tipos de dispositivos electrónicos empleados en embalses y vertederos.



[Figura 2] Perfil típico de una anomalía geoelectrica sobre una fuga.

zan eléctricamente el fondo del embalse a través de la distribución del potencial eléctrico, V , cuya expresión simplificada viene dada por:

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi r} \quad (V)$$

Ecuación 1

Siendo ésta la expresión que da el valor del potencial, V , en un punto cualquiera de un semi-espacio homogéneo e isótropo de resistividad, ρ , situado a una distancia r de una electrodo de corriente que introduce en el terreno una corriente I (Ward, 1990). En un medio ideal, como el descrito, se generarán superficies equipotenciales semi-esféricas al electrodo de corriente, siendo perpendiculares a las líneas de corriente. Esta variable es la preferida en este tipo de aplicaciones (Frangos, 1994).

Aunque hay otras ocasiones en las que el parámetro obtenido podrá ser la diferencia de potencial o el gradiente del potencial, ΔV , cuyo valor decrece exponencialmente conforme nos alejamos del electrodo de corriente, siendo su expresión, también para un medio homogéneo e isótropo, la siguiente:

$$\Delta V = -\frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r^2} \quad (V/m)$$

Ecuación 2

La unidad del potencial es el voltio, V , o milivoltio, mV , según la escala de medida empleada, aunque a veces para homogeneizar valores interesa referirlo a un amperio de corriente, es decir mV/A . La unidad empleada para la diferencia de potencial es el voltio por metro, V/m .

El principio que hay detrás de todos estos métodos se basa en que las geomembranas que se emplean para impermeabilización artificial de embalses o vertederos suelen ser o bien de polietileno de

alta densidad, que posee una resistividad de 10^{11} Ohm·m, o bien de cloruro de polivinilo (PVC), con una resistividad algo menor, pero que en definitiva actúan como barreras eléctricamente resistivas, suponiendo que no hay perforaciones en ellas.

Metodología

La corriente eléctrica se hace pasar entre dos electrodos de corriente, uno de los cuales está situado fuera de la geomembrana, electrodo A, pero en contacto con el terreno próximo a la estructura de almacenamiento, y el otro, electrodo B, se sitúa en el interior del embalse de agua; en el caso de vertederos se situará dentro de los residuos o dentro de una capa de arena humedecida que se dispone inmediatamente sobre la geomembrana [Figura 1]. Para la detección de anomalías de potencial eléctrico se pueden adoptar dos sistemas de medida: uno que emplea una pareja móvil de electrodos de potencial, denominados M y N, unidos a un potenciómetro y que nos dará diferencias de potencial, V/m , y el otro sistema que emplea un único electrodo móvil de potencial, situando el segundo electrodo de potencial de forma fija en el exterior, simulando

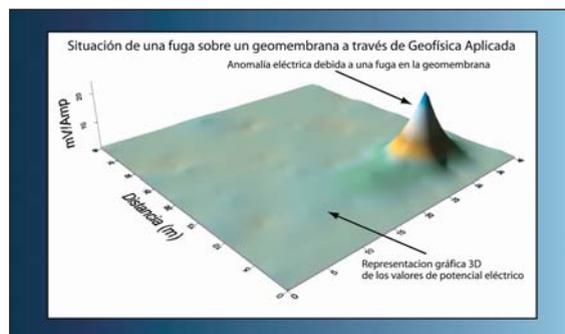
que está en el infinito ($V_{\infty} = 0$), con lo cual se estarán obteniendo medidas de potencial V en el electrodo móvil de potencial.

En la [Figura 1] se representan, de forma esquemática, los diferentes dispositivos implantados para el caso de un vertedero (Caso 1) y para el caso de un embalse de agua (Caso 2). En ambos casos se puede emplear cualquiera de los dos sistemas descrito anteriormente: pareja móvil de electrodos de potencial o un único electrodo móvil de potencial.

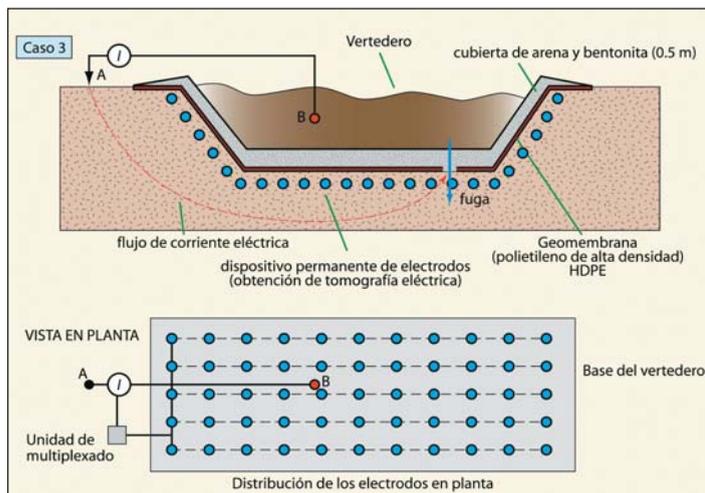
Las anomalías eléctricas debidas a la presencia de fugas en la geomembrana se van a producir al permitirle a la corriente eléctrica penetrar a través de ella. En la [Figura 2] se representa un perfil típico ideal que se obtendría de medir el potencial, V , o la diferencia de potencial, ΔV , sobre un embalse de agua el cual presenta una fuga. Se observa que sobre la posición de dicha fuga, el valor del potencial presenta un máximo o bien, un valor del gradiente igual a cero flanqueado por un máximo y un mínimo (Mazàc et al., 1990).

La [Figura 3] representa cómo sería una distribución espacial 3D de los valores de potencial medidos sobre una región donde se ha supuesto la presencia de un punto de filtración que viene reflejado por un valor del potencial anormalmente elevado.

Para obtener una buena resolución, con el fin de poder detectar pequeñas fugas cuya pérdida de agua todavía es poco significativa, es importante seleccionar una adecuada malla de estaciones de medida. Se han llevado investigaciones con dispositivos fijos en los que la separación electródica era de 1 metro y han sido localizados con éxito, a través de estas técnicas geofísicas, cortes en geomembranas de tamaño tan pequeño como 1 mm y a profundidades de 0,5 m por debajo de la capa de arena (Reynolds, 1997; Frangos, 1994). También es importante conocer el ruido que acompaña a cualquier medida geofísica y que es



[Figura 3] Simulación gráfica 3D de una anomalía geoelectrica ideal relativa a una fuga en el revestimiento.



[Figura 4]
Dispositivo geoelectrico de seguimiento permanente para la detección de fugas en vertederos.

debido a diferentes fenómenos (polarización inducida, potenciales espontáneos, etc.). Por ello, es importante obtener medidas geoelectricas del subsuelo durante las primeras fases de construcción del depósito con el fin de compararlas con las medidas que posteriormente se obtendrán y de esta forma disponer de un nivel base de referencia. De esta forma cualquier dispersión importante que se produzca respecto a este nivel base será objeto de un estudio más detallado.

Actualmente también se están construyendo modernos vertederos y embalses a los que se le han equipado sistemas permanentes de detección de fugas post-construcción. El primer vertedero construido con sistema permanente de detección de fugas en Reino Unido fue en el año 1995 (Reynolds, 1997). Para ello se instala de forma permanente un conjunto de electrodos conectados por medio de cables, dispositivo que se sitúa a 1 metro por debajo de la geomembrana [Figura 4]. Durante el tiempo de ejecución de la estructura de almacenamiento este dispositivo sirve para chequear la integridad del revestimiento y así poder repararlo en el caso de la existencia de desgarros o cortes producidos durante su instalación. Este sistema mide los potenciales eléctricos debajo del revestimiento en lugar de medirlos por encima del mismo como ocurre en los dispositivos que se emplean sobre embalses ya construidos [Figura 1]. Estos sistemas permanentes multi-electrónicos también permiten la obtención de seudosecciones de resistividad 2D/3D similares a las que se obtienen con tomografía eléctrica (Loke, 2000); de hecho emplean los mismos algoritmos de inversión para la interpretación de los datos medidos. El chequeo se realiza tanto durante la construcción del embalse o escombrera como durante el periodo de explotación de los mismos y así poder llevar un seguimiento periódico del estado de la geomembrana.

Los datos medidos son normalizados de manera que se pueden comparar con los datos relativos al nivel base de referencia obtenidos durante la construcción de la estructura de almacenamiento; cualquier desviación de este

nivel de referencia indicará una anomalía geoelectrica posiblemente originada por fugas. Si se produce una filtración en la geomembrana durante el periodo de explotación, ésta puede ser detectada por los sistemas permanentes de monitorización y así adoptar las medidas adecuadas para mitigar la fuga de agua o bien minimizar los efectos contaminantes de una filtración de lixiviados, por ejemplo, a través de la construcción de sondeos dentro de la corriente del lixiviado para su extracción y tratamiento, evitando de esta forma la contaminación de acuíferos, o bien, en el caso de grandes embalses para agua de riego, el envío de algún equipo de buceo para proceder a un correcto sellado del revestimiento (Mazàc et al., 1990).

El volumen de la filtración también puede ser analizado a partir de las variaciones de los parámetros geofísicos (resistividad aparente, potencial natural y temperatura) sólo en el caso de embalses de nueva construcción (Kelly y Mares, 1993).

Conclusiones

Este grupo de técnicas engloba a los métodos geofísicos que se han empleado para detectar y seguir las fugas de fluidos de los embalses y otros sistemas de almacenamiento. El problema puede ser resuelto satisfactoriamente, la mayor parte de las veces, para el caso de embalses, presas y depósitos construidos para la generación de energía hidráulica, el suministro de agua potable, regadíos, etc. Las fugas es un fenómeno frecuente e indeseable que puede poner en riesgo la función e incluso la existencia de estas estructuras hidráulicas y puede impactar gravemente en el entorno. Por lo tanto, dichas estructuras exigen un seguimiento minucioso y, en los casos donde la filtración exceda los límites aceptables, se podrán implantar las apropiadas medidas preventivas. Además de los procedimientos comúnmente empleados, los métodos geofísicos pueden también proporcionar información sobre la localización y la extensión de las fugas.

Los métodos geofísicos empleados para identificar la filtración y su dirección, pueden ser empleados dentro de los sistemas de almacenamiento hidráulico (incluyendo los frentes y las inmediaciones de una presa o embalse). Los métodos, el tipo de medición y la densidad de la malla de medidas (red regular, radial o perfiles de contorno) van a depender del carácter supuesto de la filtración.

Para seguimientos continuos del embalse frente a filtraciones (*continuous monitoring*), se puede instalar actualmente un sistema multi-electrónico, localizado debajo del elemento de sellado, dentro de una fina capa de arena, junto con los cables de conexión necesarios, el sistema de detección y el sistema de medida y registro al cual se conectará el ordenador portátil para el volcado y procesamiento de los datos medidos. Ensayos sobre revestimientos de PVC, colocados en embalses de agua, los cuales han sido perforados intencionadamente, han demostrado de forma fiable la localización de las filtraciones.

Bibliografía

- ARACIL, E., PORRES, J.A., FAZ, A., MARTÍNEZ-PAGÁN, P., MARURI, U., VALLÉS, J. 2004. **Balsas mineras abandonadas y balsas de purines: dos problemas medioambientales abordables mediante tomografía eléctrica.** Semana de la Ciencia. Burgos (póster no publicado).
- CAMPBELL, D.L., FITTERMAN, D.V. 2000. **Geoelectrical methods for investigating mine dumps.** Proceedings from the fifth international conference on acid rock drainage (ICARD).
- FRANGOS, W. 1994. **Electrical detection and monitoring of leaks in lined waste disposal ponds.** SAGEEP.
- KELLY, W.E., MARES, S. 1993. **Applied geophysics in hydrogeological and engineering practice.** Elsevier.
- LOKE, M. H. 2000. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.** A practical guide to 2-D and 3-D surveys. University of Birmingham.
- MAZÀC, O., BENES, L., LANDA, I. and SKUTHAN, B. 1990. **Geoelectrical detection of sealing foil quality in light-ash dumps.** Investigations in geophysics n° 5. SEG.
- MEJU, M. A. 2000. **Geoelectrical investigation on old/abandoned, covered landfill sites in urban areas.** Journal of Applied Geophysics (44), pp. 115-150.
- REYNOLDS, J.M. 1997. **An introduction to applied and environmental geophysics.** Wiley.
- WARD, S.H. 1990. **Geotechnical and environmental geophysics.** SEG.