

# Delimitación de las zonas de flujo de agua con el método del potencial espontáneo en el espaldón aguas arriba de una presa

ALEXANDER ROZYCKI (\*), JOSÉ M<sup>º</sup> RUIZ-FONTICIELLA (\*\*) y ANTONIO J. DE LA CUADRA (\*\*\*)

**RESUMEN** La circulación de agua puede transportar cargas eléctricas que, a su vez, generan un campo eléctrico. En el caso de tubificación o sifonamiento, el agua infiltrada crea una diferencia de potencial eléctrico detectable con un sistema de medida adecuado. El método del potencial espontáneo (PE) se emplea, habitualmente, en los estudios geofísicos de presas. Una distribución anómala puede indicar una filtración anormal y la interpretación cuantitativa del campo eléctrico puede servir para estudiar el desarrollo de las filtraciones. En el texto se dan varios ejemplos de medidas de PE en presas españolas de diversa tipología. El método de PE es un método rápido, relativamente barato y útil en la inspección de presas.

## DELIMITATION OF WATER FLOW PATHS USING THE SELF POTENTIAL METHOD ON UPSTREAM FACE OF DEEM

**ABSTRACT** *Flowing water can transport electrical charges that in appropriate conditions can create an electrical field. In cases of piping and suffusion, inflowing water can generate a differential voltage drop that can be detected by an adequate measurement system. The self-potential method, that records this kind of electrical fields, is commonly employed in the geophysical assessment of dams. An anomalous pattern indicates excessive seepage and the anomalous field can be quantitatively interpreted to assess the development of the seepage process. Examples of self-potential measurements carried out on earth and gravity dams in Spain are presented in the text. Underwater self-potential measurements are quick and relatively inexpensive. The self-potential method can be considered as a useful tool in the technical inspection of dams.*

**Palabras clave:** Presas, Filtraciones, Potencial Espontáneo, Método Geofísico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las filtraciones de agua en presas es un proceso previsto e inherente. Sin embargo, a veces y de manera arbitraria aparece un flujo de agua que puede amenazar la integridad del cuerpo de la presa. Para la detección de estos flujos anómalos se pueden emplear diferentes métodos geofísicos. Uno de los más empleados son la medida de la resistividad en corriente continua debido a su sensibilidad con el contenido de agua.

La adquisición de los datos de resistividad en corriente continua se realiza a través de un dispositivo de cuatro electrodos (picas de acero) que se desplaza a lo largo del área de estudio. La corriente eléctrica se inyecta a través de dos de los electrodos, midiéndose en los otros dos la diferencia de potencial generada. Todos los dispositivos eléctricos tienen una profundidad de penetración que depende principalmente de la separación entre los electrodos. Des-

plazando este dispositivo por la zona de estudio se obtiene un perfil de resistividades a una profundidad determinada. Normalmente se utilizan diferentes separaciones entre electrodos para estudiar la zona investigada a varias profundidades. Sin embargo, la longitud disponible en la práctica para la disposición de electrodos puede estar limitada, lo que se traduce en una reducción del nivel de la máxima penetración en el perfil estudiado. Si se utilizara toda la extensión posible, la zona estudiada tendrá forma triangular finalizando el último nivel en un solo punto.

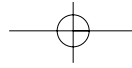
Por esta razón, se limita el número de electrodos involucrados en las mediciones del nivel de la máxima penetración para que su extensión tenga una longitud en concordancia con la finalidad del estudio. No existe ningún criterio establecido para fijarla, aunque podría escogerse arbitrariamente una fracción del 75% respecto a la extensión en superficie. Dicha fracción se representa en la Figura 1.

El criterio de 0,75L puede considerarse como un compromiso límite entre la máxima profundidad de penetración y la longitud disponible en superficie. La reducción de la zona explorada depende ligeramente del tipo de dispositivo empleado y el ángulo a representado en la Figura 1.

(\*) Dr. Ing. ETSIM – Universidad Politécnica de Madrid.

(\*\*) Dr. Ing. Laboratorio de Geotecnia (CEDEX).

(\*\*\*) Lic. Físicas. Laboratorio de Geotecnia (CEDEX).



DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE FLUJO DE AGUA CON EL MÉTODO DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO EN EL ESPALDÓN AGUAS ARRIBA DE UNA PRESA

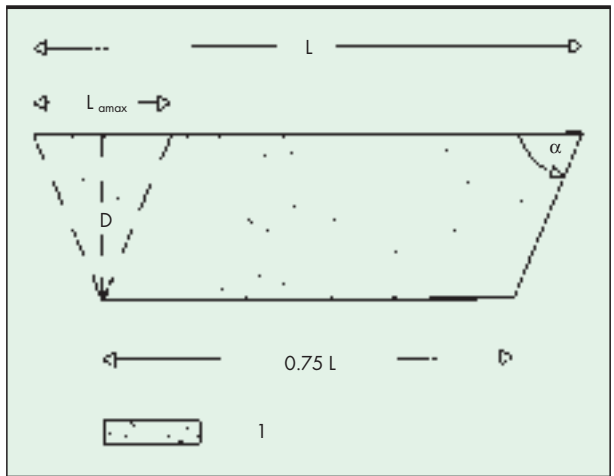


FIGURA 1. Sección estudiada (1) para una longitud disponible máxima en superficie - L, extensión máxima del dispositivo empleado -  $L_{max}$ , profundidad de penetración máxima - D para dicha extensión máxima del dispositivo empleado, ángulo característico del dispositivo empleado -  $\alpha$ .

tud es directamente proporcional a la intensidad del flujo. Si bien lo habitual es realizar este tipo de medidas en superficie, también se pueden registrar bajo el nivel de agua (Ogilvy et al., 1969).

Corwin (1976) describió las anomalías subacuáticas de PE debidas a los depósitos de minerales conductivos situados en aguas someras. Jansen (1995) describe la correlación entre las anomalías negativas registradas de PE bajo el agua y los posibles caminos de la filtración. Con un sistema de adquisición adecuado se pueden registrar las medidas de PE en el espaldón aguas arriba de una presa bajo el nivel de agua del embalse. Estas medidas bajo el agua son relativamente rápidas ya que se pueden registrar fácilmente unos 3.000 m de perfiles al día. Para registrarlos se emplean dispositivos de un solo electrodo o de dos electrodos con separación fija (dispositivo de gradiente). Ambos se sitúan en el fondo en contacto con el espaldón de la presa o flotando en la superficie del agua. Con un dispositivo de un electrodo en el fondo de un embalse se consigue una mejor sensibilidad, destacando mejor la forma de la anomalía de PE. Esta última característica es importante si el registro de campo de PE se debe a varias fuentes aisladas próximas entre sí. Durante las medidas de PE debería utilizarse un dispositivo fijo formado por un dipolo para monitorizar las corrientes telúricas o el ruido eléctrico industrial. Estos fenómenos se pueden confundir como anomalías de PE y este dispositivo ayuda a eliminar dicha incertidumbre.

La Figura 2 muestra una clasificación de las presas españolas de materiales sueltos relacionando las condiciones antes mencionada.

La línea del gráfico indica la máxima profundidad que se puede alcanzar con un dispositivo dipolo-dipolo para la longitud de coronación disponible.

Según se observa en la figura, existe un elevado número de presas que no se puede explorar totalmente con los métodos resistivos en corriente continua. Sin embargo, se puede encontrar una solución a este problema utilizando el método del potencial espontáneo (PE).

El potencial espontáneo se puede generar por diferentes procesos físicos y químicos. Uno de estos consiste en el transporte de carga eléctrica por un flujo de agua; como consecuencia se puede medir un potencial eléctrico cuya magni-

2. EJEMPLOS DE APLICACION DE MEDIDAS BAJO EL AGUA DE PE

Por lo general, los datos obtenidos de PE no se pueden interpretar directamente. Normalmente los datos son preprocesados para obtener dos componentes: una, que representa la naturaleza regional y, otra, las fluctuaciones locales (campo residual). Cuando el proceso de filtración en el cuerpo de presa no muestra ningún patrón anómalo, el campo residual debería reflejar la forma de dicho cuerpo y su magnitud debería ser de unas decenas de milivoltios.

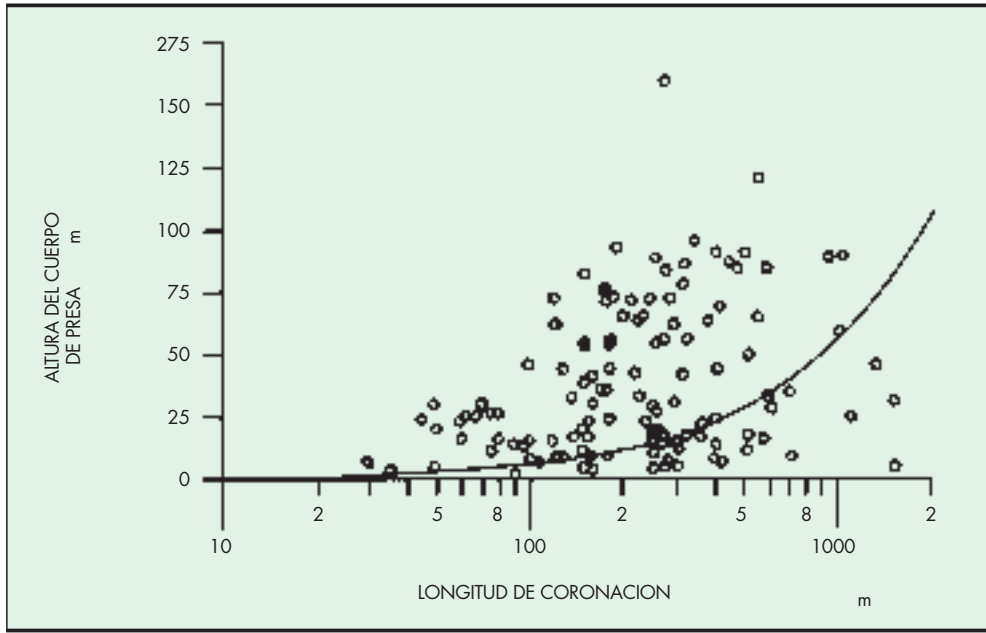
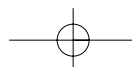
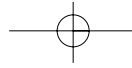


FIGURA 2. Relación entre las alturas y las longitudes de coronación de las presas españolas de materiales sueltos.





DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE FLUJO DE AGUA CON EL MÉTODO DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO EN EL ESPALDÓN AGUAS ARRIBA DE UNA PRESA

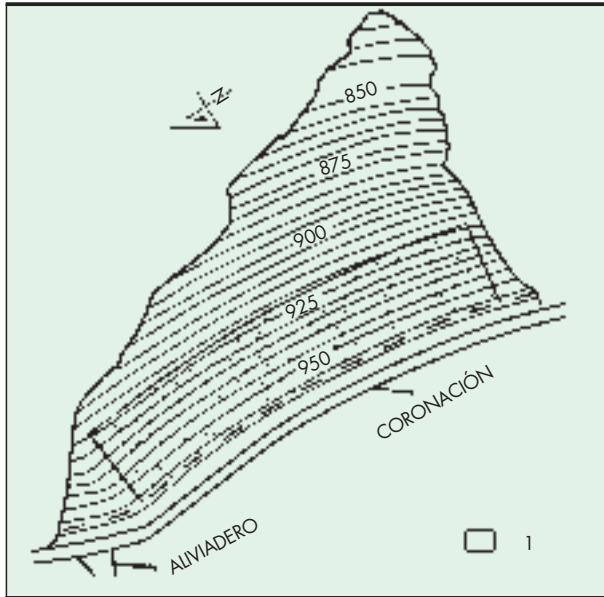


FIGURA 3. Planta del espaldón agua arriba de la presa GRC (España). Zona estudiada - 1.

2.1. EJEMPLO 1 (PRESA GRC)

GRC es una presa de escollera y núcleo de arcilla de considerable altura construida en España. En la Figura 3 se muestra la planta indicando la zona estudiada utilizando PE, mientras que en la Figura 4 se representa la distribución del campo residual.

La curvatura de las líneas equipotenciales reproducen la forma del espaldón. La anomalía que se observa en la esquina inferior derecha de la figura se debe a una pequeña entrada de agua dulce a través del terreno vecino escarpado en el que se apoya el estribo izquierdo. El cambio de signo en los valores de PE confirman este fenómeno.

2.2. EJEMPLO 2 (PRESA CBH)

Un ejemplo de anomalía obtenida en una breve campaña de PE bajo el agua se realizó en la presa CBH (España), una presa de todo-uno de pequeña altura situada en el sur de España.

La sección y la planta de la presa se muestran en la Figura 5.

El campo de anomalías residuales del PE se representa en la Figura 6.

El rango de valores del PE varía entre 0 a -600 mV; esto indica una filtración elevada de agua en el cuerpo de la

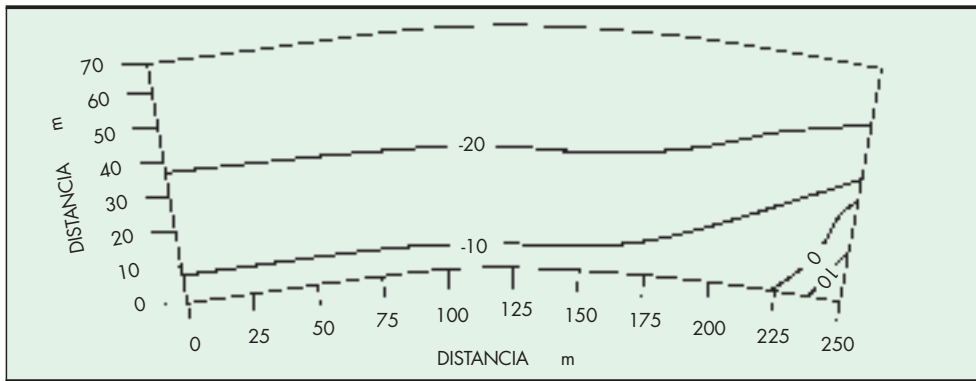


FIGURA 4. Campo residual del PE en la presa GRC (España). Las líneas equipotenciales se expresan en mV.

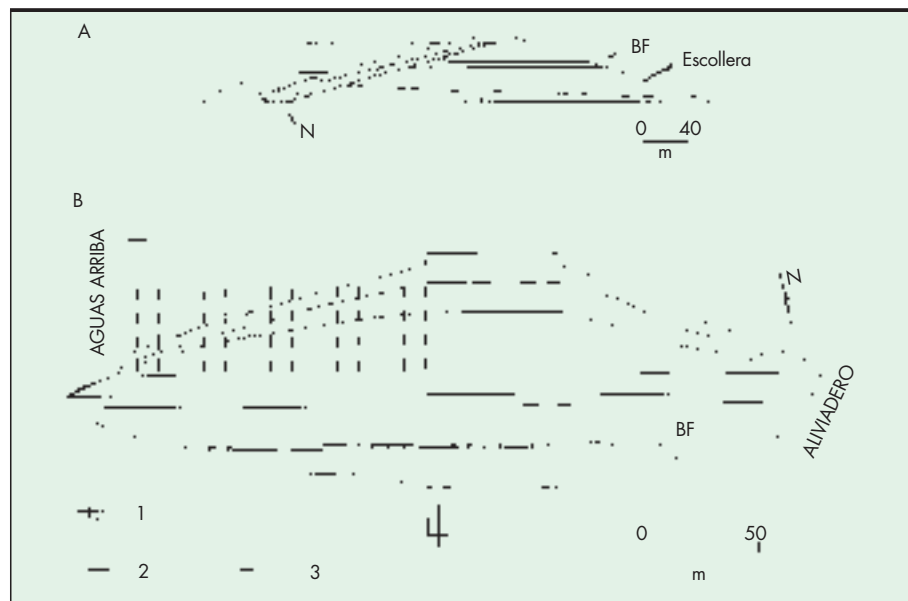
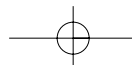
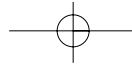


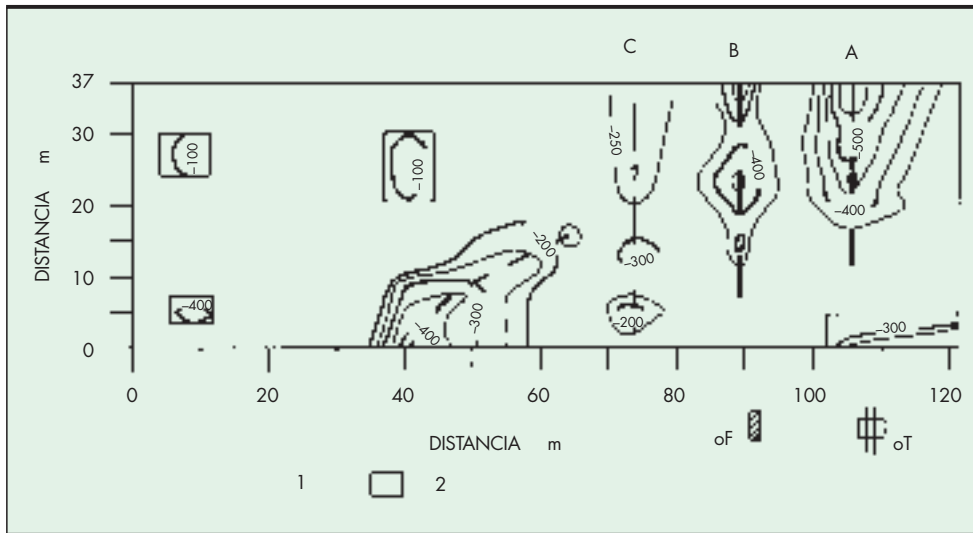
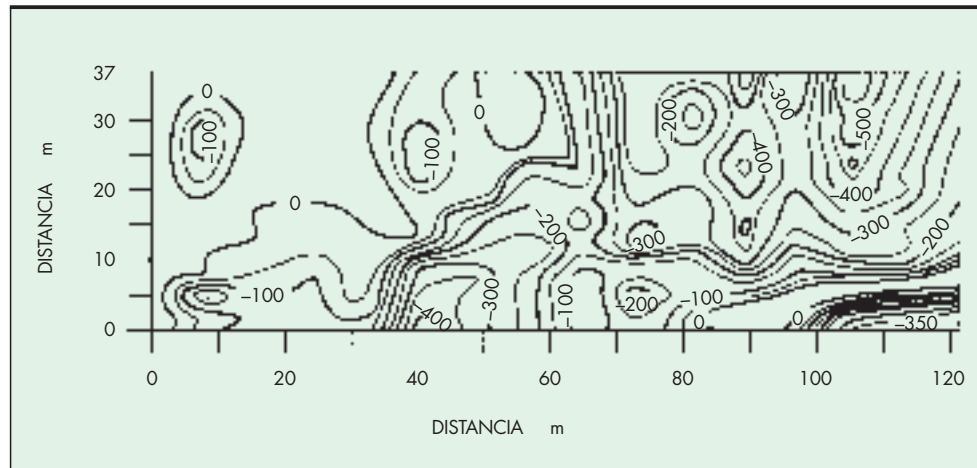
FIGURA 5. Sección (A) y planta (B) de la presa CBH (España). Boca de salida (1). Perfiles de PE bajo el agua (2). Nivel de agua del embalse (-). Núcleo de arcilla (N). Filtro de drenaje (BF).





DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE FLUJO DE AGUA CON EL MÉTODO DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO EN EL ESPALDÓN AGUAS ARRIBA DE UNA PRESA

**FIGURA 6.** Anomalías del campo residual de PE en la presa de CBH (España). Los valores de las líneas equipotenciales se expresan en mV.



**FIGURA 7.** Anomalías seleccionadas del campo residual del PE. Las líneas equipotenciales se expresan en mV. Líneas de flujo preferentes (1). Sumideros verticales (2). Posición del desagüe (oT). Posición del filtro de drenaje (oF).

presa. Las isolíneas del campo residual de PE muestran una distribución distorsionada que comienza a los 35 m desde el origen de coronación y continúa hasta el límite de las medidas.

Precisamente en este punto comienza el filtro horizontal de drenaje, situado a media altura del cuerpo de la presa, y que cubre hasta el final de los datos registrados. Para simplificar esta distribución del campo residual del PE, se pueden extraer las anomalías de mayor amplitud obteniéndose la imagen de la Figura 7.

Se pueden distinguir tres alineamientos de anomalías del PE situados en la parte derecha de la Figura 7. La mayor (A) corresponde al conducto de desagüe de la presa. La agrupación B se debe al filtro de drenaje situado en el espaldón aguas abajo de la presa que recoge el agua desde el espaldón agua arriba y, finalmente, el grupo C que es una zona de flujo preferente en desarrollo.

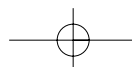
Una gran zona anómala más cercana a la coronación se puede interpretar también como un flujo preferente. Varias anomalías separadas y distribuidas en el resto de la zona estudiada se interpretan como sumideros verticales.

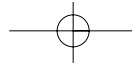
Para realizar una interpretación cuantitativa, se seleccionaron los datos que forman un perfil paralelo a la corona-

ción y situado a 25 m del nivel de agua del vaso (P25). Dichos datos se representan en forma de círculos en la Figura 8, mostrando la línea continua la respuesta de un modelo compuesto por cuatro cuerpos.

La interpretación cuantitativa del perfil P25 se llevó a cabo mediante una inversión no lineal de un modelo inicial compuesto por una esfera y tres cilindros. Durante el proceso de inversión no lineal, los parámetros iniciales del modelo (profundidad, posición horizontal,...) se modificaron en función de un error previamente fijado (Marquant, 1963). La inversión genera un nuevo modelo que devuelve los parámetros que más se acercan a los datos medidos. El modelo de partida está compuesto de uno o más cuerpos geométricos simples cuyas expresiones analíticas se usan en la modelización directa. La selección de tales cuerpos se basa en la información *a priori*, la física del problema y la experiencia del interpretador.

Los números dentro de los círculos de la Figura 8 muestran la profundidad en metros de los cuerpos interpretados situándose gráficamente en sus respectivas posiciones horizontales. La profundidad del conducto de desagüe se puede tomar del diseño de la presa y su valor coincide con el interpretado.





DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE FLUJO DE AGUA CON EL MÉTODO DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO EN EL ESPALDÓN AGUAS ARRIBA DE UNA PRESA

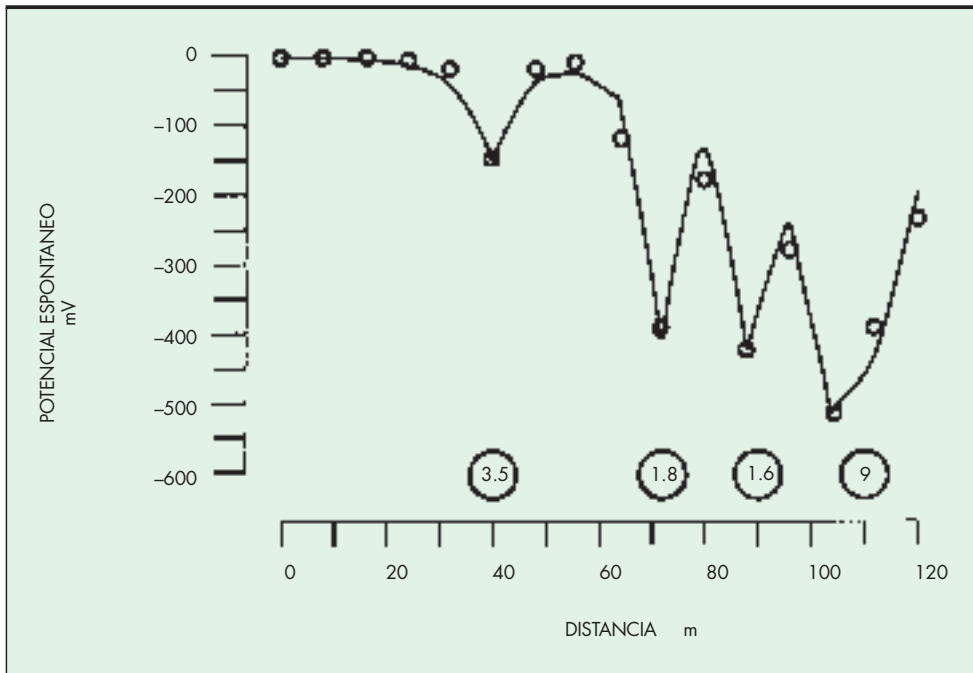


FIGURA 8. Interpretación cuantitativa del perfil P25. Los números dentro de los círculos grandes indican la profundidad interpretada en metros para cada cuerpo.

2.3. EJEMPLO 3 (PRESA PDC)

PDC es una presa de gravedad (hormigón compactado) de 52 m de altura localizada también en el sur de España.

El hormigón deteriorado puede permitir filtraciones de agua y dicho fenómeno se puede detectar mediante medidas de PE. Los datos registrados del PE en el espaldón aguas arriba de esta presa de gravedad se muestran en la Figura 9.

La presa tiene un sistema de drenaje vertical compuesto por perforaciones separadas a 4 m del espaldón agua arriba (Figura 10).

El núcleo de la presa está construido en hormigón compactado y protegido por hormigón convencional. La presa tiene cuatro juntas de dilatación y, cada 20 metros, una junta de encofrado. El agua de infiltración se recoge mediante la red de drenaje y se conduce a la galería de

fondo desde la cual se bombea al exterior. El volumen medido fue de 81 l/s con el nivel de agua que se muestra en la Figura 10. Los datos registrados del PE muestran el proceso de filtración. Las áreas sombreadas de la Figura 9 muestran las zonas donde la filtración de agua es más intensa.

El gradiente horizontal se puede calcular a partir de los datos residuales de PE. El resultado de los datos procesados se representa en la Figura 11 en forma de perfil, debido a la estructura vertical del campo residual del PE. Para calcular este perfil se tomó un promedio de cada perfil vertical.

La curva de gradiente horizontal muestra varios picos máximos y mínimos bien diferenciados. Sus posiciones corresponden a algunas de las juntas de dilatación (J) y encofrado (L) que engloban las zonas que se pueden considerar como más degradadas.

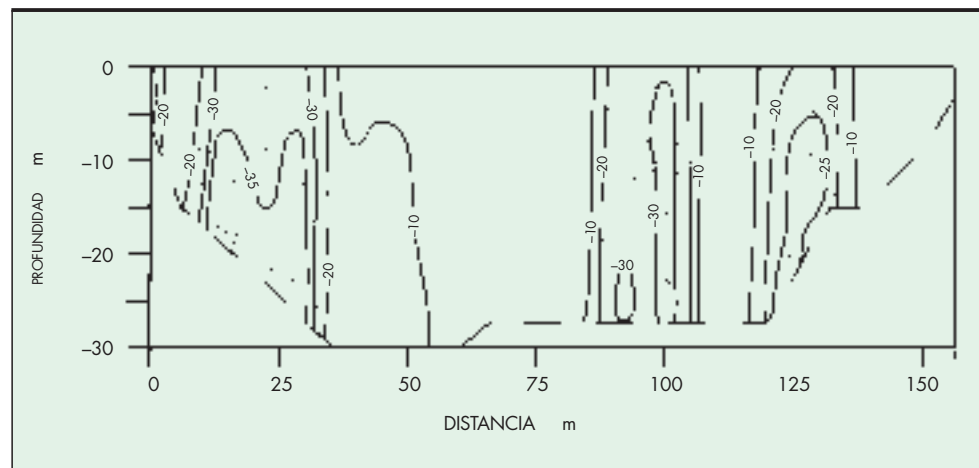
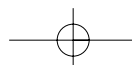
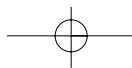


FIGURA 9. Datos registrados del PE en el espaldón aguas arriba de la presa PDC (España). Las curvas equipotenciales se expresan en mV. La línea discontinua marca el contacto entre el terreno y el espaldón aguas arriba de la presa.





DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE FLUJO DE AGUA CON EL MÉTODO DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO EN EL ESPALDÓN AGUAS ARRIBA DE UNA PRESA

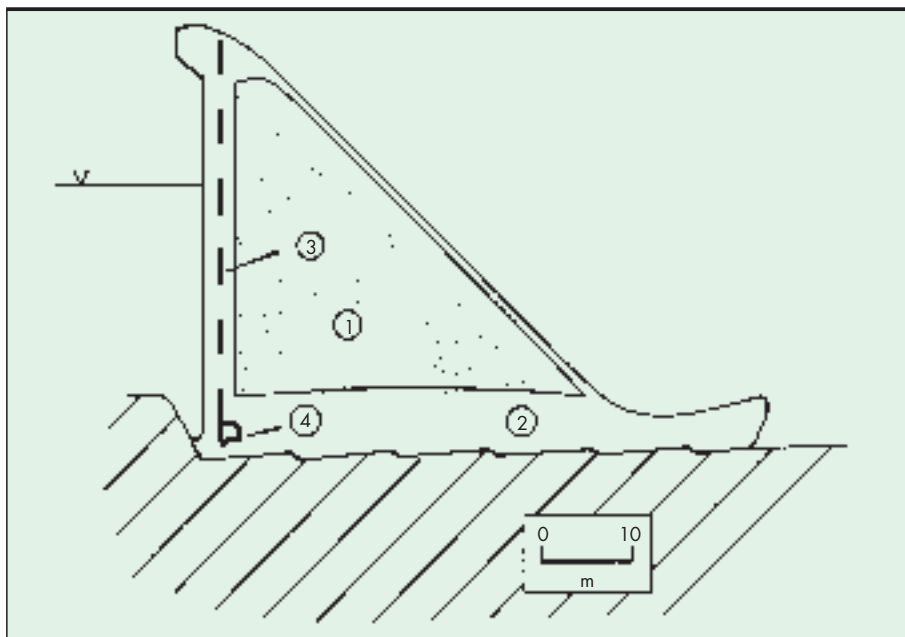


FIGURA 10. Sección de la presa de PDC (España). Hormigón compactado (1). Hormigón convencional (2). Sistema de drenaje (3). Galería (4).

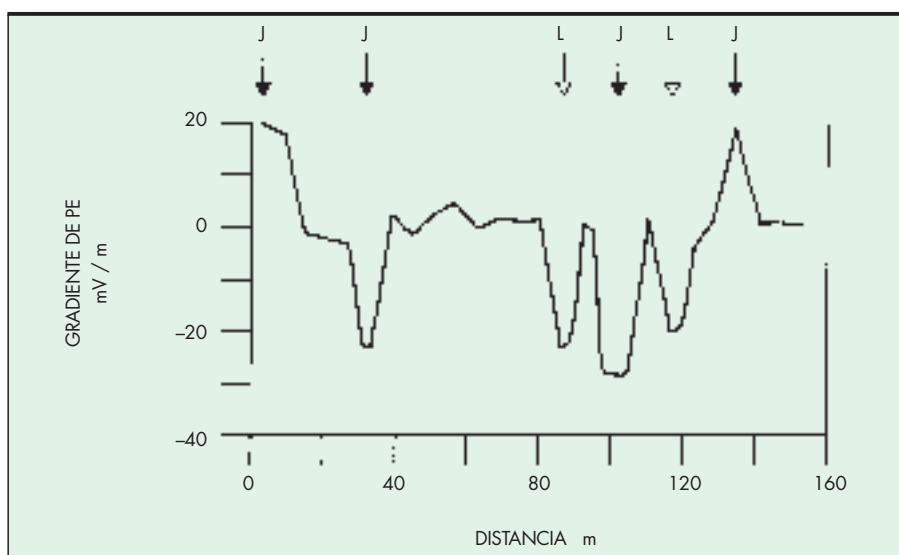


FIGURA 11. Gradiente horizontal del campo residual de PE. Junta de dilatación (J). Junta de encofrado (L).

### 3. CONCLUSIONES

- Las medidas de PE aplicadas en los espaldones aguas arriba de varias presas son una técnica útil para detectar zonas de anomalías en las distribuciones del campo residual del PE que se pueden interpretar como flujos de agua preferentes en los cuerpos de las presas.
- Es un método rápido y relativamente barato.
- Los sistemas de medida situados en el espaldón aguas arriba y lo más cerca del origen de un proceso de filtración permiten detectarlo en un estado temprano.
- Una ventaja del método del PE respecto a las técnicas de corriente continua es que los datos de PE reflejan el estado dinámico del flujo de agua.
- Se puede recomendar una aplicación combinada de ambos métodos como herramientas útiles en las prospecciones de presas.

### 4. REFERENCIAS

- [1] CORWIN, R.F., (1976), "Offshore use of the self-potential method". Geophysical Prospecting, 2, 79-90.
- [2] JANSEN, J.; BILLINGTON, N.; SNIDER, F. and JURCEK, P. (1995), "Marine SP surveys for dam seepage investigations: Evaluation of array geometries through modelling and field trials", Proc. of the SAEPP 1995, 27-31, Boston, USA.
- [3] MARQUARDT, D.W., (1963), "An algorithm for last-squares estimation of non-linear parameters", Journal of the Society of the Industrial Applied Mathematics, 11, 2, 431-441.
- [4] OGILVY, A.A.; AYED, M.A. and BOGOSLAVSKY, V.A., (1969), "Geophysical studies of water leakage from reservoirs", Geophysical Prospecting, 17, 36-62.

