

# Cálculo de la conductividad hidráulica de los acuíferos a partir de la resistividad eléctrica

Eugenio Vidal Méndez<sup>1</sup> [eugeniov@dprhgtm.hidro.cu](mailto:eugeniov@dprhgtm.hidro.cu)

## Resumen

El cálculo de la conductividad hidráulica media de los acuíferos es uno de los objetivos de las investigaciones hidrogeológicas. Actualmente, este parámetro se estima a partir de datos de pruebas de bombeo en los pozos, obteniéndose un resultado poco confiable y costoso. El presente trabajo muestra las dependencias funcionales entre las propiedades intrínsecas y filtrantes y la resistividad eléctrica y propone, además, una expresión para calcular la conductividad hidráulica media de los acuíferos a partir de los datos de resistividad eléctrica aportados por los registros de sondeos eléctricos verticales.

## Palabras clave

Conductividad hidráulica, conductividad eléctrica, factor de resistividad, permeabilidad intrínseca, resistividad eléctrica.

## Calculation of the hydraulic conductivity of aquifers using the electric resistivity

### Abstract

The average hydraulic conductivity calculation of aquifers is one of the basic objectives of hydrogeologic researches. Nowadays, this parameter is estimated starting from pumping tests data carried out in wells, obtaining an expensive and not very reliable result. The current work establishes functional dependences among the intrinsic and filtrate properties and the electrical resistivity. Besides, it is proposed an expression to calculate the average hydraulic conductivity of aquifers starting from the data of electrical resistivity, provided by the vertical electrical sounding register.

### Keywords

Hydraulic conductivity, electrical conductivity, formation factor, intrinsic permeability, electrical resistivity

## INTRODUCCIÓN

En toda investigación hidrogeológica es necesario el cálculo de la conductividad hidráulica media que caracteriza el acuífero, la cual es estimada, fundamentalmente, a partir de pruebas de bombeo en los pozos; para cuantificarla se han desarrollado numerosos métodos y procedimientos que toman en cuenta tanto el tipo de acuífero como el régimen de flujo y otras características ya sea del acuífero o de la obra de captación.

Los métodos de bombeo tienen el inconveniente de que sus resultados son sólo representativos del área abarcada por el radio de influencia (efecto local) y por tanto están afectados por la escala de mediciones. En la práctica, para eliminar tal efecto, se recomienda el uso de gran número de pozos y pruebas de bombeo distribuidas convenientemente por el área investigada; que si bien es cierto que minimizan el error de los estimados, no resuelven de manera satisfactoria el problema y encarecen los costos de las investigaciones.

Hasta el presente, los métodos desarrollados para estimar la conductividad hidráulica, u otra propiedad de los acuíferos, a partir de los registros geofísicos de pozos o de sondeos eléctricos verticales (SEV), no son aplicables en todos los casos ni para todas las condiciones, como muestran los trabajos realizados por Niwas y Singhal (1981); Yadav (1995); Hubbard *et al.* (1999); Lima y Niwas (2000) y Chen *et al.* (2001), por citar algunos. Esto se debe, entre otras causas, al hecho de que estos métodos requieren, en todos los casos, de un cierto número de sondeos en el sector estudiado en los cuales se conozcan las características hidráulicas del acuífero para tratar de establecer correlaciones estadísticas.

Por otra parte, la experiencia ha demostrado que las rocas en las zonas de elevada porosidad o fractura, saturadas de agua, presentan valores de resistividad más bajos que en las zonas compactas o no saturadas. De ahí que algunos autores como

Rodríguez (1995) señalen la posibilidad de existencia de relaciones entre la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica, pero sin llegar a establecer teóricamente esas relaciones.

El objetivo de este trabajo es exponer las relaciones funcionales existentes entre la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica de las rocas saturadas, que hacen posible el cálculo de la conductividad hidráulica media de los acuíferos a partir de los datos de resistividad eléctrica aportados por los sondeos eléctricos verticales.

## MÉTODO

Si se considera que la permeabilidad intrínseca es inversamente proporcional al factor de formación del acuífero, entonces se puede determinar la conductividad hidráulica a partir de su resistividad eléctrica media con el menor efecto del factor de escala posible, si el espacio poroso efectivo de la sección transversal del flujo se determina a partir de un cierto espacio elemental representativo. Para demostrarlo, se parte de la conocida expresión (1) de la conductividad hidráulica ( $K$ ) que relaciona esta propiedad con la permeabilidad intrínseca del medio ( $k$ ) y con la viscosidad cinemática del fluido ( $\nu$ ), así como de la ecuación de la permeabilidad intrínseca (2), propuesta por Kozeny (1953), que relaciona este parámetro con propiedades físicas de la roca como son: porosidad ( $\phi$ ), tortuosidad de los conductos porales ( $\tau$ ), superficie específica de los granos ( $S_v$ ) y grado de consolidación ( $\delta$ ), el cual, según Kozeny, es igual a 2 para rocas consolidadas y a 2,5 para no consolidadas.

$$K = k \frac{g}{\nu} \quad (1)$$

$$k = \frac{\phi^3}{\delta \tau^2 S_v^2 (1 - \phi^2)} \quad (2)$$

Kozeny considera la superficie específica de los granos por unidad de volumen ( $S_v$ ), como un espacio singular por el que circula el agua, sin tener en cuenta que el flujo del agua subterránea por los medios porosos sólo es posible a través de un espacio poroso efectivo ( $S_\phi$ ), el cual está relacionado con la superficie específica mediante la expresión:

$$S_v = \frac{\phi}{1-\phi} S_\phi \quad (3)$$

Si se sustituye  $S_v$ , dado en la expresión 3, en la expresión 2, se obtiene:

$$k = \frac{\phi}{\delta \tau^2 S_\phi^2} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que el flujo sólo es posible a través de la porosidad activa ( $\phi_f$ ), para hacer más preciso el cálculo de la permeabilidad intrínseca se sustituye la porosidad total  $\phi$  en la expresión 4 por  $\phi_f$ , obteniéndose:

$$k = \frac{\phi_f}{\delta \tau^2 S_\phi^2} \quad (5)$$

En la práctica resulta extremadamente complejo cuantificar el valor de la tortuosidad de los conductos ( $\tau$ ). Considerando que el factor de formación ( $F$ ) relaciona  $\tau$  con  $\phi_f$  según la expresión 6 (modificada de Rodríguez, 1995):

$$F = \frac{\tau^2}{\phi_f} \quad (6)$$

Sustituyendo en 5 se obtiene:

$$k = \frac{1}{F\delta S_{\phi}^2} \quad (7)$$

Para obtener  $F$  se emplea la expresión 8 (Rodríguez, 1995):

$$F = \frac{R_s}{R_w} \quad (8)$$

donde  $R_s$  es la resistividad eléctrica de la roca saturada y  $R_w$  la resistividad eléctrica específica del agua de saturación.

Para eliminar la influencia del efecto del factor de escala, el espacio poroso de sección de flujo se determina por la expresión:

$$S_{\phi} = \phi_f AER \quad (9)$$

donde AER: Es el Área Elemental Representativa de la sección de flujo.

Para determinar el AER se utiliza la expresión:

$$AER = LER \times H_m \quad (10)$$

donde  $H_m$  es el espesor del acuífero y LER, es la Longitud Elemental Representativa del ancho de la sección transversal del flujo. Se determina mediante el análisis variográfico del comportamiento de la resistividad en el territorio, según la expresión:

$$LER = 2A_{\max}. \quad (11)$$

donde  $A_{\max}$  es el radio de influencia o alcance máximo del valor medio de la resistividad eléctrica en dirección transversal a la dirección en que se determina el flujo. Se puede obtener  $\varphi_f$  de la expresión de Mendoza y Valle (1996):

$$F = 1 + G(\varphi_f^{-1} - 1) \quad (12)$$

donde  $G$  es un parámetro que depende de la estructura interna de las rocas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La ecuación (7) evidencia que la permeabilidad intrínseca, de la cual es función la conductividad hidráulica, es inversamente proporcional al factor de formación de las rocas dentro del espacio poroso efectivo ( $S_\varphi$ ) que permite el flujo, por lo que teniendo en cuenta la relación que establece el factor de formación con la resistividad eléctrica de las rocas saturadas y la del agua (expresión 8), la permeabilidad intrínseca en virtud de (7) también puede ser expresada como:

$$k = \frac{R_w}{R_s \delta S_\varphi^2} \quad (13)$$

Como en un acuífero la resistividad del agua ( $R_w$ ) es relativamente constante, al igual que el grado de consolidación de las rocas ( $\delta$ ), la permeabilidad intrínseca ( $k$ ) será función de la resistividad de la roca saturada ( $R_s$ ) y del espacio poroso efectivo expuesto al flujo ( $S_\varphi$ ). Sustituyendo la expresión (13) en (1) se obtiene la conductividad hidráulica ( $K$ ) en función de  $R_s$  y de  $S_\varphi$ :

$$K = \frac{R_w}{R_s \delta S_\varphi} \frac{g}{\nu} \quad (14)$$

## CONCLUSIONES

La expresión obtenida (ecuación 14) evidencia las relaciones funcionales existentes entre la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica de las rocas saturadas y permite determinar la conductividad hidráulica media de los acuíferos a partir de los datos de resistividad eléctrica aportados por los sondeos eléctricos verticales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHEN, J; S. HUBBARD & Y. RUBIN. 2001. Estimating the hydraulic conductivity at The South Oyster site from geophysical tomography data using Bayesian techniques based on the lineal regression model. *Water Resources Research*, 37 (6) :1603–1613.
- HUBBARD, S; Y. RUBIN & E. MAJER. 1999. Spatial correlation structure estimation using geophysical and hydrogeology data. *Water Resources Research* 35. (6) :1809–1825.
- KOZENY, J. 1953. Das Wasser in Baden. Grundwasserbewegung. In: Hidraulik, Springer-Verlag, Vienna, p. 380-445.
- LIMA, O & S. NIWAS. 2000. Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifer from geoelectrical measurements. *Journal of hydrology* 235 :12–26.
- MENDOZA, R. G. & V. VALLE. 1996. Modelos petrofísicos para la descripción de yacimientos fracturados. Instituto Politécnico Nacional. Unidad Ticomán. Ciencias de la Tierra, México, 370 p.
- NIWAS, S & D.C. SINGHAL. 1981. Estimation of aquifer transmissivity from Dark Zarrowk parameters in porous media. *Journal of hydrolog* 50 :393–399.
- RODRÍGUEZ, C. I. 1995. Resistividad eléctrica específica de las rocas. *Revista Ingeniería de Minas* VIII (7) :25–29.
- YADAV G, S. 1995. Relating hydraulic and geoelectric parameters of the Jayant aquifer, India. *Journal of hydrology* 50 :393–399.