

Validación del uso de la resistividad eléctrica en el cálculo de la conductividad hidráulica media de acuíferos cársicos

Eugenio Vidal Méndez¹ eugeniov@dprhgtm.hidro.cu

Resumen

La conductividad hidráulica media de los acuíferos, calculada a partir de la estadística sumaria de los resultados de las pruebas de bombeo, resulta notablemente distorsionada con respecto a la realidad del acuífero debido a que las ecuaciones que se utilizan para su determinación, no consideran el efecto del factor de escala, ni el espacio poroso efectivo del área elemental representativa del acuífero. Conociendo que el valor medio de la conductividad hidráulica de un acuífero se relaciona de manera inversamente proporcional con su resistividad eléctrica y que además depende del espacio poroso efectivo del área elemental representativa de la sección transversal del flujo, se empleó la ecuación propuesta por Vidal, a modo de validación, para calcular el valor medio de la conductividad hidráulica en un tramo de la cuenca hidrogeológica Los Arroyos en la provincia de Holguín, del cual se tienen los valores calculados a partir de pruebas de bombeo. Se evidenció una mayor efectividad en el cálculo de la conductividad hidráulica media del acuífero con el empleo de la ecuación propuesta por Vidal, al obtener valores de conductividad más cercanos a la realidad.

Palabras clave

Acuíferos cársicos, conductividad hidráulica, resistividad eléctrica, porosidad efectiva.

Validation of the use of electrical resistivity in calculus of average hydraulic conductivity of karst aquifers

Abstract

The average hydraulic conductivity of the aquifers, calculated starting from the statistic summary of the pumping tests results, is notably distorted with regard to the reality of aquifer, because the used equations for its determination don't consider the effect of the scale factor, neither the effective porous space of the representative elementary area of the aquifer. Knowing that the average value of the hydraulic conductivity of an aquifer is related with an inversely proportional way to its electric resistivity and that it also depends on the effective porous space of the representative elemental area of the traverse section of the flow, intends to use by way of validation, a new equation to calculate the average value of this property, in a tract of the hydrogeological basin Los Arroyos in Holguín province previously studied using pumping tests. As a result of the research, it was obtained a greater effectiveness in the calculation of aquifer average hydraulic conductivity.

Key words

Hydraulic conductivity, electric resistivity, karst aquifer, effective porosity

INTRODUCCIÓN

Una de las tareas fundamentales de todo estudio hidrogeológico es determinar la conductividad hidráulica de los acuíferos, para lo cual en el campo se ha hecho extensivo el uso de las pruebas de bombeo en pozos. A partir de los datos aportados por estas pruebas y de las condiciones ideales impuestas para el análisis del flujo hacia las obras de captación, se han desarrollado diferentes ecuaciones y métodos de cálculo. Si bien es cierto que en la actualidad las pruebas de bombeo resultan una de las más confiables debido al desarrollo teórico alcanzado en sus formulaciones, tienen el inconveniente de que los valores medios derivados del tratamiento estadístico de sus resultados se distorsionan en comparación con la realidad física del acuífero; esto obedece a que las ecuaciones que se utilizan para su determinación no consideran entre sus parámetros el efecto del factor de escala (EFE), al ser sus resultados representativos del radio de influencia de la prueba y no considerar el espacio poroso efectivo (S_{ϕ}) del área elemental representativa (AER) del acuífero. Por otro lado, los gastos en que se incurren en las investigaciones por estos conceptos llegan a constituir muchas veces un 35 – 60 % del total de los gastos de la exploración de aguas subterráneas (Klimentov y Kónonov, 1982).

Vidal (2008) propone una nueva ecuación para el cálculo de la conductividad hidráulica media (K) de los acuíferos, la cual relaciona dicha propiedad con la resistividad eléctrica de las rocas saturadas (R_s), el espacio poroso efectivo de la sección transversal de flujo (S_{ϕ}), el grado de consolidación de la roca (δ), la resistividad eléctrica del agua de saturación (R_w), su viscosidad cinemática (ν) y la aceleración de la gravedad (g).

$$K = \frac{R_w}{R_s \delta S_{\phi}} \frac{g}{\nu} \quad (1)$$

El objetivo de este trabajo es avalar la efectividad del uso de esta ecuación para el cálculo de la conductividad hidráulica media en acuíferos cársicos. Para ello la ecuación fue aplicada

en un tramo de la cuenca hidrogeológica Los Arroyos, provincia de Holguín, el cual fue estudiado anteriormente con métodos geofísicos de superficie, específicamente con Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), por Rodríguez y Bauza (1982) y posteriormente por Llorens (1984) usando bombeos.

Características generales del área de estudio

El área investigada se localiza al oeste-suroeste de la ciudad de Holguín y ocupa un área de 36 km² (Figura 1). Desde el punto de vista climatológico se caracteriza por valores medios de precipitación anual de 1 105 mm, llegando a descender hasta los 883 mm, como ocurrió en el periodo 1994 -1999 (Llorens, 1999).

El relieve de la región es predominantemente ondulado al norte y llano al sur. La red hidrográfica tiene un buen desarrollo en relación con el relieve y la litología existentes, siendo más densa al sur; en general ésta se orienta en dirección NE–SW fundamentalmente para los ríos principales, los que corren obedeciendo a la tectónica (Blanco y Llorens, 2003).

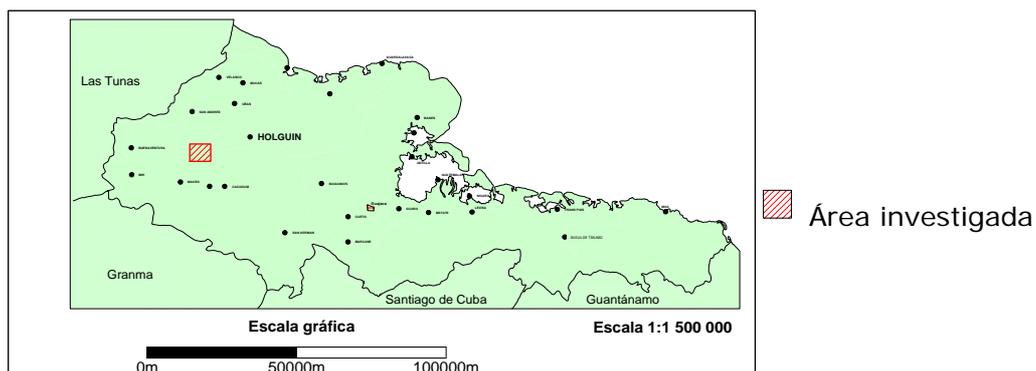


Figura 1. Ubicación geográfica del área de los trabajos.

El área se enmarca dentro de la cuenca Los Arroyos, perteneciente a la zona estructuro-facial Aura y a la cuenca superpuesta Guacanayabo–Nipe, la cual presenta características complejas debido al variado número de formaciones geológicas que en ella existen y a su desarrollo tectónico regional, caracterizado por la presencia de fallas de sobrecorrimiento,

y otros sistemas de alineamientos tectónicos que surcan en toda su extensión prácticamente a todas las secuencias rocosas. Los principales sistemas de fallas se orientan en dirección NW – SE y NE – SW, observándose otros de relativa menor importancia en dirección E – W (Blanco y Llorens, 2003).

El acuífero se desarrolla dentro del complejo rocoso carbonatado del Neógeno, representado por calizas cársicas porosas, margas y areniscas. Sus aguas son del tipo bicarbonatadas–magnesianas, de variada mineralización (Blanco y Llorens, 2003). La transmisividad media del acuífero, estimada por Llorens (1984) en un área de 27 km² evaluada para uso de la fábrica de cerveza de Holguín, fue del orden de los 2 800 m²/d. Los gastos en las tomas oscilaron entre 30 y 67 L/s con descensos en los niveles entre 10 y 1,8 m. La explotación del acuífero se recomendó para un gasto de 70 L/s y descensos promedios en las tomas de 2,5 m. La productividad de los pozos era de 28 L/s.m de abatimiento. El gradiente hidráulico natural del territorio se estimó en esa ocasión en 0,0003.

MATERIALES Y MÉTODO

Para calcular la conductividad hidráulica media de los acuíferos (K) a partir de la ecuación de Vidal (ec. 1) es necesario determinar los valores de cada uno de los parámetros involucrados en la misma. En este caso, la resistividad eléctrica media del agua de saturación (R_w) se obtuvo a partir de mediciones en laboratorio realizadas a 15 muestras de agua tomadas en igual número de pozos distribuidos en el área. La resistividad eléctrica media de las rocas saturadas (R_s) se calculó a partir de 36 mediciones de SEV de la campaña geofísica realizada por Rodríguez y Bauza (1982). El grado de consolidación (δ) se tomó igual a 2, siguiendo las consideraciones de Kozeny (1927) quien recomienda este valor para rocas consolidadas y 2,5 para las no consolidadas. La aceleración de la gravedad (g) se establece como 9,81 m/s² y

la viscosidad cinemática del agua para la temperatura promedio del agua subterránea en Cuba (21° C) se asume con un valor igual a $1.0 \times 10^{-6} m^2/s$ (Pérez-Franco 2001).

El espacio poroso efectivo de la sección transversal de flujo (S_ϕ) del área elemental representativa (AER) de la sección de flujo del acuífero, como expresión del área mínima posible a considerar y dentro de la cual el valor medio de K no se distorsiona significativamente al variar sus dimensiones, según la definición dada por Molerio (1986), se determina por la siguiente ecuación propuesta también por Vidal (2008):

$$S_\phi = \phi_f AER \quad (2)$$

Donde:

ϕ_f : Porosidad activa o de flujo.

AER: Área elemental representativa de la sección de flujo; se determina mediante la expresión:

$$AER = LER \times H_m \quad (3)$$

Donde H_m es el espesor medio saturado del acuífero y LER es la longitud elemental representativa o ancho de la sección transversal del acuífero.

Para determinar la LER se utilizó el variograma, el cual proporciona un sentido preciso a la noción tradicional de radio de influencia (Matheron, 1970) y en el que un crecimiento más o menos rápido, refleja la manera en que se deteriora el valor de una variable en zonas cada vez más alejadas hasta alcanzar un valor máximo ($A_{max.}$) o práctico. El $A_{max.}$ se determina para obtener al ancho máximo de la sección elemental representativa del flujo en las diferentes direcciones del espacio en que se estima la K cuando R_s es una variable aleatoria regionalizada estacionaria de segundo orden.

$$LER = 2A_{max.} \quad (4)$$

Para determinar la porosidad de flujo o activa (φ_f) se utiliza la expresión de Mendoza y Valle (1996):

$$\varphi_f = \left(\frac{F-1}{G} + 1 \right)^{-1} \quad (5)$$

Donde G es un parámetro que depende de la geometría interna de las rocas.

Mendoza y Valle (1996), a través de múltiples investigaciones de laboratorio y técnicas de mínima desviación, han determinado que G toma valores promedios de 0,887 para las rocas carbonatadas y de 1,03 para las arenas.

Para expresar en metros por día la conductividad hidráulica media del acuífero según la ecuación (1), debe multiplicarse por 86 400 s, quedando de la forma siguiente:

$$K = \frac{R_w}{R_s \delta S_\phi} \frac{g}{\nu} 86400 \quad (6)$$

Como la transmisividad (T) de un acuífero se define por la relación:

$$T = KH_m \quad (7)$$

Entonces, también ésta puede determinarse a partir de la resistividad eléctrica media del acuífero, si se conoce la potencia media de éste.

Para tener una idea de las variaciones de K en el espacio bidimensional, se asume R_s como variable regionalizada mientras los demás parámetros que componen la ecuación (1) permanecen constantes. Ello permite estimar el comportamiento espacial de K a partir de valores de R_s estimados en un *raster* con técnicas apropiadas, como por ejemplo el krigeage ordinario.

Para validar los resultados, se compararon los valores de K y T derivados de la ecuación de Vidal (2008), con los obtenidos a partir de las pruebas de bombeo realizadas por Llorens (1984).

Para comprobar la eficacia de la nueva ecuación en lo referente a la reducción del error del estimado del valor medio de la K y la T del acuífero se seleccionó, dentro del área de 36 km², otra más pequeña (10,5 km²), ubicada en la porción nororiental, a la que se determinaron los valores medios de ambas propiedades para compararlos con los obtenidos para el área mayor.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El valor medio de la resistividad eléctrica del acuífero resultó ser 24,2 Ohm.m en las dos direcciones estudiadas a partir de los variogramas, encontrándose este valor dentro del rango reportado por Rodríguez y Bauza (1982) para las calizas acuíferas (20-50 Ohm.m). El comportamiento de los variogramas confirmó la existencia en el área de flujos, caracterizados por las mayores continuidades o alcances máximos y las menores varianzas (Tabla 1). Las direcciones de flujo obtenidas mediante los variogramas se corresponden con las direcciones principales de los sistemas de fallas que afectan el área, reportados por Blanco y Llorens (2003). Esto sugiere que los sistemas de falla constituyen las vías fundamentales de circulación de las aguas subterráneas en el territorio.

Tabla1. Resultados del análisis variográfico de la resistividad para el área total

Área (km ²)	RESULTADOS DEL ANÁLISIS VARIOGRAFICO						R _r (Ohm)	R _w (Ohm)	H (m)
	Dirección	Anisotropía	Alcance (m)	Nugget	Varianza	I.G.F			
36	85°	0,5	1540	347,2	585,8	0,014	24,2	6,1	42
	135°	0,5	2288	69,6	582,8	0,004			

Los resultados de la evaluación de los parámetros hidrogeológicos medios que caracterizan a las calizas acuíferas, utilizando la ecuación propuesta por Vidal (2008) se muestran en la Tabla 2.

La conductividad hidráulica media del acuífero, o en su defecto la transmisividad, revelan diferentes valores en las direcciones NW y NE, lo cual denota una marcada anisotropía direccional propia de los acuíferos agrietados y cárnicos, coincidentes con las direcciones principales de los sistemas de fallas reconocidos como las vías principales de drenajes de la zona de alimentación.

Tabla 2. Parámetros hidrogeológicos del área

Área (km ²)	Dirección estudiada.	F	ϕ_f	S_ϕ	k (m ²)	LER (m)	AER (m ²)	K (m/d)	T (m ² /d)
36	85°	3,97	0,23	44 099	$7,10 \times 10^{-11}$	4576	183 040	60,2	2 409
	135°			28 036	$1,42 \times 10^{-10}$	3080	123 200	132,9	5 316
Valor medio.		3,97	0,23	35 217,6	$1,004 \times 10^{-10}$	3828	153 120	89,4	3 576

El valor medio de la transmisividad del acuífero en el tramo investigado fue de 3 576 m²/d. Al comparar este valor con el reportado por Llorens (1984) utilizando pruebas de bombeo para un área de 27 km² (2 800 m²/d), se observa que este último se desvía de valor medio estimado por la nueva ecuación en un 27,7 %, lo cual confirma la influencia ejercida por el EFE sobre los valores medios obtenidos por las pruebas de bombeo y la conveniencia de utilizar los parámetros de resistividad eléctrica media regionalizada para calcular la conductividad hidráulica del acuífero.

Los resultados obtenidos en el área más pequeña se recogen en la tabla 3. Ellos muestran que independientemente de las dimensiones que tengan las áreas, los valores medios de la K y la T son similares, con un error de estimación de aproximadamente 3 %, a pesar de que un área es 3,4 veces

mayor que la otra. Esto demuestra que independientemente del tamaño del área considerada, la regionalización de la variable minimiza el efecto del factor de escala sobre la conductividad hidráulica, confirmando así la conveniencia de considerar el espacio poroso efectivo de la sección transversal del flujo dentro del área elemental representativa al determinar la conductividad hidráulica media del acuífero.

Tabla 3. Parámetros hidrogeológicos medios de la nueva área y valor medio general

Área (km ²)	Direcc.	F	ϕ_f	S_ϕ	k (m ²)	LER (m)	AER (m ²)	K (m/d)	T (m ² /d)
10.5	75°	4.39	0.21	28 828.8	1.37×10^{-11}	3432	137 280	116.1	4 644.0
	125°			36 220.8	8.68×10^{-10}	4312	172 480	73.6	2 944.0
Valor medio.		4.39	0.21	32 440.8	1.07×10^{-10}	3872	154 880	91.2	3 697.5

CONCLUSIONES

La validez de la ecuación propuesta por Vidal, basada en la existencia de relaciones funcionales entre la conductividad hidráulica de los acuíferos y su resistividad eléctrica, se comprueba a través de los resultados obtenidos en las pruebas de campo, lo que confirma la necesidad de considerar el espacio poroso efectivo (S_ϕ) del área elemental representativa de la sesión transversal del acuífero para obtener valores de conductividad hidráulica más cercanos a la realidad, evidenciándose además que la regionalización de la variable minimiza el efecto del factor de escala sobre la conductividad hidráulica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLANCO J. L & C LLORENS. 2003. Investigaciones hidrogeológicas de la nueva zona Managua – El Aserrío para el abasto a la fábrica de cerveza Bucanero S.A. Archivo de la EIPH de Holguín.

- KLIMENTOV P.P. & V. M. KONONOV. 1982. Metodología de las investigaciones hidrogeológicas. Editorial Mir. Moscú. 447pp.
- KOZANY, J. 1927. Wassercraft un wasserwirtschaft. Vol.22, 86 p.
- LLORENS C. 1984. Estudio hidrogeológico para el abasto subterráneo a la fábrica de cerveza de Holguín. Archivo de la EIPH de Holguín.
- 1999. Evaluación de recursos de agua subterránea en el área de los pozos de la fábrica de cerveza con la utilización del método del gráfico de control del balance. Archivos de la EIPH de Holguín.
- MOLERIO L. F. 1986. El efecto del factor de escala en la interpretación del campo de propiedades físicas de los Acuíferos Cársicos. *Voluntad Hidráulica*. 75 :19 -26.
- MARTÍNEZ A & J RÁMIREZ 2005. Desarrollo actual de la geoestadística en el mundo. *Minería y Geología*, 21 (4). www.ismm.edu.ci/revistamg [consultada: 15 marzo 2008]
- MENDOZA, G Y V. VALLE. (1996). Modelos petrofísicos para la descripción de yacimientos fracturados. Instituto Politécnico Nacional. Unidad Ticomán Ciencias de la Tierra. Mexico. 370 p.
- MATHERON G. 1970. La teoría de las variables regionalizadas y sus aplicaciones. Centro de Geoestadística de la Escuela de Minas de París 125 p.
- PÉREZ FRANCO. D. 2001. La explotación del agua subterránea. Un nuevo enfoque. Primera parte. Editorial Félix Varela. La Habana. 271 p.
- RODRÍGUEZ E & C. BAUZA. 1982. Informe sobre los trabajos geofísicos orientados a la investigación de agua subterránea, para el abasto industrial, de regadío y poblacional en la cuenca San Germán – Maceo de a provincia de Holguín. Archivos de la EIPH de Holguín.
- VIDAL, M. E. 2008. Calculo de la conductividad hidráulica media regionalizada de los acuíferos a partir de su resistividad hidráulica *Minería y Geología*, 24 (2) www.ismm.edu.cu/revistamg [consultada: 6 enero 2009]