

Determinación de la conductividad hidráulica mediante medidas de resistividad eléctrica

Héctor José Peinado-Guevara

Universidad Nacional Autónoma de México

Jaime Herrera-Barrientos

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México

María de los Ángeles Ladrón-de-Guevara-Torres

Instituto Politécnico Nacional, México

La conductividad hidráulica es un parámetro que rige el flujo del agua en un acuífero y se relaciona con el flujo mediante la ley de Darcy, ley empírica de la naturaleza obtenida experimentalmente. Dicha ley es análoga a las que gobiernan distintos tipos de flujos, también naturales, como el de calor, la corriente eléctrica y el másico, entre otros, los cuales tienen en común que dependen de una cantidad denominada conductividad y un gradiente. La analogía entre estos elementos permite suponer que hay interferencia y acoplamientos entre ellos, por lo que es posible encontrar relaciones entre propiedades eléctricas e hidráulicas a partir de observaciones experimentales. Se presentan datos experimentales que muestran relaciones empíricas entre los valores de la conductividad hidráulica y el factor de formación; la resistividad del agua de la formación y la del medio saturado para 16 distintas localidades, en las cuales se determinó la textura de los materiales acuíferos. Las relaciones encontradas entre parámetros eléctricos e hidráulicos son una guía práctica en la orientación de nuevas perforaciones, en este caso, en la porción sur del valle de Guasave, Sinaloa, México.

Palabras clave: Sondeo Eléctrico Vertical, resistividad eléctrica, conductividad hidráulica, permeámetro, factor de formación, textura, Archie, ley de Darcy.

Introducción

Un acuífero puede estudiarse a partir de sus características físicas, como por ejemplo su resistividad eléctrica tanto del medio saturado como del fluido de saturación. La resistividad eléctrica del acuífero es posible estimarla mediante métodos de prospección geofísica, como lo es el geoelectrónico por corriente continua denominado Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). La resistividad eléctrica del fluido de saturación se obtiene en campo a través de muestras de agua de pozo medida con un conductímetro. La aplicación del SEV es notoriamente más barata que una perforación,

ya que en general su costo es del orden del 5% de una perforación. Es una técnica de amplio reconocimiento y uso en la literatura geofísica, como guía previa a una perforación en la búsqueda de agua.

Mediante el SEV se obtienen en campo lecturas de corrientes eléctricas y diferencias de potencial, mismas que son traducidas en valores de resistividad eléctrica del subsuelo llamadas aparentes, en las cuales, mediante métodos de modelado numérico directos o inversos se obtienen resistividades eléctricas verdaderas del subsuelo.

La analogía física entre el flujo hidráulico y el flujo eléctrico ha sido fuente de inspiración para diversos

autores: Archie (1942) encontró una relación entre la resistividad de las arenas saturadas por salmuera (R_o) y la salmuera (R_w), llamada factor de formación (F) en arenas limpias en pozos petroleros; Niwas y Singhal (1981), al considerar las leyes de flujo eléctrico (Ley de Ohm) e hidráulico (Ley de Darcy), encontraron relaciones analíticas entre la transmisividad hidráulica y la resistencia transversal eléctrica; Croft *et al.* (1971), Kelly (1977), y Kelly y Reiter (1984) identificaron relaciones empíricas entre el factor de formación y la conductividad hidráulica a partir de SEV's; Kosinski y Kelly (1981) obtuvieron también relaciones empíricas entre la conductividad hidráulica y el factor de formación aparente; Frohlich y Kelly (1985), y Frohlich *et al.* (1994) encontraron qué valores altos del factor de formación F están asociados con zonas contaminadas; Ahmed *et al.* (1988) determinaron la transmisividad hidráulica a través de propiedades eléctricas del acuífero, incorporadas mediante un análisis geoestadístico Kriging; Ponzini *et al.* (1984) determinaron una función empírica entre la resistenciainversaleléctricadelacuífero(considerando la resistividad del agua de saturación) y la transmisividad hidráulica; Urish (1981) estableció relaciones empíricas entre el factor de formación aparente (obtenido a través de SEV's) y la conductividad hidráulica (obtenida a través de pruebas de bombeo); Hodlur *et al.* (2006) obtuvieron relaciones entre la conductancia longitudinal unitaria (obtenida a través de SEV's), la resistividad del agua de la formación y del espesor saturado; Tong *et al.* (2006), a partir de un modelo de polarización inducida, estimaron la permeabilidad; Atekwana *et al.* (2004) observaron relaciones inversas entre conductividades del agua de saturación y conductividades volumétricas del medio saturado; Hördt *et al.* (2007) estimaron la conductividad hidráulica en sedimentos no consolidados a partir de medidas de polarización inducida; Shevlin *et al.* (2006) establecieron relaciones empíricas entre la conductividad hidráulica y el contenido de arcilla en suelos areno-arcillosos; Lima y Niwas (2000) estimaron la conductividad hidráulica en areniscas arcillosas a través de medidas geoeléctricas. Mazá *et al.* (1988) obtuvieron la variación espacial de la conductividad hidráulica a través del SEV y perfilado electromagnético.

En este trabajo se establecen relaciones empíricas funcionales entre: a) la resistividad eléctrica obtenida mediante un SEV y el agua de la formación acuífera; b) el factor de formación aparente (F) *versus* conductividad hidráulica (K), éstos considerando que las ecuaciones de flujo eléctrico e hidráulico al tener la misma forma constitutiva matemática $J=Lx$ se relacionan entre sí. Para ello, a partir de ciertos valores de resistividad eléctrica de un acuífero (R_o) y del agua de saturación

de éste (R_w), obtenidos a través de pozos, se plantea conocer la calidad del agua subterránea en la zona acuífera en sitios donde no hay perforaciones. Los pozos de muestreo utilizados no superan los cuarenta metros de profundidad. En ellos se consiguen muestras de materiales a las que se les obtiene la textura y la conductividad hidráulica (K) mediante análisis de suelos y un permeámetro de carga constante, respectivamente. Los puntos de muestreo corresponden a pozos ubicados en la porción sur del valle de Guasave, Sinaloa, México. Esta zona es objeto de intensa explotación con fines agrícolas y de uso doméstico, que impulsa el desarrollo de las comunidades rurales, por lo que es importante contar con relaciones empíricas que permitan con éxito perforaciones del subsuelo y encontrar agua de buena calidad.

En el estado de Sinaloa, a pesar de contar con 11 importantes ríos tributarios, en los periodos de escasez de agua superficial se aprovechan depósitos subterráneos, como el del valle del río Sinaloa; por lo que es de interés conocer, previo a una perforación del subsuelo, la salinidad del agua en éste, ya que los costos de una perforación, en general, son elevados.

Teoría

Formulación general de flujo

Nourbehecht (1963) indica cómo las diversas leyes empíricas de la naturaleza gobiernan distintos tipos de flujos (los cuales se escriben con negrillas por ser cantidades vectoriales), como el de calor \mathbf{J}_Q , solventes \mathbf{J}_S , mágico \mathbf{J}_M , corriente eléctrica \mathbf{J}_E y corriente hidráulica \mathbf{q} , expresados cada uno mediante leyes que tienen la forma:

$\mathbf{J}_Q = -\kappa \nabla T$	Ley de Fourier
$\mathbf{J}_S = -\kappa' \nabla P$	Ley de Darcy
$\mathbf{J}_M = -D \nabla C$	Ley de Fick
$\mathbf{J}_E = -\sigma \nabla \phi$	Ley de Ohm
$\mathbf{q} = -k \nabla h$	Ley de Darcy

Las constantes κ , κ' , D , σ y k son términos generalizados de conductividades, por lo que las ecuaciones anteriores tienen un patrón general de la forma:

$$J = LX$$

En fenómenos de transporte, dos o más flujos pueden ocurrir de manera simultánea, produciéndose interferencia y acoplamiento entre ellos. Este acoplamiento

permitirá una relación entre parámetros que explican cada flujo en lo individual; de aquí se infiere que es posible encontrar una relación entre las observaciones eléctricas y las propiedades hidráulicas, e incluso de otra naturaleza, como las térmicas.

Respecto a los efectos de acoplamiento entre los diversos flujos, Nourbehecht (1963) establece que "el primer postulado de la termodinámica de procesos irreversibles es aquel en que en un sistema los flujos ocurren simultáneamente debido a la acción de varias fuerzas x_i , por lo que es posible expresar cada flujo como una combinación lineal de todas esas fuerzas". Las relaciones fenomenológicas o también llamadas las ecuaciones termodinámicas del movimiento son:

$$J_i = \sum_j L_{ij} X_j$$

las cuales expresan al flujo como una combinación de las propiedades denotadas por tensores de segundo orden y gradientes de una función escalar. Con fines de la enseñanza de la física, Greenslade (2003) explicó que hay analogía entre los flujos hidráulico y eléctrico, encontrando que ambos dependen de un gradiente y una constante de proporcionalidad.

Resistividad volumétrica de la formación

La resistividad volumétrica del acuífero se obtiene mediante el Sondeo Eléctrico Vertical (Orellana, 1982), el cual consiste en inyectar una corriente eléctrica continua al subsuelo con el uso de electrodos metálicos A y B, separados entre sí por la distancia AB. Para cada separación AB entre los electrodos de corriente se miden las diferencias de potencial eléctrico asociadas con las corrientes eléctricas que viajan por el subsuelo del electrodo A al B, obteniéndose así la resistividad aparente del subsuelo. Este procedimiento se repite para distintas aberturas AB, construyéndose una curva de resistividad aparente *versus* la separación AB/2. Estas observaciones se interpretan considerando un modelo de tierra estratificada, constituido por capas de resistividad eléctrica y espesor definido. Cuando se trata de la resistividad de la zona saturada, ésta recibe el nombre de resistividad volumétrica del acuífero (R_o). La interpretación de las curvas de resistividad aparente se realiza mediante el algoritmo de Guptasarma (1982), el cual consiste en la convolución de la transformada de la resistividad y un filtro lineal de 19 coeficientes, a diferencia del algoritmo clásico de Ghosh (1971), que utiliza un filtro de nueve puntos.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es una propiedad del medio acuífero que indica la cantidad de agua que puede pasar por una sección unitaria en la unidad de tiempo debido a un gradiente hidráulico unitario (Fetter, 1988). Existen diversos métodos en la literatura para su determinación, ya en laboratorio, ya en campo (Luna-Sáez *et al.*, 2005). El método de Massmann y Johnson (2001) a utilizar en este trabajo se basa en el cálculo de la permeabilidad de una columna con materiales sujetos a la acción del aire y por una conversión geométrica; considerando las propiedades de los fluidos aire y agua, se obtiene la conductividad hidráulica.

El cálculo de la conductividad del aire (Massmann y Jonson, 2001) es:

$$K_{\text{aire}} = \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{L}{t_1 - t_0} \ln \left(\frac{H_0}{H_1} \right)$$

Donde:

- ρ_a es densidad del aire en g/cm³.
- ρ_w es la densidad del agua en g/cm³.
- L es la longitud de la muestra dentro del tubo en cm.
- t_1 es el tiempo en que se hace la medición H_1 en segundos.
- t_0 es el tiempo de inicio en segundos cuando el tubo tiene un nivel H_0 .
- H_0 es el nivel inicial del agua en cm.
- H_1 es el nivel final del agua en cm.

La conductividad hidráulica (K_{agua}) en términos de las densidades y viscosidades del agua (μ_a) y el aire (μ_w) es:

$$K_{\text{agua}} = \frac{\mu_a \rho_w}{\mu_w \rho_a} K_{\text{aire}}$$

Para $\mu_a = 1.8 \times 10^{-4}$ g/cm/seg; $\mu_w = 1.0 \times 10^{-2}$ g/cm/seg; $\rho_w = 1.0$ g/cm³ y $\rho_a = 0.0012$ g/cm³.

K_{agua} en unidades de cm/día, queda de la siguiente manera:

$$K_{\text{agua}} = 15K_{\text{aire}}$$

Factor de formación

Archie (1942), al realizar estudios de interés petrolero en arenas limpias saturadas por salmueras, encontró

una relación entre la resistividad de la arena saturada por salmuera (R_0) y la salmuera (R_w). Lo llamó factor de formación:

$$F = \frac{R_0}{R_w}$$

Cuando los materiales no son arenas limpias, es decir, que contienen arcillas, el cociente indicado de la resistividad de la formación saturada de agua (R_0) y la resistividad del agua de la formación (R_w) reciben el nombre de factor de formación aparente (Urish, 1981).

En este trabajo, el medio geológico está constituido por arenas, gravas, limos y arcillas, por lo que no se cumple la condición de arenas limpias. Respecto al fluido saturante, es agua que varía entre dulce y ligeramente salobre, por lo que no es el caso de la salmuera indicada por Archie. Así, la relación entre R_0 y R_w es el factor de formación aparente; sin embargo, a lo largo de este trabajo se le llama simplemente factor de formación.

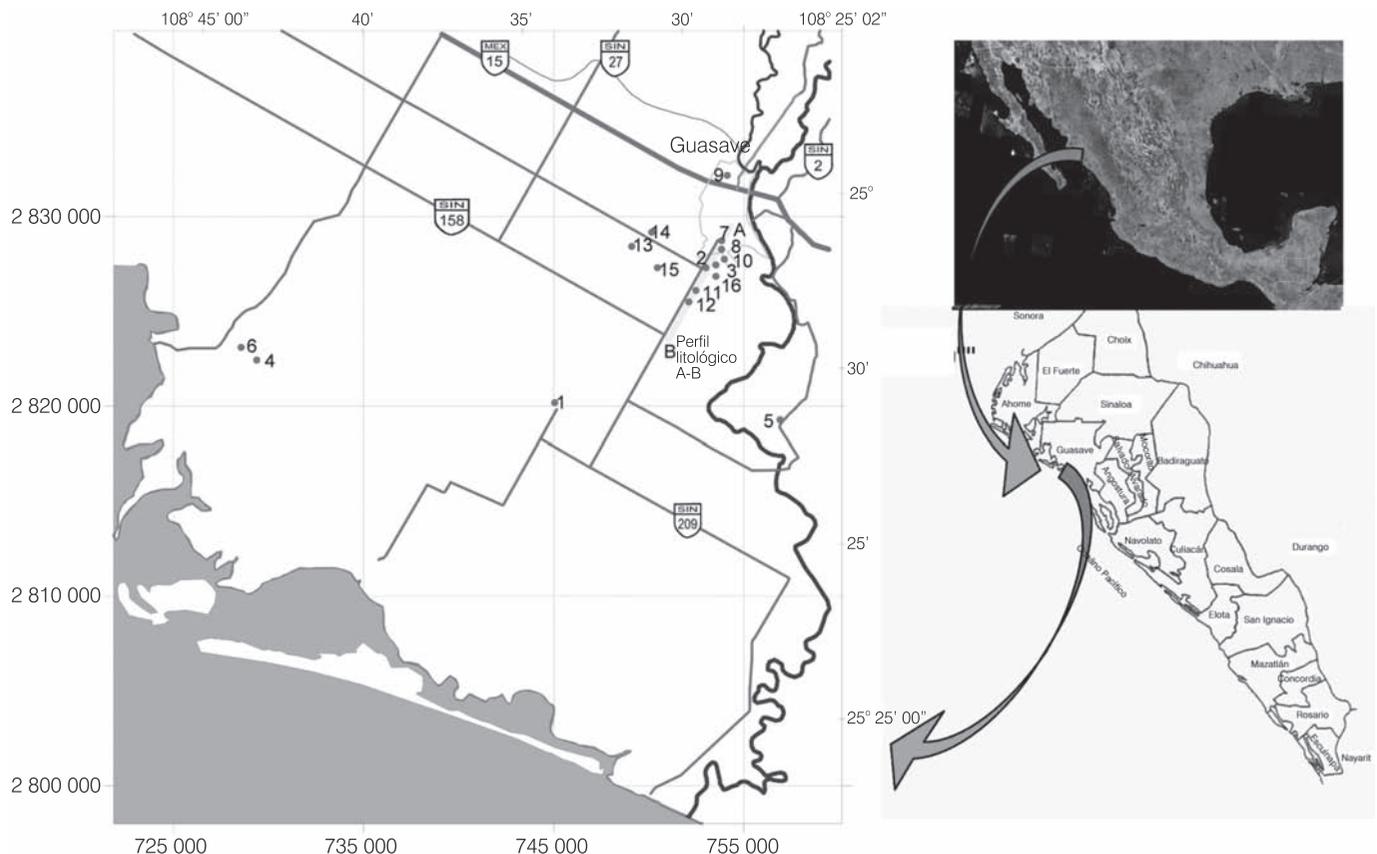
La conductividad eléctrica del agua de la formación se midió mediante el conductivímetro portátil Hanna HI

9813-6, el cual realiza automáticamente la compensación por temperatura. Antes de hacer las lecturas de las muestras de agua de los pozos, el equipo se calibraba; para ello se utilizó una solución electrolítica de cloruro de potasio (KCl), cuya conductividad eléctrica es conocida. R_w se obtiene a partir de la conductividad eléctrica del agua, ya que son inversamente proporcionales.

Características y localización del área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Guasave y dista 60 km al sur de la ciudad de Los Mochis, Sinaloa, y 145 km al norte de la ciudad de Culiacán, Sinaloa. Geográficamente está entre las coordenadas $25^{\circ} 16' 38''$ y $25^{\circ} 39' 38''$ de latitud norte y de $108^{\circ} 25' 02''$, a $108^{\circ} 47' 47''$ de longitud oeste (véase ilustración 1). El acuífero es predominantemente libre, los suelos son francos limosos, la dirección del flujo es hacia la costa (sur) y se ubica en una planicie costera con pendiente suave (del orden de 0.5 m/km), constituida por materiales predominantemente aluviales, y en ella se localizan diversos cuerpos de agua, como el río Sinaloa, que la

Ilustración 1. Macro y micro localización del valle de Guasave.



divide en la margen derecha e izquierda, y el arroyo Ocoroni, que se une al río Sinaloa al norte de la ciudad de Guasave.

Respecto a la profundidad del nivel freático en el área de estudio, Peinado (2006) determinó que ésta varía de 0.5 a 7 m y que el gradiente hidráulico se correlaciona con el gradiente del relieve topográfico de la planicie costera de dicha área.

Litología de la zona de estudio

El perfil estratigráfico de la ilustración 2, ubicado en la ilustración 1, se elaboró con datos de siete columnas litológicas. Se observa la abundancia de materiales finos en las proximidades del río, con variación de materiales más gruesos conforme se aleja de éste. También se observa la intercalación de un cuerpo de gravas "limpias". Esta conformación del subsuelo se debe al proceso de sedimentación fluvial del río.

Ahora, observando en profundidad los perfiles anteriores, se advierte una graduación de materiales; los más gruesos están debajo de los más finos, es decir, pulsos normales de sedimentación gobernados por la aceleración de la gravedad terrestre. Cabe señalar

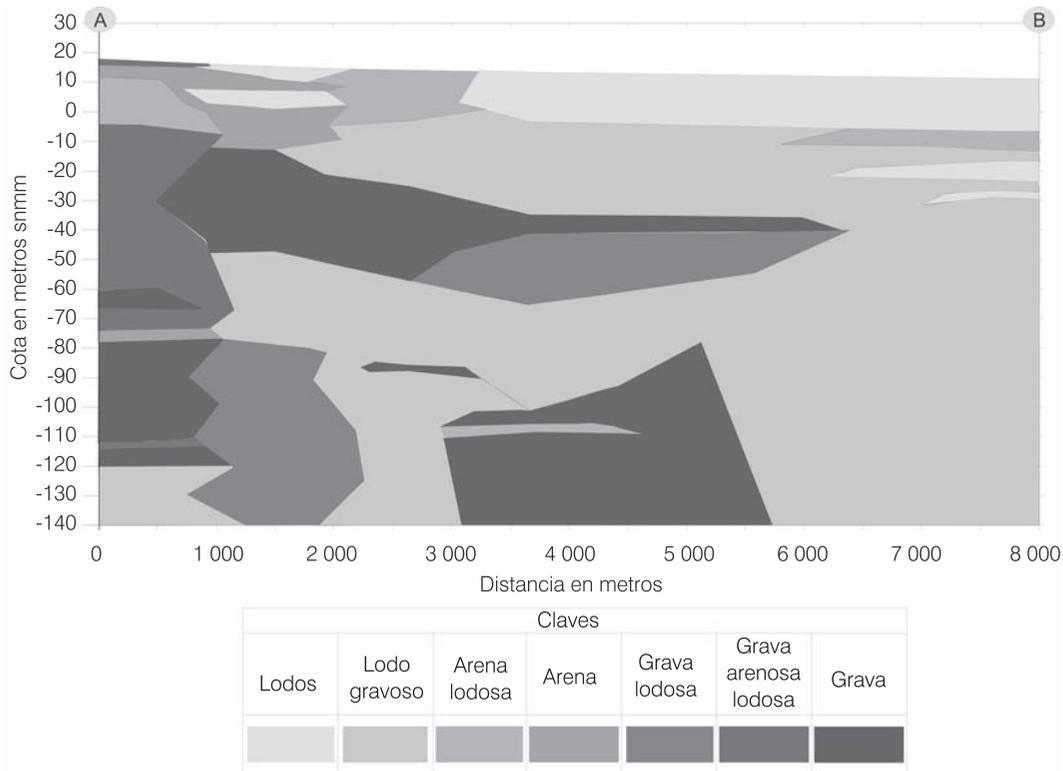
que en el perfil estratigráfico no se logra observar el basamento geológico.

Trabajos de campo

Una vez obtenidas las muestras de los 16 pozos correspondientes a la zona saturada, se determinó su valor mediante el método de Massmann y Johnson (2001), utilizando un permeámetro de carga constante.

Mediante el permeámetro se determinó la conductividad hidráulica, considerando como fluido el aire; conociendo la conductividad mediante la ecuación anterior, se obtuvo la conductividad hidráulica, considerando como fluido el agua en muestras de sedimentos de la zona saturada obtenida en 16 pozos (véase ilustración 1). De éstos, 15 están localizados en la margen derecha y uno en la margen izquierda del río Sinaloa. Las perforaciones se realizaron con barreta y broca, generando un orificio del orden de 4". Con la barreta se extraen a la superficie los detritos del subsuelo, a través de lo que se denomina "cuchareo". Una vez que yacen las muestras en la superficie, se recogen y secan para la medición de *K*, separándolas de forma que se mida *K* en la muestra de la zona acuífera.

Ilustración 2. Perfil estratigráfico del acuífero en el área de estudio.



Resultados

Resistividad de la formación

En las ilustraciones 3 y 4, los puntos representan los valores obtenidos en campo de la resistividad aparente y con una línea continua se representa la interpretación de cada sondeo mediante el método de Guptasarma (1982), considerando un ajuste entre los observables y el modelo del 1 al 7% del error raíz cuadrático medio. En la columna 2 del cuadro 1 se muestran las resistividades R_o del acuífero para 16 SEV's en distintas localidades en las cuales hay un pozo. Asimismo, se pueden apreciar los diferentes estratos con su respectiva resistividad. La profundidad máxima estudiada fue de 42 m, correspondiente a la comunidad de Cuesta de Arriba. Los valores de la resistividad muestran que, conforme se está más cerca de la línea de costa, la resistividad disminuye por la presencia de agua salobre. La resistividad R_o de la formación acuífera de los pozos analizados fluctúa entre 0.59 y 53 Ω -m.

Conductividad hidráulica

El cuadro 1, columna 5, muestra los valores de la conductividad hidráulica en los 16 pozos. Los valores de conductividades hidráulicas más altos (de 40 a 70 m/día) están asociados con materiales gruesos constituidos por gravillas y arenas gruesas. Los valores bajos (menos de 2 m/día) de conductividad hidráulica, como los de Buenavista y Motel a 10 m, corresponden a materiales limosos.

Los valores de conductividad hidráulica encontrados presentan una variación que se puede considerar como uniforme, ya que varían en dos órdenes de variación; esto, considerando los doce órdenes de variación que puede tener K .

Texturas

La textura es una característica física de los materiales del subsuelo, la cual describe los porcentajes de arcilla, limos y arena de las muestras. Esta característica se vincula con la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica.

En el laboratorio de suelo-agua-planta de la Comisión Nacional del Agua, Distrito de Riego 063-Guasave de la Jefatura de Riego y Drenaje, se determinó la textura de cada una de las 16 muestras, conforme a la NOM-021-RECNAT-2000, también conocido como procedimiento de Bouyoucos. La columna 6 del cuadro 1 muestra las texturas; se observa que predominan los materiales franco limosos, apropiados para el desarrollo agrícola.

Relación R_o - R_w

La ilustración 5 muestra un ajuste exponencial entre R_o y R_w . El coeficiente de correlación del ajuste es de 0.987 y los coeficientes del ajuste A , M y B tienen los valores 0.343, 1.0188 y 0.768, respectivamente. Esto para una ecuación de la forma $R_w = A R_o^M + B$.

La ilustración 6 muestra una relación lineal entre R_o y R_w de la forma $R_w = A R_o + B$. El ajuste muestra un coeficiente de correlación de 0.987. Los coeficientes A y B son 0.369 y 0.688, respectivamente. Tanto en el ajuste exponencial como el lineal, la correlación es positiva, es decir, conforme aumenta R_o se incrementa R_w .

Considerando el coeficiente de correlación R como elemento de comparación estadístico, se puede decir que tanto el ajuste exponencial como el lineal son apropiados. Ambos muestran ajustes que permiten señalar que la resistividad del agua de la formación se correlaciona con la de la formación acuífera y viceversa.

Relación F - K

Para una relación exponencial F - K de la forma $K = A F^M + B$, el coeficiente de correlación del ajuste es de 0.98 y los valores de las constantes A , M y B son 3.0547×10^{-5} , 12.945 y 2.19024, respectivamente. La ilustración 7 muestra el ajuste.

En la ilustración 7 se puede observar que cuando F es mayor que tres, la razón de cambio K/F aumenta; es decir, pequeños cambios de F producen cambios grandes en K , como son los casos de CIIDIR 3 y Sabanilla 2, cuyas texturas corresponden a materiales de grano grueso (arenosos). Para valores de F menores a 2.5, la conductividad hidráulica es baja; corresponden a materiales de grano fino (limos), por ejemplo, para los sitios Motel a 10 m y Buenavista.

Aplicación práctica

La aplicación práctica de las relaciones entre parámetros eléctricos e hidráulicos encontrados es como sigue: supóngase que se busca agua dulce a través de un nuevo pozo en la zona caracterizada, y que una vez realizado e interpretado el SEV resultó que R_o es igual a 10 Ω -m. Entonces, de la ilustración 6 se obtiene que R_w es igual a 4.4 Ω -m, el que corresponde a 1 650 ppm de salinidad (conforme la ilustración 8), por lo que se estima que el agua de pozo es ligeramente salobre (Heath, 1989), sin haber realizado la perforación del pozo. Este dato orientará al usuario sobre el uso potencial del agua del acuífero y mejorará sus perspectivas de encontrar agua dulce durante la perforación.

Ilustración 3. Modelo de Sondeo Eléctrico Vertical (parte 1).

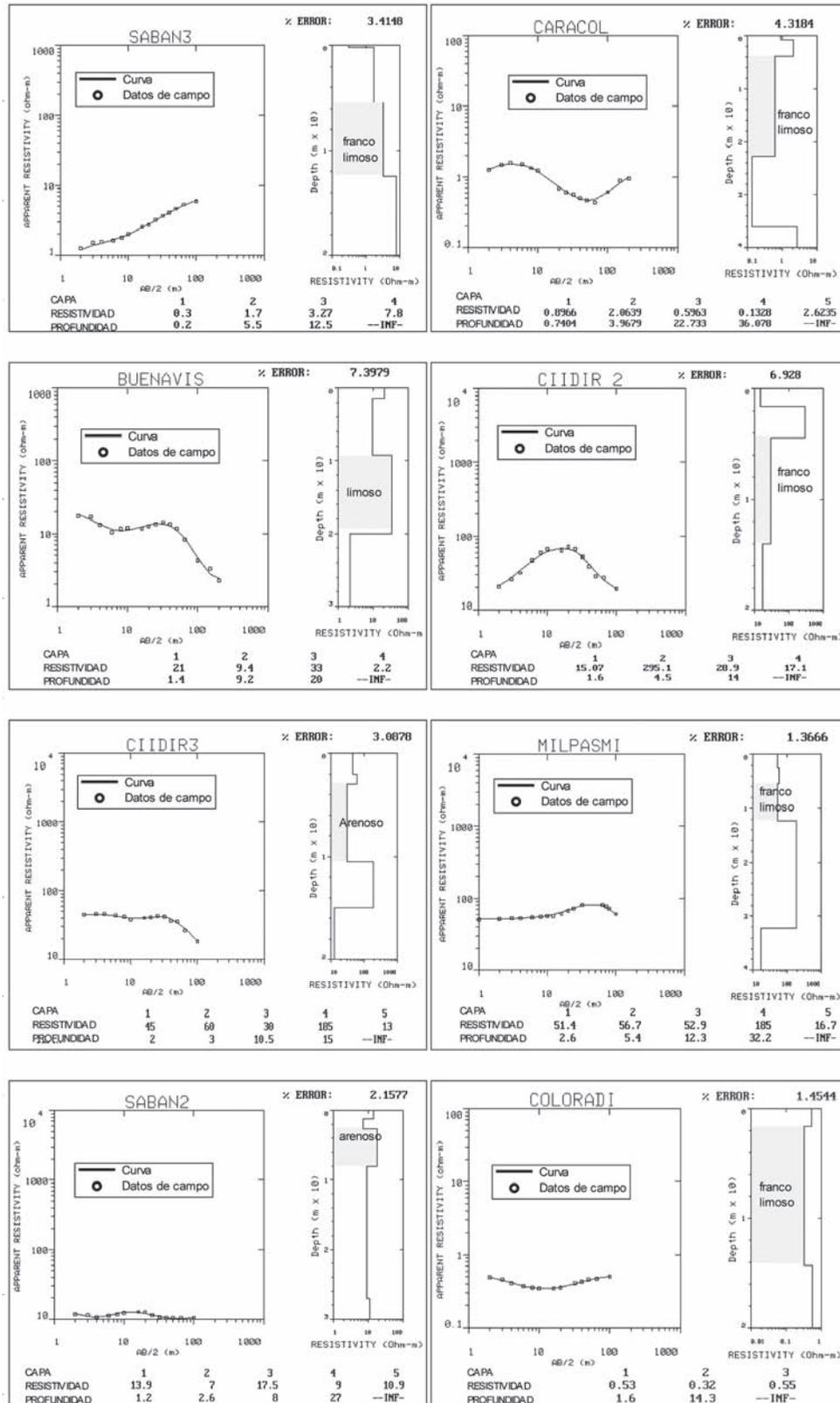
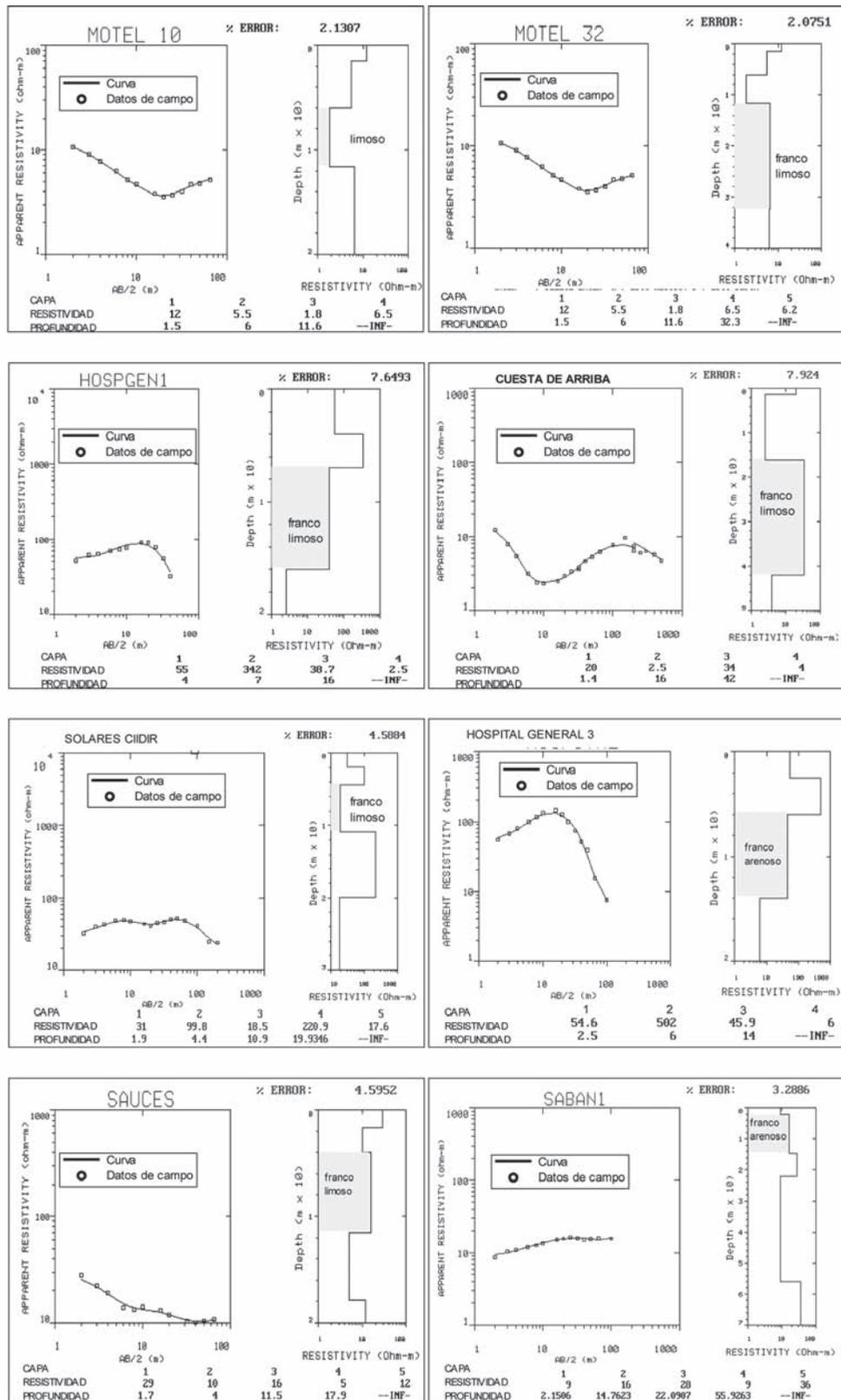


Ilustración 4. Modelo de Sondeo Eléctrico Vertical (parte 2).



Cuadro 1. Parámetros eléctricos e hidráulicos de la formación para 16 sitios.

Núm.	Lugar	Resistividad de la formación (R_o) $\Omega\text{-m}$	Resistividad del agua del acuífero (R_w) $\Omega\text{-m}$	Factor de formación $F = \frac{R_o}{R_w}$	Conductividad hidráulica (K) m/día	Textura
1	Buenavista	33	12.99	2.54	1.5	Limoso
2	CIIDIR 2	28.9	11.50	2.51	7.9	Franco limoso
3	CIIDIR 3	30	10.30	2.91	40	Arenoso
4	Coloradito	0.32	0.89	0.36	4	Franco limoso
5	Cuesta de Arriba	34	15.60	2.18	4.9	Franco limoso
6	Granja Caracol	0.6	0.97	0.62	5.5	Franco limoso
7	Hospital General 1	38.7	14.50	2.67	9.1	Franco limoso
8	Hospital General 3	45.9	16.70	2.75	23.4	Franco arenoso
9	Los Sauces	16	6.85	2.34	3.4	Franco limoso
10	Milpas	52.9	20.80	2.54	2.9	Franco limoso
11	Motel a10 m	1.8	1.23	1.46	1.4	Limoso
12	Motel a 32 m	6.5	4.60	1.41	3.2	Franco limoso
13	Sabanilla 1	16	6.10	2.62	10.7	Franco arenoso
14	Sabanilla 2	17.5	5.60	3.12	78.2	Arenoso
15	Sabanilla 3	3.27	1.20	2.72	8.7	Franco limoso
16	Solares CIIDIR	18.5	8.26	2.24	4.2	Franco limoso

Ilustración 5. Relación exponencial R_o versus R_w en 16 localidades.

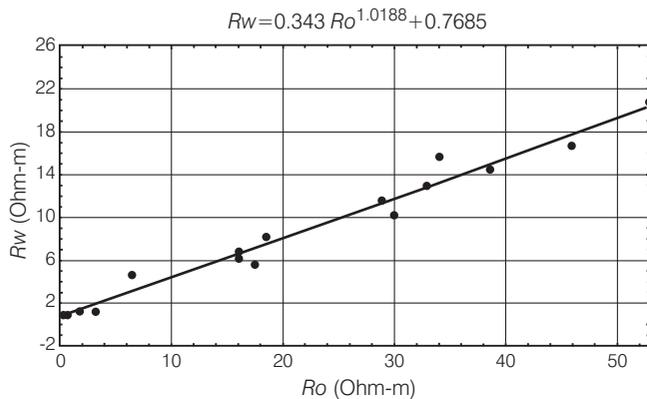
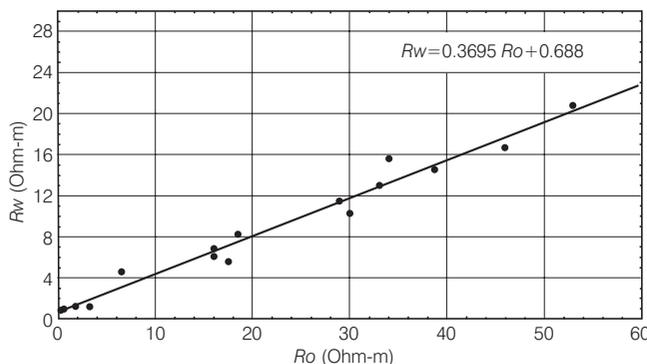


Ilustración 6. Relación lineal R_o versus R_w en 16 localidades.



El uso de las relaciones F - K es como sigue: es común contar con pozos carentes de pruebas de bombeo y de carga (*slug test*), a través de los cuales se obtiene la conductividad hidráulica; no obstante esa carencia, es posible obtener F a través de la geofísica (Sondeo Eléctrico Vertical o métodos electromagnéticos) y de las muestras de agua; por lo que, obtenido F , se determina K mediante la ilustración 7. Para $F=2.2$ de la ilustración 7, se obtiene $K=3.0$ m/día, la cual corresponde a una conductividad hidráulica correspondiente a arenas muy finas, limos, mezcla de arena, limos y arcillas (Raghunath, 1987), por lo que se está ante un medio acuífero constituido por materiales que tienen buena permeabilidad.

La ilustración 8 se obtuvo al medir en las muestras de agua de los pozos tanto la resistividad eléctrica como la salinidad en partes por millón.

Conclusiones

- Se ha encontrado que hay una fuerte correlación entre la conductividad hidráulica y el factor de formación, así como entre la resistividad de la formación y la del agua de la formación a partir de muestras de pozos localizados al sur del valle de Guasave. La correlación es apropiadamente descrita mediante funciones lineales y exponenciales.
- El factor de formación aparente F caracteriza la calidad del agua en el acuífero estudiado y se relaciona con K y, ésta, a su vez, con la textura.

Ilustración 7. Relación F versus K en 16 pozos.

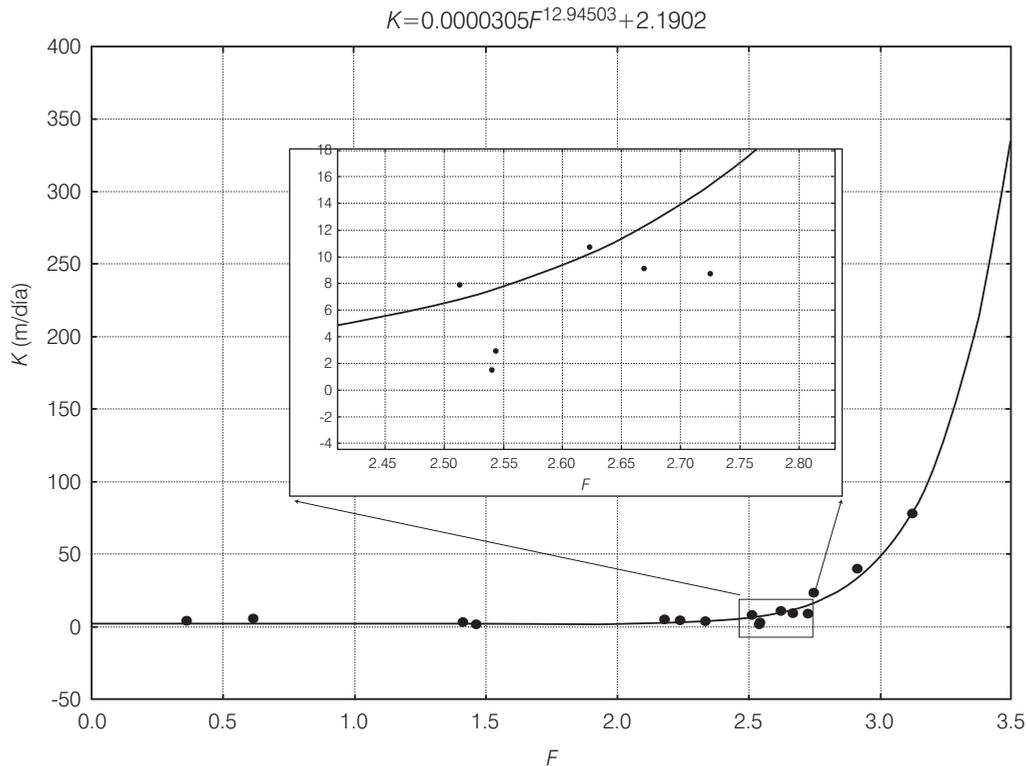
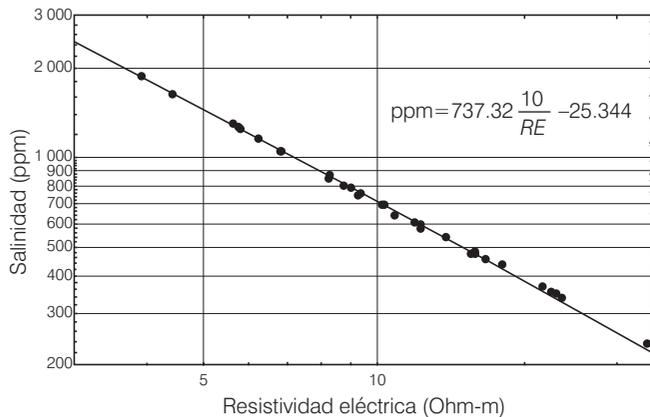


Ilustración 8. Relación entre resistividad eléctrica y salinidad.



- En pozos que ya están en operación, obtener el valor de R_w es sencillo a través de un conductímetro. El valor de R_o se logra mediante un SEV, técnica no invasiva, económica y de fácil operación, por lo que se pueden construir fácilmente las relaciones R_o-R_w , constituyendo una guía útil en la zona para futuras perforaciones.
- Las relaciones R_o-R_w y $F-K$ tiene un sentido práctico como elementos orientadores en la prospección

de agua subterránea, aprovechando información preexistente y generando nueva a través de técnicas de fácil acceso como el Sondeo Eléctrico Vertical.

Recomendaciones

- Buscar relaciones entre parámetros geoelectrónicos e hidráulicos de la parte norte del acuífero y margen izquierda del río Sinaloa.
- Elaborar un plan de manejo del acuífero, considerando las relaciones determinadas.
- En caso de empezar en una zona nueva hay que hacer una búsqueda minuciosa de datos preexistente, como pruebas de bombeo, Sondeo Eléctrico Vertical, columnas litológicas en pozos, diseño del pozo y calidad del agua (salinidad). Una vez que se tengan los datos, revisarlos cuidadosamente y separar los que aporten información útil.
- De continuar en la zona aquí presentada, habrá que hacer Sondeo Eléctrico Vertical y pruebas de conductividad hidráulica en las nuevas perforaciones que se realicen, con el propósito de ir actualizando las relaciones encontradas y guiar así las prospecciones futuras de agua en la zona.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Nacional del Agua por el apoyo brindado con su laboratorio de suelos y aguas subterráneas y a CIIDIR Sinaloa por su valiosa ayuda para que se llevara a cabo la presente investigación.

Recibido: 17/01/2008

Aprobado: 09/02/2009

Referencias

- AHMED, S., DE MARSILY, G. and TALBOT, A. Combined use of hydraulic and electrical properties of an aquifer in a geostatistical estimation of transmissivity. *Ground Water*. Vol. 26, no. 1, 1988, pp. 78-86.
- ARCHIE, G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIMME*. Vol. 146, 1942, pp. 54-62.
- ATEKWANA, E., WOVE, R., WEKEMA, D., and LEGALL, F. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 56, 2004, pp. 281-294.
- CROFT, M, BISMARCK, G. y DAK, N. A method of calculating permeability from electric logs. *Geological Survey Research*. 750-B, 1971, pp. B25-B269.
- FETTER, C.W. *Applied Hydrogeology*. T. 1. 4th edition. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1988, 598 pp.
- FROHLICH, R.K. and KELLY, W. The relation between hydraulic transmissivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposits. *Journal of Hydrology*. Vol. 79, 1985, pp. 215-229.
- FROHLICH, R.K., URISH, D.W., FULLER, J. and O'REILLY, M. Use of geoelectrical methods in groundwater pollution surveys in a coastal environment. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 32, 1994, pp. 139-154.
- GHOSH, D.P. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophysical Prospecting*. Vol. 19, 1971, pp. 192-217.
- GREENSLADE, T.B., JR. The hydraulic analogy for electric current. *The Physics Teachers*. American Association of Physics Teachers. Vol. 41, no. 8, 2003, pp. 464-466.
- GUPTASARMA, D. Optimization of short digital linear filters for increased accuracy. *Geophysical Prospecting*. Vol. 30, 1982, pp. 501-514.
- HEATH, R.C. *Basic Ground-Water Hydrology*. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 2220. United States Geological Survey, Washington, DC., 1989, 84 pp.
- HODLUR, G.K., DRAKATE, R. and ANDRADE, R. Correlation of vertical electrical sounding and borehole-log data for delineation on saltwater and freshwater aquifers. *Geophysics*. Vol. 71, no. 1, 2006, pp. g11-g20.
- HÖRDT, A., BLASCHEK, R., KEMNA, A. and ZISSER, N. Hydraulic conductivity estimation from induced polarization data at the field scale- the Krauthausen case history. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 62, 2007, pp. 33-46.
- KELLY, W.E. Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. *Ground Water*. Vol. 14, no. 6, 1977, pp. 420-425.
- KELLY, W.E. and REITER P.F. Influence of anisotropy on relations between electrical and hydraulic properties of aquifers. *Journal of Hydrology*. Vol. 74, 1984, pp. 311-321.
- KOSINSKI, W.K. and KELLY, W.E. Geoelectric soundings for predicting aquifer properties. *Ground Water*. Vol. 19, no. 2, 1981, pp. 63-171.
- LIMA, O. and NIWAS, S. Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements. *Journal of Hydrology*. Vol. 235, 2000, pp. 12-26.
- LUNA-SÁEZ, D., SÁNCHEZ-REYES, C. y MUÑOZ-PARDO, J. Métodos para medir la conductividad hidráulica saturada de campo. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XX, núm. 2, abril-junio de 2005, pp. 95-107.
- MASSMANN, J. and JOHNSON, L. Exercises illustrating flow in porous media. *Ground Water*. Vol. 39, núm. 4, 2001, pp. 499-503.
- MAZÁ, O., CÍSLEROVÁ, M. and VOGEL, T. Application of geophysical methods in describing spatial variability of saturated hydraulic conductivity in the zone of aeration. *Journal of Hydrology*. Vol. 103, 1988, pp. 117-126.
- NIWAS, S. and SINGHAL, D.C. Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouk parameters in porous media. *Journal of Hydrology*. Vol. 50, 1981, pp. 393-399.
- NOURBEHECHT, G.P.E. *Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their applications in certain geoelectric problems*. Tesis doctoral. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Geology and Geophysics, 1963, 121 pp.
- ORELLANA, E. *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Segunda edición. Madrid: Paraninfo, 1982, 578 pp.
- PEINADO-GUEVARA, H. *Uso de las propiedades geoeléctricas de un acuífero para su caracterización hidráulica (conductividad y transmisividad) y calidad del agua*. Tesis de maestría. Guasave, México: CIIDIR Sinaloa, IPN, 2006, 63 pp.
- PONZINI, G., OSTROMAN, A. y MOLINARI, M. Empirical relation between electrical transverse resistance and hydraulic transmissivity. *Geoexploration*. Vol. 22, 1984, pp. 1-15.
- RAGHUNATH, H.M. *Ground Water*. Second edition. New Delhi: Wiley Eastern Ltd, 1987, 563 pp.
- SHEVNIN, V., DELGADO-RODRÍGUEZ, O., MOUSATOV, A. and RYJOV, A. Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. *Geofísica Internacional*. Vol. 45, no. 3, 2006, pp. 195-207.

TONG, M., LI, L., WANG, W. and JIANG, Y. A time-domain induced-polarization method for estimating permeability in a shaly sand reservoir. *Geophysical Prospecting*. Vol. 54, 2006, pp. 623-631.

URISH, D.W. Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationships in glacial outwash aquifers. *Water Resources Research*. Vol. 17, no. 5, 1981, pp. 1401-1408.

Abstract

PEINADO-GUEVARA, H.J., HERRERA-BARRIENTOS, J. & LADRÓN-DE-GUEVARA-TORRES, M.A. Determining hydraulic conductivity by electrical resistivity measures. *Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XXIV, no. 4, October-December, 2009, pp. 123-134.

Hydraulic conductivity is a driving parameter in water porous flow in an aquifer. This is included in Darcy's porous flow equation which is an empirical law derived from experiments in flow of water through filter sands by Henry Darcy in 1856. This law is analogous to other laws which govern some other natural flows such as heat flow, electrical current flow, mass flow, etc. These flows have in common that they depend on a quantity called conductivity and a gradient. The analogy among them allows supposing that there is some interference and coupling among them, therefore allowing the establishment of some relationships between electrical and hydraulic properties from experimental observations. Some experimental data are presented that show the empirical relationships between the formation factor and the hydraulic conductivity for 16 different locations where the textural material of the aquifer was determined. The hydraulic and electrical parameter relationships constitute a practical help for drilling new wells south of the Guasave Valley in the State of Sinaloa.

Keywords: vertical electrical survey, resistivity electrical, hydraulic conductivity, permeameter, formation factor, texture, Archie, Darcy's law.

Dirección institucional de los autores:

Héctor José Peinado-Guevara

Instituto de Geología
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
04510 México, D.F.
fax: + (52) (55) 5550 6644
hpeinado75@hotmail.com

Jaime Herrera-Barrientos

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de
Ensenada (CICESE), Baja California
Km 107 carretera Ensenada-Tijuana 3918
Zona Playitas
22860 Ensenada, Baja California, México
teléfono: + (52) (646) 1750 500
jherrera@cicese.mx

María de los Ángeles Ladrón-de-Guevara-Torres

Instituto Politécnico Nacional
Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral
Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca
Hornos 1003, Colonia Noche Buena
teléfonos: + (52) (951) 5170 610, 5170 400 y 5171 199, extensión
82716
Santa Cruz Xoxocotlan, Oaxaca, México
mladron_99@hotmail.com