

RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE UN ACUÍFERO Y PARAMETROS GEOELECTRICOS EN UN SECTOR DEL NORESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES.

Perdomo, S.^(1,2); Ainchil, J.⁽¹⁾; Kruse, E.⁽³⁾.

⁽¹⁾ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Paseo del Bosque s/n. La Plata. Buenos Aires. Argentina. Tel/Fax: (0221) 4236593 int 162. santiago.perdomo@fcaglp.unlp.edu.ar

⁽²⁾ Comisión de Investigaciones Científicas

⁽³⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Universidad Nacional de La Plata. kruse@fcnym.unlp.edu.ar

La estimación convencional de parámetros hidrogeológicos se efectúa a través de ensayos de bombeo los cuales brindan resultados que son representativos puntualmente. El conocimiento hidrológico subterráneo y la información obtenida a través de distintas metodologías indirectas, permite plantear la posibilidad de reconocer las relaciones existentes entre las propiedades geofísicas y los parámetros hidrogeológicos. El objetivo de este trabajo es definir la potencialidad del método eléctrico para proporcionar estimaciones cuantitativas de los parámetros hidrogeológicos en un sector del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) permiten interpretar adecuadamente el contraste de resistividades entre los sedimentos Pampeanos, las Arenas Puelches y las arcillas de la Formación Paraná, principales unidades hidrogeológicas de la región. En los alrededores de La Plata se efectuaron 8 SEV ubicados próximos a pozos de estudio, se analizaron 38 perfilajes geofísicos en pozos cuya profundidad supera a las Arenas Puelches. En cada pozo se registraron tres perfiles de resistividad, radiación gamma natural y potencial espontáneo. Se analizaron también los datos provenientes de los ensayos de bombeo de dichas perforaciones. A partir del ajuste de una curva de regresión entre valores estimados de conductividad hidráulica (ensayos de bombeo) y valores del factor de formación (estudios resistividad) se planteó una relación de conversión entre ambos. Así es posible estimar este parámetro hidráulico para las Arenas Puelches en la región de estudio, previo a realizar una perforación exploratoria. La realización de SEV y perfilajes de pozos pueden proveer estimadores de parámetros hidrogeológicos, constituyendo información complementaria valiosa.

Palabras clave: geofísica - perfilaje de pozos - sondeos eléctricos verticales - hidrogeología

Long time pumping tests provide reliable hydrogeological parameters, only representative near the well region. Through underground hydrological knowledge together with information from geophysical techniques, it is possible to asses a relationship between hydrogeological parameters and geophysical properties. The main objective of this study is to evaluate the capacity of geoelectrical methods for providing quantitative hydrogeological parameters estimators in a Northeastern Region of Buenos Aires Province. Vertical Electric Soundings (VES) have probed to be adequate to distinguish the resistivity contrast of the main hydrogeological units, Pampeanos sediments (clayey silt), Arenas Puelches (sand) and clays in Paraná Formation. In the surroundings of La Plata city 8 VES and 38 well profiles were carried out, measuring electrical resistivities, natural gamma radiation and spontaneous potential. From some of these boreholes also pumping tests were analyzed. A regression curve was adjusted between estimated values for hydraulic conductivity (pumping test) and formation factor (resistivity), providing a conversion law for this region. VES and borehole profile can provide very good hydraulic conductivity estimators, establishing valuable additional information.

Keywords: geophysics - well profile - vertical electric soundings - hydrogeology

INTRODUCCION

Conocer en detalle las características de un acuífero es relevante, no sólo para mejorar su explotación, sino para protegerlo de posibles contaminaciones, tanto naturales como antrópicas y evaluar la eficiencia en posibles procesos de remediación.

Las determinaciones de la conductividad hidráulica (K) de un acuífero se efectúan generalmente a través de ensayos de bombeo de pozos. Esta metodología permite conocer el comportamiento puntual del acuífero, por lo que para estimarlo a una escala mayor es necesario aumentar el número de perforaciones, con la consecuencia de requerir más tiempo de trabajo y elevar los costos. Además la distribución irregular de los mismos puede llevar a un modelo hidrogeológico inapropiado.

Las técnicas geofísicas en superficie permiten una rápida caracterización del medio, a reducidos costos. Con el método eléctrico, en particular, es posible delimitar las zonas de desarrollo de un acuífero, por contraste de las propiedades eléctricas de las rocas.

Varios autores ya han estudiado las relaciones entre las características de un acuífero y los parámetros eléctricos (Kelly, 1977; Heigold et al., 1979; Schimschal, 1981; Urish, 1981; Chen et al., 2001) debido a que las condiciones físicas que controlan el flujo de líquidos en un medio poroso controlan también el flujo de corriente eléctrica. Estos autores logran una buena relación entre los parámetros geofísicos con los hidráulicos a través de ecuaciones empíricas, pero reconocen que son sólo representativas de las características particulares de cada zona de estudio.

En el área considerada Ainchil et al (2006) señala que la asociación de registros geofísicos en los perfilajes de perforaciones es de utilidad para delimitar los sedimentos y los niveles acuíferos, en particular en el esquema hidrogeológico descrito posteriormente. A su vez se reconoce, que existen fuertes variaciones laterales en el espesor y granulometría de las Arenas Puelches. Ello tiene una influencia directa en variaciones significativas en la transmisividad y conductividad hidráulica de los niveles acuíferos.

El objetivo de este trabajo es encontrar una relación entre los parámetros geofísicos e hidráulicos para el acuífero Puelche en la zona de La Plata y alrededores, que permitan estimar la conductividad hidráulica y transmisividad a partir de mediciones eléctricas en superficie.

AREA DE ESTUDIO

Las características estratigráficas de la región son descritas por Auge et al. (2002), Laurencena et al. (2010), entre otros. Las unidades presentes y de mayor interés hidrogeológico serán enumeradas y descritas a continuación en forma decreciente temporalmente, siguiendo a los citados autores.

La Fm. Pospampeano corresponde a limos, arcillas, arenas, conchillas y conglomerados calcáreos de diferente origen (fluvial, eólico, marino, lacustre), acumulados en ambientes topográficamente deprimidos, como valles fluviales y bañados o lagunas.

La Fm. Pampeano está compuesta por limos arenosos y arcillosos de origen eólico y fluvial, conocidos genéricamente como loess. Poseen tonalidades castañas, amarillentas y rojizas y suelen estar intercalados por cuerpos calcáreos. La existencia de un estrato limo-arcilloso por encima de las Arenas Puelches, cumple la función de acuitardo.

La Fm. Arenas Puelches está constituida por una secuencia de arenas cuarzosas, medianas y finas, de colores blanquecinos y amarillentos. Son de origen fluvial y ocupan el Noreste de la Provincia de Buenos Aires, extendiéndose hacia el Norte hasta Entre Ríos y hacia el Noroeste hasta Santa Fe y Córdoba (Auge op. cit.). En La Plata y alrededores se ha estimado un espesor medio de 20 metros y se ubica entre una profundidad mínima de 20 metros y hasta una máxima que supera los 50 metros.

Por debajo de las Arenas Puelches se constituye la Fm. Paraná, formada por arcillas y arenas de origen marino. En la parte superior pueden encontrarse arcillas plásticas de tonos verdosos y azulados, arenas blanquecinas que pueden funcionar como acuífero.

La Fm. Olivos se encuentra por debajo de éstas y están constituidas también por arcillas y arenas pero de origen continental y de tonalidades rojizas.

El basamento hidrológico impermeable está constituido por rocas cristalinas de tipo gneis granítico, alcanzado por la Perforación Plaza de Armas a 486 m y puede asimilarse al que aflora en las Sierras de Tandil, en la isla Martín García y en la costa uruguaya.

Según González (2005), el comportamiento hidrogeológico de las Arenas Puelches, lo convierte en la principal fuente de almacenamiento y explotación de agua potable de la región. En general, el Pampeano se comporta como un acuífero de baja a media productividad, y funciona como recarga y descarga del acuífero Puelche, pudiendo conducir la contaminación producida por la actividad agrícola e industrial (Auge, 2005). Las arcillas de la Fm. Paraná funcionan como acucludo y basamento hidrogeológico del acuífero Puelche.

MATERIALES Y METODOS

Mediante el perfilaje de pozo es posible la determinación de parámetros físicos de las rocas de manera directa. Las herramientas más comúnmente utilizadas en hidrogeología miden Potencial Espontáneo, Resistividad y radiación Gamma Natural.

La interpretación de los perfilajes geofísicos (Schlumberger, 1958) se realizó mediante la comparación cualitativa de las variaciones registradas en las curvas. Estas permiten estimar con buena precisión el piso y techo de las Arenas Puelches, su respuesta eléctrica y las características del Pampeano.

La ubicación de los 38 pozos donde se realizaron los perfilajes puede verse en la figura 1. Así como las posiciones de los 9 sondeos eléctricos verticales.

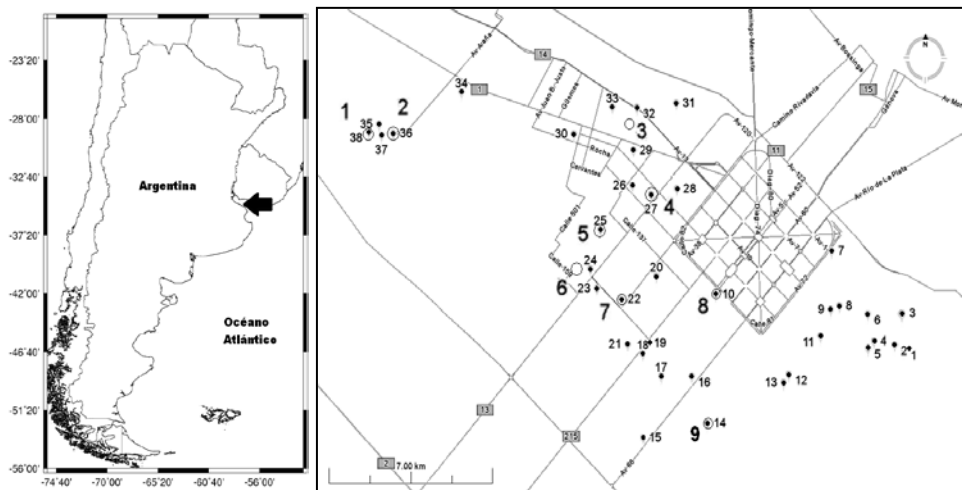


Figura 1. Ubicación del área de estudio, de los pozos con perfilajes geofísicos y SEV.

Los sondeos eléctricos verticales (SEV), permiten conocer la distribución vertical de resistividades, a través de mediciones en superficie, y su posterior inversión. Aunque los SEV poseen menor resolución que los datos obtenidos en el pozo, si existe un contraste marcado de resistividad, las interpretaciones suelen ser muy precisas.

RESULTADOS

Generalidades

La figura 2 muestra un ejemplo de los datos de perfilaje analizados.

Los primeros 45 metros muestran una zona con pocas variaciones en los registros de radiación y resistividades. Entre los 50 y 75m el registro de gamma natural evidencia lecturas bajas en correspondencia con un aumento en las resistividades. Por debajo de los 75m las lecturas de la radiación natural vuelven a aumentar y la resistividad disminuye significativamente.

La asignación litológica permite reconocer que los sedimentos Pampeanos presentan valores de 50 CPS para el registro de Gamma Natural y de 15 Ohm.m o inferior, en los datos de resistividad.

La unidad de las Arenas Puelches presenta un descenso en la lectura de radiación, inferior a 20 CPS, y un aumento en la resistividad, superior a 30 Ohm.m.

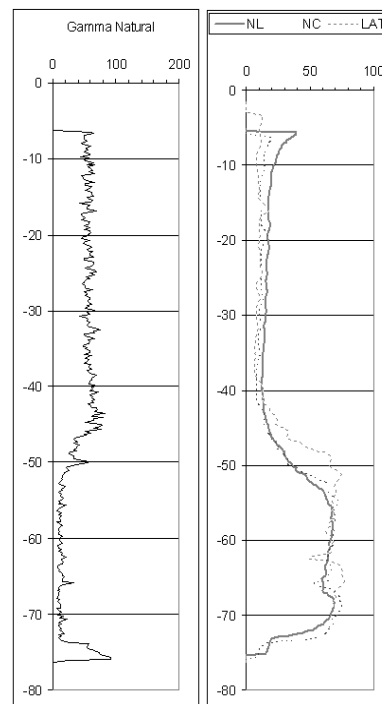


Figura 2. Perfilaje geofísico.

Por último las arcillas de la Fm. Paraná registran lecturas superiores a 60 CPS e inferiores a 5 Ohm.m, para las mismas propiedades.

Ejemplo de SEV

La figura 3 muestra los datos medidos, el modelo propuesto y la curva calculada para uno de los SEV realizados. La ubicación es próxima al pozo antes analizado. El ajuste de ambas curvas presenta un error inferior al 5%.

El corte geoelectrico propuesto consta de 4 capas. Se observa una primera capa superficial de pocos metros de espesor, subyace una capa de resistividad inferior a 10 Ω m hasta los 40m. Luego aparece una capa con un espesor de 30m y una resistividad de 50 Ω m. Finalmente, la última, evidencia un marcado descenso de la resistividad.

En este sondeo es posible reconocer fácilmente la profundidad del techo y base de las Arenas Puelches. En la zona de estudio las formaciones descritas anteriormente presentan contrastes eléctricos que pueden ser detectados con esta metodología.

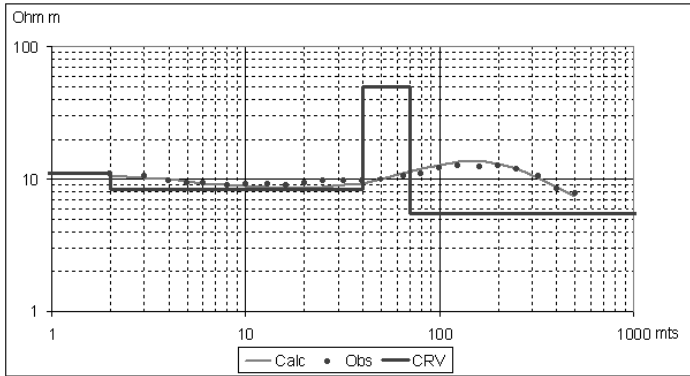


Figura 3. Ejemplo de SEV. Se grafica la curva observada (Obs), la curva de resistividad verdadera (CRV) y curva calculada (Calc).

Correlación parámetros hidráulicos y eléctricos

Teniendo una roca porosa saturada por un electrolito, con sus poros interconectados, es posible asumir que la conducción eléctrica se debe principalmente a la presencia del fluido. Es así que es válida la ecuación 1:

$$\rho_r = FF\rho_a \tag{1}$$

En donde ρ_r es la resistividad de la roca, FF se denomina factor de formación y ρ_a es la resistividad del electrolito, el cual puede ser fácilmente inferido si se conoce su composición. La importancia de esta ecuación radica en que la resistividad de la muestra es proporcional al contenido y al tipo de agua que la satura.

El factor de formación contempla distintos parámetros físicos y geométricos de una roca, como es la tortuosidad y la porosidad. Estos parámetros que son responsables de controlar el flujo de corriente también controlan el flujo lateral de agua en medios porosos (de Lima, 2000), es por esto que se han propuesto relaciones empíricas para vincular los parámetros eléctricos y los parámetros hidráulicos de un acuífero (Singh, 2005; Shevvin, 2006; Sinha, 2009).

Los valores estimados de la conductividad hidráulica (ensayos de bombeo) y el factor de formación calculado a partir de la resistividad normal larga, pueden ajustarse siguiendo una relación potencial de este tipo:

$$K = aFF^m \tag{2}$$

siendo a y m las constantes a determinar.

Otros autores proponen una relación entre la transmisividad hidráulica (T) y la resistencia transversal (RT), ya que ambas magnitudes dependen además del espesor del acuífero (Sri Niwas y Singhal, 1981).

En la Tabla 1, se indican los valores de conductividad hidráulica (K en metros/día) estimada a partir de los ensayos de bombeo y el factor de formación para los seis pozos en los que se cuenta con información hidráulica y geofísica.

Debe aclararse que los datos de los parámetros hidrogeológicos han sido tomados de ensayos de bombeo convencionales y ante la falta de información, a partir de datos del rendimiento específico. Es decir el cociente entre el caudal bombeado y el descenso medido, que presenta una relación directa con la transmisividad (Custodio y Llamas, 1983)

$$\frac{Q}{s_p} = AT$$

El factor A que las vincula depende del radio del pozo y del radio de influencia.

El gráfico de la Figura 4 muestra los valores de FF y K con la curva de regresión ajustada.

Tabla 1. Mediciones del Factor de Formación y Conductividad Hidráulica.

FF	K (m/d)
3,6	22
2,8	17
3,7	18
3,6	22
4,3	31
5,8	42

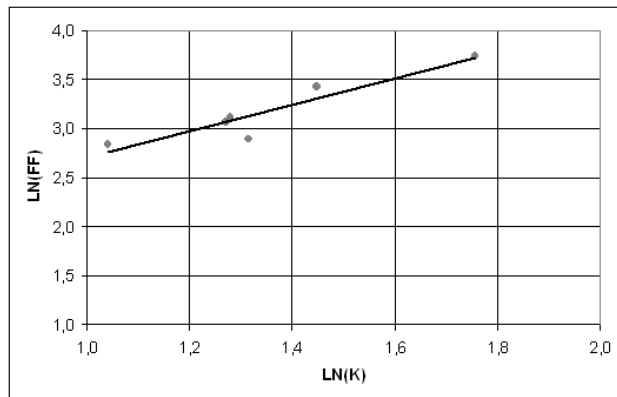


Figura 4. Curva de ajuste de FF vs K. R=0.86

Con estos datos se obtuvo una ley de conversión, que permitió estimar valores de conductividad a partir del factor de formación en otros pozos.

$$K = 3.8FF^{1.4}$$

Posteriormente, se graficó la transmisividad estimada mediante esta ley y la resistencia transversal calculada (Figura 5) para el resto de los pozos, donde sólo se contaba con los perfilajes geofísicos. Esta relación de conversión permite utilizar adecuadamente el dato provisto por un SEV.

Tabla 2. Estimaciones de T (m²/d) con la ley propuesta.

SEV	RT	Tsev	Tpp
LH1	578	303	317
LH2	1000	586	575
LH3	1600	988	637
AS1	1500	921	717
AS2	1500	921	931
HZ1	525	268	131
HZ2	945	502	353
GT2	910	526	1032

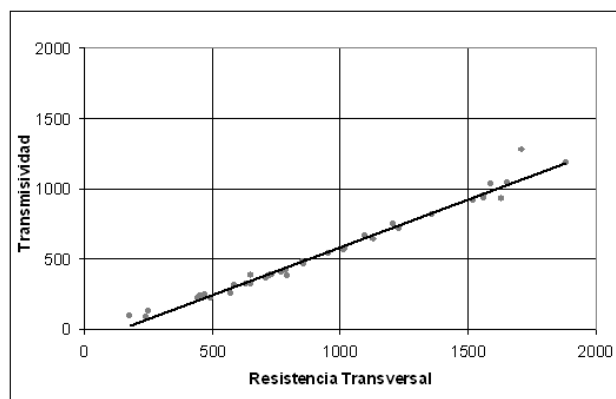


Figura 5. Resistencia Transversal (Ohm m²) vs. Transmisividad (m²/d)

Se realizaron posteriormente ocho SEV en las proximidades de los pozos, calculando la resistencia transversal para la unidad Arenas Puelches, se estimó la transmisividad y se la comparó con la estimada a partir de los perfilajes de pozo (Tabla 2).

En la Figura 6, el gráfico de columnas muestra los valores de T obtenidos para cada SEV y perfilaje de pozo. La escala de representación T es logarítmica.

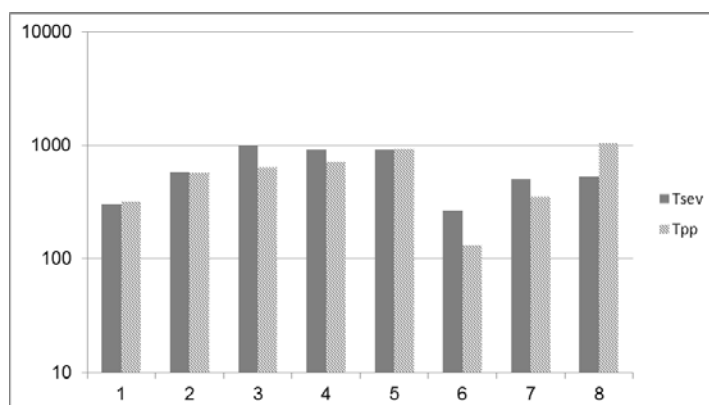


Figura 6. Transmisividad (m^2/d) estimada a través de los SEV y del perfilaje de pozo. La escala vertical es logarítmica.

CONCLUSIONES

Los métodos eléctricos han demostrado ser una importante herramienta en la caracterización de los acuíferos, reduciendo tiempo y costos en los estudios hidrogeológicos.

El objetivo propuesto fue encontrar una relación entre los parámetros geofísicos e hidráulicos para el acuífero Puelche en la zona de La Plata y alrededores. Para esto es necesario contar con registros geofísicos y ensayos de bombeo en las mismas perforaciones de manera de estimar una ley confiable de conversión.

El factor de formación resulta una magnitud aparente si existen arcillas en las arenas. En este sentido los perfilajes de gamma natural constituyen una importante herramienta en la estimación del contenido de arcilla en las Arenas Puelches para efectuar una corrección adecuada.

Posteriormente, a partir de mediciones de resistividad eléctrica en superficie se estimaron valores de T y K a través de esta ley. Estos parámetros están en buena correspondencia a los inferidos mediante ensayos de bombeo y a los referidos en trabajos de otros autores (Auge, 2005).

Los valores obtenidos a partir de la resistencia transversal (resistividad normal larga y espesor) en perfilajes de pozo y SEV, muestran muy buen acuerdo (Figura 6), las diferencias más significativas se presentan en HZ1 y GT2. Sin embargo, se espera que las estimaciones mejoren con el aumento de datos e información.

Actualmente se está incorporando mayor cantidad de datos provenientes de ensayos de bombeo y determinaciones de resistividad, para conseguir robustecer la ley propuesta. También se buscará establecer estimadores de confiabilidad a partir de la comparación con nuevas determinaciones de transmisividad hidráulica en ensayos de bombeo de larga duración.

REFERENCIAS

- Ainchil, J.; Kruse E.; Calahorra F.** 2006. Variaciones Laterales den los sedimentos de los acuíferos Pampeano y Puelche (Noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina). Memorias del VII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Asunción, Paraguay.
- Auge, M.P. Hernández, M.A y Hernández, L.** 2002. Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la Provincia de Buenos Aires - Argentina. XXXIII International Hydrogeology Congress. Proceedings. pp 624-633. Mar del Plata.
- Auge, M.P.** 2005. Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. 293-311. La Plata.
- Chen, J., Hubbard, S., and Rubin Y.** 2001. Estimating Hydraulic Conductivity at the South Oyster Site from Geophysical Tomographic Data using Bayesian Techniques based on the Normal Linear Regression Model, Water Resources. Res., 37, 6, 1603–1613.
- Custodio E. y Llamas M.R.** 1983. Hidrología Subterránea. Tomo I y II. Ediciones Omega S.A. Barcelona.
- de Lima, O.A.L., y Sri Niwas.** 2000. Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geological measurements. Journal of Hydrology, vol.235, pp 12-26.
- Gonzalez, N.** 2005. Los ambientes hidrogeologicos de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. pp 359-374. La Plata.
- Heigold, P.C., R.H. Gilkson, K. Cartwright, y P.C. Reed.** 1979. Aquifer transmissivity from surficial electrical methods. Groundwater, vol.17, pp. 338-345.
- Kelly, W.E.** 1977. Geoelectric sounding for estimating hydraulic conductivity. Groundwater, vol.15, pp 420-425.
- Laurencena, P.,Deluchi, M., Rojo, A y Kruse, E.** 2010. "Influencia de la explotación de aguas subterráneas en un sector del área periurbana de La Plata". Revista de la Asociación Geológica Argentina 66 (4): 484 – 491.
- Schimschal, U.** 1981. The relationship of geophysical measurements to hydraulic conductivity at the Brantley Dam Site, New Mexico. Geoexploration 19, 115–126.
- Schlumberger Well Surveying Corp.,** 1958. Perfilaje de Pozos. Documento 8. Ed. Shulemberger.
- Shevnin, V.; Delgado-Rodríguez, O.; Mousatov, A.; y Ryjov,A.** 2006. Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. Geofísica Internacional, Vol. 45, Num. 3, pp. 195-207.
- Singh, K.P.** 2005. Nonlinear estimation of aquifer parameters from surficial resistivity measurements. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 2, 917–938.
- Sinha, R.; Israil, M. and Singhal, D.C.** 2009. A hydrogeophysical model of the relationship between geoelectric and hydraulic parameters of anisotropic aquifers. Hydrogeology Journal 17: 495–503.
- Sri Niwas, Singhal, D.C.** 1981. Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouk parameters in porous media. Hydrol. J. 50, 393–399.
- Urish, D.W.** 1981. Electrical resistivity–hydraulic conductivity relationships in glacial aquifers. Water Resour. Res. 17, 1401–1407.