

FIGURA 3. Correlación estadística entre el logaritmo de la resistencia transversal y la velocidad de dilución de intervalos cuasihomogéneos para 6 pozos del acuífero.

CONCLUSIONES

El estudio de dependencias estadísticas entre la velocidad del flujo del agua subterránea y las propiedades colectoras obtenidas de la interpretación de registros geofísicos en pozos del acuífero cársico estudiado permite afirmar que:

- Aún en condiciones hidrogeológicas complejas, existen determinadas relaciones entre los parámetros colectores e hidrodinámicos que no son relaciones universales, sino dependencias empíricas, particulares para cada situación concreta, que son de gran utilidad práctica para el estudio integral de los acuíferos en la protección y monitoreo de las aguas subterráneas.
- La variación de la porosidad y la arcillosidad condiciona el comportamiento de los parámetros hidrodinámicos del colector.
- Para colectores con alto contenido de arcilla, el parámetro de arcillosidad relativa es el que define el comportamiento de la velocidad del flujo de agua subterránea.
- Al ser la resistencia transversal de las capas un parámetro integral, capaz de reflejar la heterogeneidad y la anisotropía del medio geológico, resulta un parámetro geoelectrónico de gran utilidad para el estudio de las propiedades hidrodinámicas de acuíferos de estructura compleja como es el caso de los acuíferos cársicos.

BIBLIOGRAFÍA

- ALFONSO, J.: *Estadística en las ciencias geológicas*, 2t., ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1989.
- ESCARTÍN, E. y W. RODRÍGUEZ: *Manual del usuario del sistema MULVAR*, 78 pp., Dpto. de Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1988.
- GRINBAUM, I.I.: *Métodos geofísicos para determinar la filtración en los poros de las rocas*, 120 pp., Nedra, Moscú, 1965 (en ruso).

KELLY, W.E. y P.F. REITER: «Influence of anisotropy on relations between electrical and hydraulic properties of aquifers», *Journal of Hydrology*, no. 74, pp. 311-321, 1984.

KELLY, W.E.; T. GORMAN y B. CURTIS: «Relationships between the unsaturated electrical and saturated hydraulic properties of soils», *Journal of Hydrology*, no. 109, pp. 115-123, 1989.

KOBR, M.: *Poder de resolución de los métodos geofísicos en las calas hidrogeológicas e ingeniero geológicas*, 134 pp., IMTA, Ciudad México, 1992.

KOBR, M.; M. STANISLAV y Z. ANTONIN: «Testificaciones geofísicas no convencionales aplicadas a la hidrodinámica de acuíferos», *Tecnología del agua*, pp. 62-71, febrero, 1993.

MARES, S.: *Interpretación compleja de carotaje en las investigaciones hidrogeológicas e ingeniero geológicas*, Texto de la Facultad de Ciencias Naturales, 110 pp., Universidad de Carlos, Praga, 1985.

MAZAC, O. y W.E. KELLY: «Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies», *Journal of Hydrology*, no. 93, pp. 163-176, 1987.

PÉREZ, F.D.: *Hidráulica subterránea*, 424 pp., Científico-Técnica, Ciudad de La Habana, 1982.

Principios/Aplicaciones de la interpretación de registros, 197 pp., Schlumberger, Educational Services, 1988.

REINHARD, K.F. y W.E. KELLY: «The relation between hydraulic transmissivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposits», *Journal of Hydrology*, no. 79, pp. 215-229, 1985.

RODRÍGUEZ, W. y R. VALCARCE: *Manual del usuario del sistema SAICAR*, 90 pp., Dpto. Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1992.

RUIZ, J. y M. KOBR: *Métodos geofísicos en pozos*, 417 pp., ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1988.

VALCARCE, R.M. et al.: *Manual del usuario del sistema HIDROG*, 30 pp., Dpto. Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1992.

VALCARCE, R.M.: *Métodos geofísicos en pozos para el estudio de acuíferos cársicos*, Tesis de Maestría, 74 pp., Dpto. Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1995.

Evaluación del coeficiente de distorsión del campo hidrodinámico (α) para la interpretación del método de dilución de sal

Ing. Rosa M. Valcarce Ortega
Ing. Jacqueline González Espinosa
Ing. Hilda Irene Maceira García

Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría»

RESUMEN: Se expone una metodología para evaluar el coeficiente de distorsión del campo hidrodinámico de forma continua a lo largo de una cala, empleando los resultados del método de resistividad con salinización de ensayos hidrogeológicos, y de la interpretación de registros geofísicos en pozos convencionales que reflejen las propiedades colectoras de las rocas. La aplicación de esta metodología permite evaluar con mayor precisión la relación entre la velocidad de filtración aparente medida en el pozo y la velocidad de filtración real del agua subterránea en las rocas.

ABSTRACT: This paper shows a methodology to evaluate the coefficient of distortion of hydrodynamical field continually in the well; from results of hydrogeological tests and the interpretation of conventional well logs that reflect the collector properties of rocks. This methodology lets to evaluate with high accuracy the relation between the values of velocity flow of groundwater measure in the well and the real values of velocity flow of groundwater.

La Geofísica de Pozo abarca una serie de métodos especiales que permiten solucionar la tarea de la dinámica del agua en los pozos y evaluar las propiedades de filtración de las rocas. Estos métodos tienen la ventaja de poder determinar con elevada precisión y a diferentes intervalos a lo largo de la cala, el gasto parcial de horizontes individuales, la velocidad de filtración del agua subterránea, el coeficiente de filtración y la transmisividad del acuífero.

Las pruebas hidrogeológicas en general, brindan un valor promedio de estos parámetros para todo el espesor del acuífero, y nos permiten estudiar la variación de los mismos a lo largo del pozo, lo cual resulta de gran importancia en el estudio detallado de las características hidrogeológicas del acuífero y en el monitoreo de la contaminación de las aguas. Debe destacarse también el relativo bajo costo de los métodos geofísicos en pozos en comparación con las pruebas hidrogeológicas.

Para el estudio del flujo horizontal en un pozo se puede emplear el método de dilución del líquido contaminado, el cual permite determinar la velocidad de filtración del agua subterránea (Kobr et al., 1993). El fundamento del método se basa en investigar la variación de la concentración de un indicador con el tiempo, lo cual es una función de la velocidad de filtración del agua subterránea. Como indicador puede emplearse el cloruro de sodio (método de resistividad con salinización), un colorante (método de fotometría) o un material radiactivo que no sea absorbido y que tenga un período de desintegración adecuado (método de trazador radiactivo).

Para la evaluación de los parámetros hidrodinámicos en este trabajo se empleó el método de resistividad con salinización, o método de dilución de sal.

A partir de la interpretación del método de resistividad con salinización es posible calcular la velocidad de dilución del electrolito en la cala (Ginbaum, 1965). La relación entre esta velocidad y la velocidad de filtración del agua subterránea en las rocas es igual a:

$$V_f = \frac{V_d}{\alpha} \quad (1)$$

donde: V_d es la velocidad de dilución del electrolito en la cala; V_f , la velocidad de filtración del agua subterránea en el acuífero; α , el coeficiente de distorsión del campo hidrodinámico, o lo que es lo mismo, relación entre la velocidad de filtración en el pozo y en la roca.

El parámetro α puede variar en un rango relativamente amplio, entre 0,5 y 4, y es necesario realizar un amplio análisis con el objetivo de determinar su valor óptimo en las diferentes situaciones hidrogeológicas e hidrodinámicas que pueden presentarse en la práctica.

El coeficiente de filtración o conductividad hidráulica (Kf) puede ser calculado conociendo los valores de la velocidad de filtración y del gradiente hidráulico, aplicando la ley exponencial del flujo (Pérez, 1982; Kobr, 1993) que expresa:

$$Kf = \frac{Vf_p}{(Gl)^n} \quad (2)$$

donde: Vf , velocidad de filtración promedio para un intervalo determinado; Gl , gradiente hidráulico calculado en base al mapa de hidroisohipsas; n , exponente del flujo que puede variar entre 0,5 (para flujo turbulento) y 1 (para flujo laminar puro).

La transmisividad puede evaluarse a partir de:

$$T = Kf \cdot H \quad (3)$$

donde: Kf , conductividad hidráulica promedio del acuífero y H , espesor específico del acuífero.

Resulta evidente que el parámetro α es determinante para evaluar Vf , y por tanto para evaluar Kf y T . Para el caso de calas no encamisadas con paredes bien permeables, la literatura recomienda $\alpha = 2$, aunque se señala que para transformar la velocidad aparente (Vd) en real (Vf), es mejor usar una relación de correlación determinada experimentalmente (Mares, 1976).

Metodología propuesta para la evaluación del parámetro

En la literatura (Javandel *et al.*, 1969; Molz *et al.*, 1993) se demuestra que en acuíferos estratificados ideales, el flujo en el radio del pozo rápidamente se convierte en horizontal, aún para grandes contrastes de permeabilidad entre las capas.

Realmente, los acuíferos en general, no están compuestos de capas horizontales homogéneas, pero esta suposición es mucho más cercana a la realidad que asumir que el acuífero está compuesto de una sola capa homogénea como ocurre en los análisis clásicos de pruebas de bombeo.

En condiciones de flujo natural, sin someter el pozo a bombeo, el acuífero se encuentra entregando cierto caudal de agua al pozo, proporcional a la conductividad hidráulica del acuífero. En estas condiciones, a partir del método de resistivimetría con salinización, es posible calcular el gasto por cada metro de espesor del acuífero, o sea, la afluencia unitaria (qi), a partir de la ecuación diferencial de equilibrio de la sal (Kobr, 1992).

El perfil completo de la afluencia unitaria (qi) a lo largo del pozo, representa el gasto total de agua que entrega el acuífero al pozo (Q) en condiciones de flujo natural, lo cual es una función de la conductividad hidráulica del acuífero para un gradiente hidráulico constante.

Podemos plantear entonces que en condiciones de flujo natural horizontal:

$$qi = \beta \cdot \Delta Zi \cdot Ki \quad (4)$$

donde: β , coeficiente de proporcionalidad; ΔZi , espesor del intervalo acuífero, que en este caso es igual a uno.

Para todo el espesor del acuífero se cumple que:

$$\sum_{i=1}^m qi = Q = \beta \sum_{i=1}^m \Delta Zi \cdot Ki \quad (5)$$

donde: m es el número de intervalos acuíferos de un metro de espesor.

Al dividir ambos miembros por el espesor total del acuífero (H) tenemos:

$$\frac{Q}{H} = \frac{\beta \sum_{i=1}^m \Delta Zi \cdot Ki}{H} \quad (6)$$

entonces,

$$\frac{Q}{H} = \beta \bar{K} \quad (7)$$

donde: \bar{K} es la conductividad hidráulica promedio del acuífero de espesor H , determinada por ensayos hidrogeológicos, en régimen de flujo lineal.

De la ecuación (7) se obtiene:

$$\beta = \frac{Q}{H \cdot \bar{K}} \quad (8)$$

y como $\Delta Zi = 1$, se obtiene finalmente:

$$\frac{Ki}{\bar{K}} = \frac{qi}{Q/H} \quad (9)$$

por tanto:

$$Ki = \frac{qi}{Q/H} \cdot \bar{K} \quad (10)$$

De esta manera se puede estudiar la variación de la conductividad hidráulica (Ki) a lo largo del pozo, conociendo la afluencia unitaria (qi) y el caudal total de agua que entrega el acuífero al pozo en condiciones de flujo natural (Q), el espesor del acuífero (H) y la conductividad hidráulica promedio (\bar{K}) determinada por ensayos hidrogeológicos.

Una vez determinada Ki para cada intervalo, es posible evaluar Vf según la ecuación (2).

Para estimar el valor del coeficiente α se calcula:

$$\alpha = \frac{Vd}{Vf} \quad (11)$$

Con el objetivo de explorar la posibilidad de evaluar el coeficiente α a lo largo de cada cala a partir de registros geofísicos en pozos, se propone estudiar la correlación estadística entre α y parámetros geofísicos en pozos que en cierta medida reflejen las propiedades colectoras de las rocas.

RESULTADOS

La metodología explicada para la determinación del coeficiente fue aplicada en pozos de un área de la Cuenca Sur de La Habana (Figura 1), la cual constituye un acuífero cársico (Valcarce, 1995).

En los acuíferos cársicos, dada la gran anisotropía de las rocas, las metodologías para evaluar los parámetros hidrodinámicos se encuentran en constante perfeccionamiento y, según nuestro criterio, la combinación de los métodos de investigación hidrogeológicos y geofísicos ofrece los resultados más confiables.

Fueron analizados tres pozos del área mencionada y se obtuvo que el coeficiente α varía entre 2,5 y 4.

Se estudió la correlación lineal simple entre: α y el factor de formación de la resistividad (F); α y la porosidad efectiva (ϕ_{ef}); y el parámetro duplo diferencial de la intensidad gamma natural (ΔIg) (Alfonso, 1989; Escartín *et al.*, 1989). Todos estos parámetros fueron determinados a partir de la interpretación de los registros geofísicos en pozos (Kobr, 1992). Los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 1.

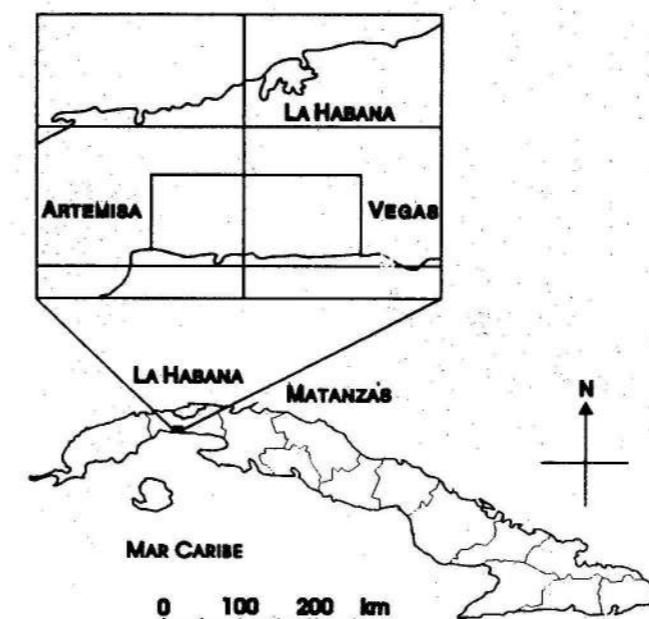


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio.

TABLA 1. Coeficientes de correlación lineal simple obtenidos entre el parámetro α y parámetros de interpretación de los Registros Geofísicos en Pozo

Ecuación	r	Análisis de la correlación
$\alpha = 0,18 F + 2,19$	0,82	Estable
$\alpha = 2,05 \log (F) + 1,74$	0,80	Estable
$\alpha = -5,51 \phi_{ef} + 5,31$	-0,80	Estable
$\alpha = -5,17 \log \phi_{ef} + 1,01$	-0,83	Estable
$\alpha = -1,46 \Delta Ig + 3,52$	-0,46	No existe correlación

Excepto para el modelo que considera el ΔIg como variable predictora, las correlaciones son estables para un 95 % de probabilidad.

La correlación múltiple entre los parámetros α , F y ΔIg también fue estudiada resultando un coeficiente de correlación lineal múltiple igual a 0,86.

CONCLUSIONES

La metodología de interpretación del método de resistivimetría con salinización propuesta en este artículo, permite obtener un registro continuo y más preciso de la conductividad hidráulica a lo largo del pozo, lo cual tiene gran importancia para la evaluación de impactos ambientales, en los estudios de contaminación y movimiento del agua subterránea y, en general, para el mejor conocimiento de las propiedades hidrodinámicas de los acuíferos.

La metodología propuesta permite utilizar valores adecuados del coeficiente de distorsión del campo hidrodinámico (α) para la interpretación del método de dilución de sal en diferentes condiciones hidrogeológicas e integrar los resultados obtenidos por geofísicos e hidrogeólogos.

Para el estudio de acuíferos formados en colectores intergranulares donde el grado de anisotropía de las propiedades colectoras e hidrodinámicas es menor, la metodología de interpretación propuesta debe presentar una efectividad aún superior.

BIBLIOGRAFÍA

ALFONSO, J.: *Estadística en las ciencias geológicas*, 2t., ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1989.
 ESCARTÍN, E. y W. RODRÍGUEZ: *Manual del usuario del sistema MULVAR*, 78 pp., Dpto. de Geofísica, ISPJAE, 1988 (inédito).
 GRINBAUM, I.I.: *Métodos geofísicos para determinar la filtración en los poros de las rocas*, 120 pp., Nedra, Moscú, 1965 (en ruso).
 JAVANDEL, I. y P. WITHERSPOON.: «A method of analysing transient fluid flow in multilayered aquifers», *Water Resources Research*, no. 5, pp. 856-869, 1969.

KOBR, M.: *Poder de resolución de los métodos geofísicos en las calas hidrogeológicas e ingeniero geológicas*, 134 pp. Ed. IMTA, México, 1992.

KOBR, M.; S. MARES y Z. ANTONIN: «Testificaciones geofísicas no convencionales aplicadas a la hidrodinámica de acuíferos», *Tecnología del agua*, pp. 62-71, febrero, 1993.

MARES, S.: *Interpretación compleja de carotaje en las investigaciones hidrogeológicas e ingeniero geológicas*, Texto de posgrado, 110 pp., Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Carlos, Praga, 1985.

MOLZ, F. y S.C. YOUNG: «Development and applications of borehole flowmeters for environmental assessment», *The log analyst*, pp. 13-23, enero-febrero, 1993.

PÉREZ, F.D.: *Hidráulica subterránea*, 424 pp., Ed. Científico Técnica, Ciudad de La Habana, 1982.

VALCARCE, R.: *Métodos geofísicos en pozo para el estudio de acuíferos cársicos*, Tesis de maestría, 74 pp., Dpto. de Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1995.

VALCARCE, R. y W. RODRÍGUEZ: *Manual del usuario del sistema HIDROG*, 30 pp., Dpto. de Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1992.

Consideraciones para la evaluación de las condiciones geoambientales de la Ciudad de Moa

Dr. Rafael Guardado Lacaba Instituto Superior Minero Metalúrgico

RESUMEN: Los trabajos de ordenamiento ambiental requieren de la evaluación de los factores ambientales, es decir de la capacidad del terreno, de su estabilidad, del grado de riesgos ambientales, y de los recursos naturales que posee. Estos elementos se han tomado en cuenta para la evaluación y modelación del territorio.

El trabajo expone un método para inventariar y evaluar las componentes ambientales más importantes aplicadas en los estudios ingeniero geológicos de áreas urbanas y suburbanas. Puede emplearse en las actividades de planificación física de terrenos, minas, agricultura, y otros. Se ofrecen tablas que ayudan en la evaluación del terreno.

ABSTRACT: Environment array works require certain evaluation test of the terrain stability and capacity. The environment hazard degree and its natural resources are considered also as main features of this system work, mainly to unfold the terrain modeling.

This paper shows a method designed to stock and quantify the main environmental components, found to be applied in geological engineering research of urban and suburban areas.

Con la introducción de la exigencia de evaluación de impacto ambiental, las actividades de minería, construcción, agricultura y otros sectores estarán sujetas a un nuevo modelo de planificación urbana que ubica en un mismo nivel criterios técnicos, económicos y ambientales en la toma de decisiones respecto a nuevas inversiones.

La evaluación de impactos ambientales es, en la actualidad, no sólo una actividad obligada y exigible, sino necesaria; viene impuesta por un criterio de racionalidad y de respeto al entorno dentro de la tónica de responsabilidad colectiva al tomar conciencia de la integración armónica de la obra en su enclave, esencial no sólo en un buen proyecto sino en el objetivo de lograr acrecentar el patrimonio de la colectividad. Esto es valioso para los trabajos de planeamiento y desarrollo urbano. Planear es conocer las necesidades, buscar un fin, reconocer las limitaciones del medio; es la voluntad de un grupo social de solucionar y organizar su mundo y sus relaciones; es saber encontrar la dirección adecuada para responder a un fin en un orden de sostenibilidad en la calidad de vida.

En el Programa de Acción de la Comunidad Económica Europea en materia de medio ambiente (1982-1986) puede leerse: «La evaluación de impactos ambientales debería ser introducida progresivamente en la preparación de todas las actividades humanas susceptibles de causar efectos significativos en el ambiente, como pueden ser, obras públicas y privadas, planes de ordenamiento del territorio...».

En Cuba, en 1992, fue modificada la Constitución de la República y recientemente el Parlamento Cubano aprobó la Ley del Medio Ambiente. El desarrollo y el incremento productivo de la industria minera metalúrgica y del sector agrícola y forestal, el crecimiento económico del territorio y del país, la apertura comercial y los programas de alimentación, turismo y otras, son elementos que presionan fuertemente la explotación de los georrecursos en el territorio de Moa. El período especial que vivimos en los últimos años, unido a estos problemas, van dejando atrás las normativas y legislaciones burocráticas que regulan el desarrollo económico y social de los años ochenta. En la última década se ha dado una relación proporcional entre crecimiento de la economía del territorio y deterioro del medio ambiente. Este deterioro se fundamenta en la ausencia de una adecuada y correcta planificación y ordenamiento ecológico del territorio y sus recursos naturales. ¿Cómo hablar de sostenibilidad y mucho menos de desarrollo sustentable sin tener en consideración el uso racional y equilibrado de los recursos?

El programa de ordenamiento territorial y de planificación integral es una tarea extensa y compleja, pero sobre todo multidisciplinaria, requiere de la participación de casi todas las disciplinas técnicas, científicas y sociales.

Dentro de esta perspectiva, la ingeniería geológica debe transformar su objeto de trabajo y tiene la responsabilidad de aportar la información necesaria sobre el medio ambiente y su dinámica, integrar los niveles básicos de información para su adecuado ordenamiento territorial. La ingeniería geológica debe entonces contribuir con la caracterización de las rocas y suelos, su valor potencial, su estructura, sus propiedades físico-mecánicas, la presencia de aguas subterráneas y su potencial, los procesos y fenómenos geológicos, y las nuevas metodologías para su estudio y evaluación. Esta información estará complementada con datos de otros niveles como son los meteorológicos, hidrológicos, geográficos, agrícolas, biológicos, sociales, etc. que permitan determinar y planificar el uso de los recursos en el futuro.

DEL
19 AL 21 DE MAYO
ISMM, CUBA

EN
MOA

GINAREN' 93

PRIMERA CONFERENCIA INTERNACIONAL
DE APROVECHAMIENTO DE RECURSOS MINERALES



EN SALUDO AL X ANIVERSARIO DEL CENTRO
DE INVESTIGACIONES DE LAS LATERITAS