

MODELACIÓN NUMÉRICA DE UN ACUÍFERO MEDIANTE DOS ESQUEMAS REPRESENTATIVOS: RAIGÓN, URUGUAY

• Jorge de los Santos-Gregoraschuk* •
Universidad de la República, Uruguay

• Guillermo Hernández-García •
Universidad Nacional Autónoma de México

*Autor de correspondencia

Resumen

El Sistema Acuífero Raigón (SAR) se desarrolla en sedimentos fluviales, presentando sectores libres y sectores confinados. Situado al sur de Uruguay, tiene una superficie de 1 800 km² y una alta demanda. Desde 1990 ha sido motivo de diversos estudios, y en 1999 se desarrolló su primer modelo numérico, donde el dominio fue dividido en cuatro sectores independientes, con condiciones de borde de carga constante. Se presenta aquí el resultado comparado entre dos particiones del dominio, con sus consecuentes cambios en las condiciones de frontera, para un estado estacionario. En la primera modelación se escogieron cargas constantes en los bordes, mientras que en la segunda simulación, las fronteras anteriores —ahora singularidades interiores— se presentaron como ríos interconectados al sistema acuífero. Los resultados obtenidos muestran una gran similitud en el comportamiento de los niveles hidráulicos calibrados, con distribuciones semejantes de las áreas de recarga y la conductividad hidráulica, parámetros decisivos en el ajuste entre valores observados y calculados de la variable de decisión.

Palabras clave: sistema acuífero Raigón, simulación numérica, gestión de recursos hídricos.

Introducción

El sistema acuífero Raigón se ubica al sur del departamento San José, en la República Oriental del Uruguay, inmediatamente al oeste de su capital, Montevideo. Queda contenido en los primeros 70 metros de la fosa tectónica del río Santa Lucía, cuyo desarrollo sedimentario es del orden de 900 metros en el área de mayor profundidad (figura 1). Su superficie es de 1 800 km², atendiendo la continuidad hidráulica de su estructura. Subviene las necesidades de abastecimiento de todo el sur del departamento tanto a poblaciones como a viviendas particulares, industria o establecimientos rurales. Su desarrollo es de origen fluvial y presenta gran

variabilidad en su litología sedimentaria, donde los paleocauces generan zonas preferenciales de flujo (De los Santos, 1998).

El sistema ha sido muy estudiado en las dos últimas décadas, contándose en la actualidad con un banco de datos de buena calidad, y un conocimiento cierto de su desarrollo y variabilidad litológica, un modelo conceptual correcto y un modelo numérico de flujo, que responde de forma satisfactoria a los fines de gestión inmediata. Sin embargo, este modelo de flujo fue calibrado en cuatro submodelos, de acuerdo con las condiciones de borde, que permitían a priori un tratamiento tal tanto en régimen estacionario como transitorio. El modelo se operó hasta 2009, año en que

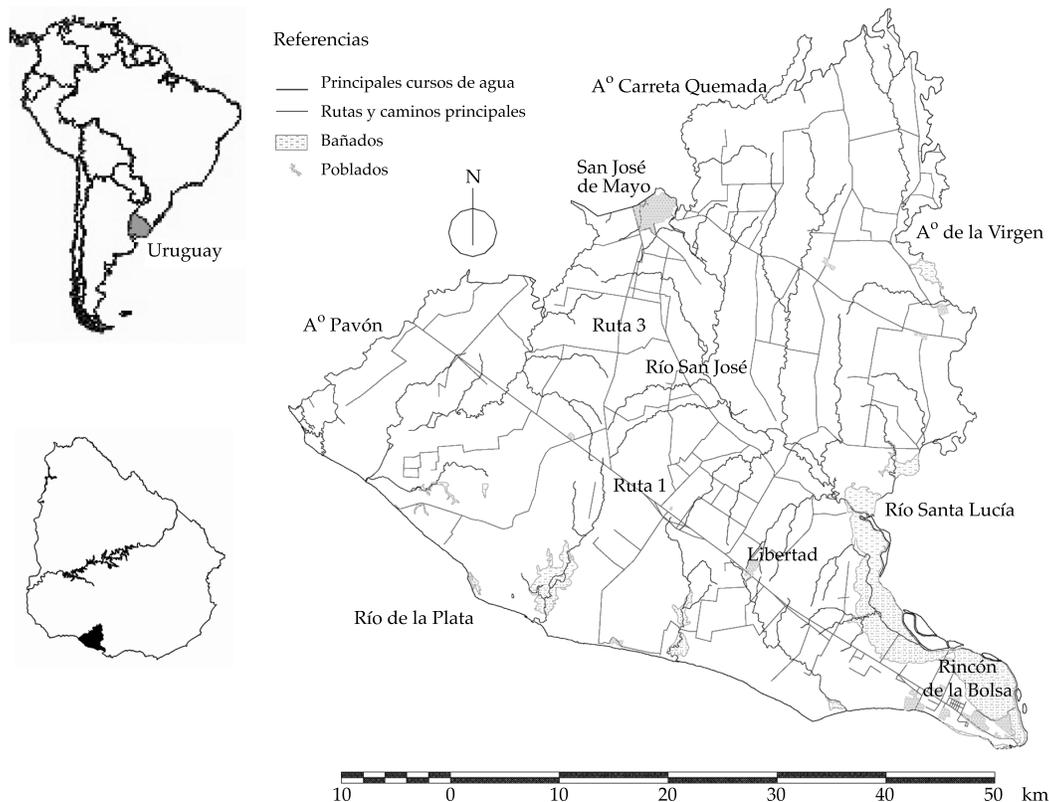


Figura 1. Acuífero Raigón. Ubicación y contorno.

el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (Facultad de Ingeniería, Unidad de la República, Uruguay) decidió realizar la integración de estos subdominios y la simulación de la unidad acuífera en su totalidad, en colaboración con el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Metodología

La premisa de este trabajo es la comparación del comportamiento del modelo numérico del SAR ante una discretización del dominio compartimentado contra una discretización semejante, considerando el funcionamiento hidráulico del acuífero como unidad, a efectos de sopesar las diferencias que puedan verificarse cuando se toman condiciones de

contorno con niveles hidráulicos constantes, a efecto de reducir el tamaño del dominio en simulaciones específicas.

Para la elaboración del modelo conceptual se contó con datos de unas 200 perforaciones, de las cuales se utilizaron poco más de 100, por la confiabilidad de los datos. Los puntos de comparación de niveles calculados y observados fueron, finalmente, 51.

Se construyeron nueve cortes longitudinales y transversales con las perforaciones seleccionadas, con lo que se determinó el piso y techo del acuífero, tras una interpolación. Las figuras 2a, 2b y 2c presentan un corte transversal, al oeste, y un corte longitudinal a lo largo del eje de la ruta 1, respectivamente.

Raigón está cubierto por los sedimentos de la Formación Libertad, loésica, que se presenta como un paquete superior de arcillas

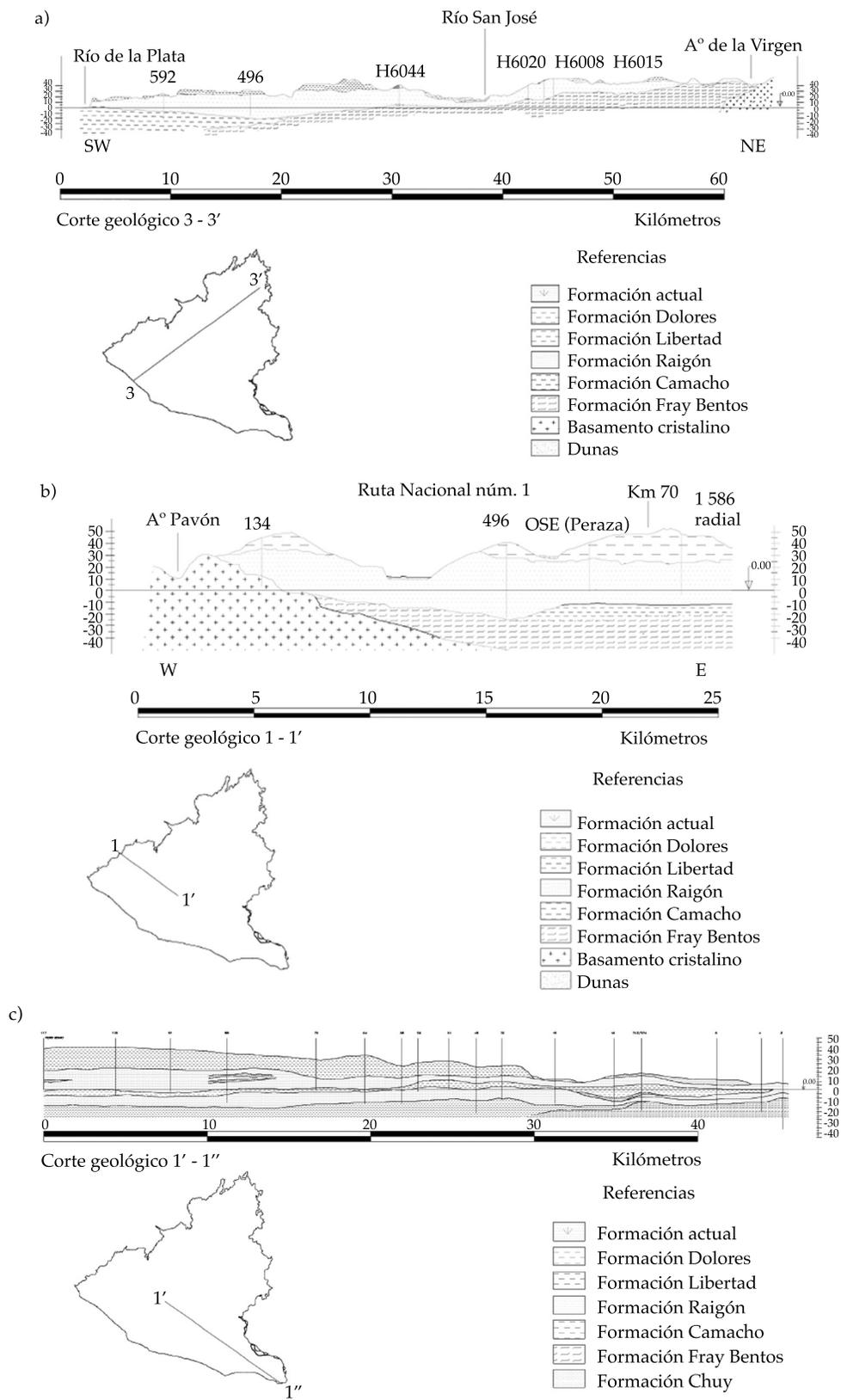


Figura 2. a) corte transversal 3-3'; b) corte longitudinal 1-1'; c) corte longitudinal 1'-1''.

expansibles, por cuyas fisuras en periodos de contracción se produce la recarga. Luego siguen las arenas saturadas, con algunos episodios continuos de una capa arcillosa intermedia muy delgada. Este acuífero trabaja como unidad a los efectos prácticos, ya que los pozos atraviesan ambos estratos de forma total o parcial, y los filtros captan el mayor espesor de arenas. El piso del acuífero son las formaciones Camacho, de origen marino, o Fray Bentos, compuesta por arcillas finas, de origen continental.

Con los datos de mediciones de nivel hidráulico efectuadas en 1986, época en que la demanda al sistema no era importante, se completó la serie de datos necesarios para la definición de las trayectorias de flujo, las zonas de recarga y las áreas de descarga.

El acuífero descarga hacia el río de la Plata al sur, hacia el río San José al centro, hacia el arroyo de la Virgen y el río Santa Lucía al este, con dos zonas de recarga bien definidas, que conforman cada una un parteaguas. Algunos arroyos interiores inducen descargas locales, que se insinúan en la piezometría general (figura 3).

La modelación computacional del flujo subterráneo se realizó con el fin de lograr una integración directa de la información compilada y generada, y tener elementos de sensibilidad de las diferentes variables involucradas en el modelo numérico del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) *Modflow* (McDonald y Harbaugh, 1988), buscando representar las condiciones de flujo para las cargas hidráulicas observadas, propiedades hidráulicas reportadas, tipo de frontera lateral usado y profundidad al piso.

Modflow resuelve la ecuación que representa el flujo de agua subterránea en tres dimensiones, en un medio anisótropo, heterogéneo con agua de igual densidad (isotérmica ≈ 21 °C y de salinidad baja ≈ 1 000 mg/l de sólidos totales disueltos), que se expresa de modo matemático de la siguiente forma (Bear y Verruijt, 1987):

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ecuación donde:

K = conductividad hidráulica en las direcciones horizontal (x , y) y vertical (z) (L/T).

h = carga hidráulica (L).

W = flujo volumétrico por unidad de volumen, entrada o salida de agua (T⁻¹).

S_s = coeficiente de almacenamiento específico del medio, y (L⁻¹).

t = tiempo (T).

La superficie topográfica que se introduce al modelo incorpora límites laterales del sistema hidrológico natural, representados por zonas de carga constante, tales como el río de la Plata y la región de influencia alrededor del área de estudio, en especial la parte oeste, que es de donde proviene básicamente el flujo subterráneo. Los sedimentos aluviales constituyen el relieve del área de estudio, de los cuales sobresalen materiales sedimentarios; sin embargo, dadas las condiciones de baja conductividad hidráulica, se consideró que ésta funciona, para fines prácticos y de modelación, como la zona de menor conductividad hidráulica, condición que minimiza la componente vertical de flujo ascendente.

El sistema modelado implicó considerar en el área de estudio las condiciones hidrogeológicas siguientes, las cuales son consistentes con observaciones de campo (De Marsily, 1986).

- Propiedades hidráulicas: conductividad hidráulica K_x , K_y , K_z ; coeficiente de almacenamiento específico, porosidad.
- Tipo de flujo en las fronteras: de carga constante, frontera impermeable, recarga, ríos.

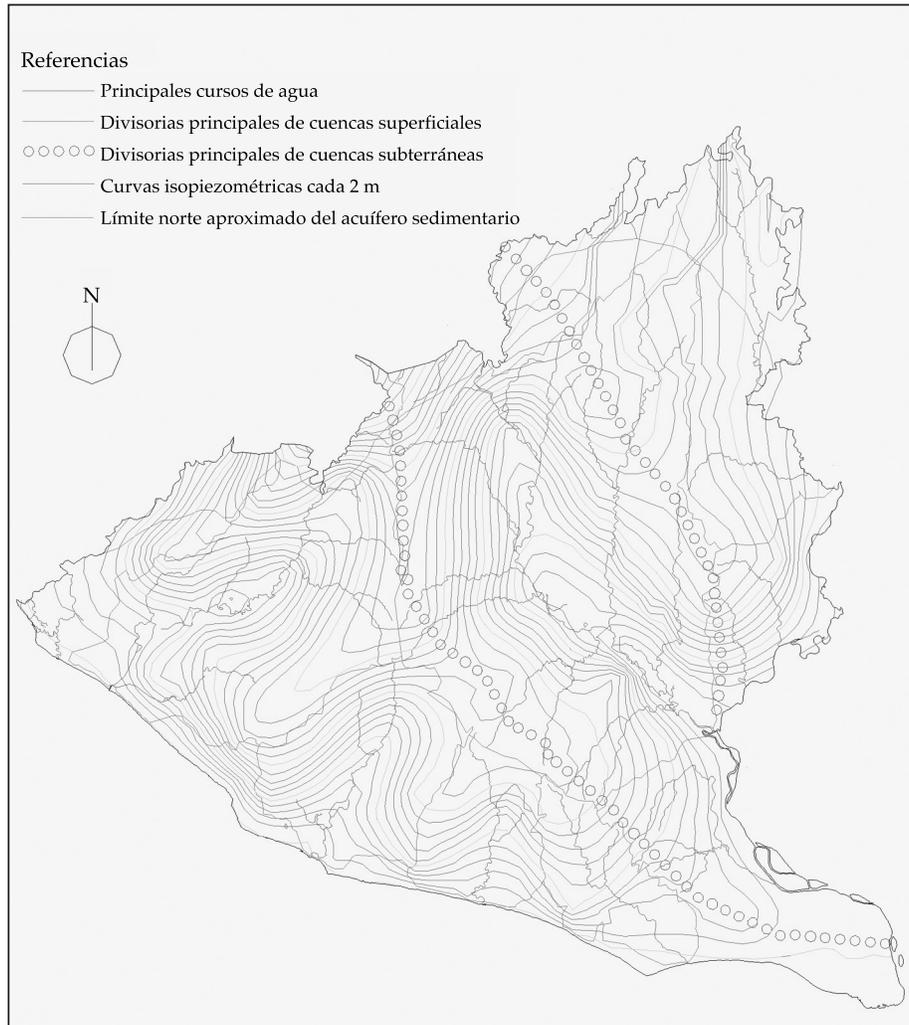


Figura 3. Piezometría general y divisoria de aguas.

La conductividad hidráulica asignada a cada celda al interior del modelo se obtuvo con base en información asequible de manera original asignada a cada tipo de material litológico; los valores se ajustaron durante el procedimiento de calibración, incorporando características estructurales.

La discretización usada en el modelo numérico se basó en las propiedades litológicas e hidráulicas, con 74 celdas en x , 74 celdas en y , haciendo un total de 5 476 celdas. La malla del modelo está representada por celdas con una longitud de 1.0×1.0 km. La malla se alinea sobre una cuadrícula del

sistema local Yacaré, de uso en Uruguay. El espesor de cada celda varía según la unidad hidroestratigráfica, con un valor asignado de conformidad con datos reportados por pozos o datos geofísicos.

Resultados

La calibración que aquí se presenta se realizó para régimen estacionario, comparando los niveles calculados con los niveles observados en 1986.

Las variables de calibración fueron la conductividad hidráulica —de la cual se

disponían valores puntuales obtenidos por ensayos de bombeo, mediante los cuales se interpolaron los valores cargados inicialmente al modelo— y la recarga, que se estimó a través de balances hídricos, distribuyéndola de acuerdo con los patrones de flujo establecidos por la piezometría.

Durante el proceso de calibración, se ajustaron en el espacio y en las celdas el volumen total infiltrado y variaciones más destacadas de la conductividad hidráulica, hasta reproducir la forma de las isolíneas de alturas del agua en el sistema y un acuerdo satisfactorio con sus niveles medidos.

En ambos modelos, el procedimiento fue semejante. La diferencia entre los dos radicó en sus condiciones de borde, a saber:

- En el modelo compartimentado, las condiciones de borde donde existía un arroyo interno se asimiló a carga constante.
- En el modelo general, los arroyos interiores se consideraron dentro de las modalidades del módulo “Ríos de *Modflow*”.

La figura 4 muestra los resultados obtenidos en la calibración de niveles hidráulicos para el modelo compartimentado. La figura 5 muestra los resultados para el modelo general con isolíneas de contornos y velocidades.

El procedimiento de calibración se basó en la comparación entre valores de elevación del nivel del agua, calculados por el modelo con los valores observados en campo. El valor de 7.89% fue el error máximo obtenido; éste se produce calculando la raíz cuadrática media (RMS) normalizada.

Discusión

El ajuste logrado en el modelo unificado presentó un valor del error de 7.89%, calculando la raíz cuadrática media (RMS). Se aplicó un método de ensayo y error para la calibración. En el modelo compartimentado, el máximo apartamiento de niveles observados y calculados fue de 1.38 metros en exceso,

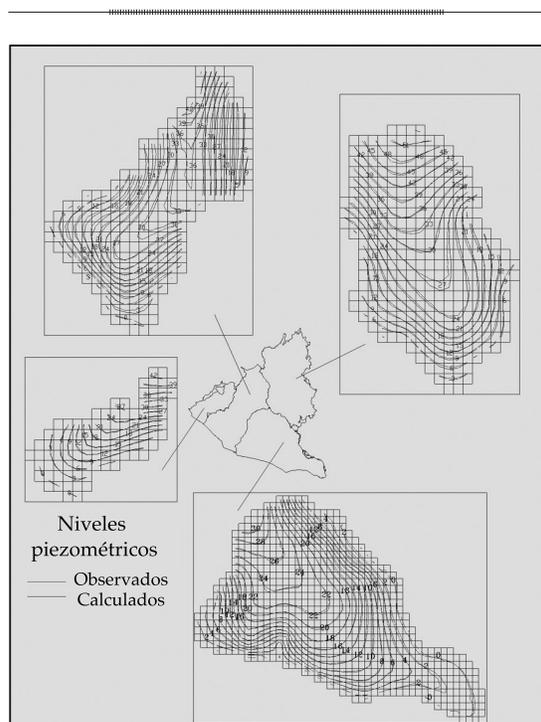


Figura 4. Calibración con el modelo compartimentado.

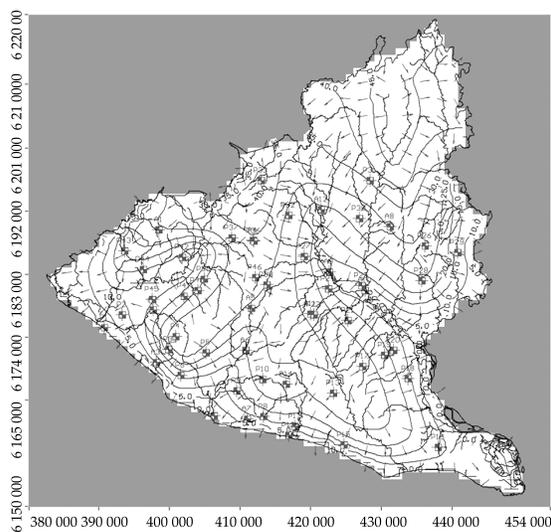


Figura 5. Calibración con el modelo global.

y 1.22 metros en defecto, con una media de diferencias de un metro. No se cuenta para este esquema con un valor de error utilizando la raíz cuadrática media.

Por el lado de los modelos locales (compartimentado), las dimensiones de las

celdas que se tenían en la mayoría de ellos eran de 1.5 x 1.5 km (sectores oeste, sur, norte); sólo uno de ellos tenía 1 x 1 km (sector este). En el esquema unificado, se planteó una malla de 1 x 1 km, y se le trasladaron los datos de propiedades hidráulicas, haciendo una interpolación.

Para el ajuste del modelo unificado mediante los modelos por zonas fue importante implantar condiciones de borde, incluyendo la influencia de los ríos en las curvas divisorias de los modelos por zona, trasladando de ese modo el funcionamiento río-acuífero al modelo unificado.

Para hacer coincidir los subdominios del modelo compartimentado en el dominio del modelo unificado, se buscó ajustar las condiciones de frontera de cada submodelo en el modelo unificado. Estas condiciones son tanto del tipo Dirichlet como del tipo Neumann. Para el caso de Dirichlet, existían ríos que permitían hacer coincidir los valores a ambos lados del curso de agua, coincidiendo con los datos de dos subdominios contiguos. Para el caso de lugares con parteaguas, el gradiente del nivel, perpendicular a ellos, de valor nulo, se logra observar en ambos lados.

Para la recarga se adoptaron las distribuciones originales de los modelos locales al modelo regional, y se ajustaron los valores para emular las variaciones de magnitud entre diferentes zonas.

Si bien las líneas de iso-contornos de niveles piezométricos tienen una buena coincidencia, la calibración realmente se da comparando contra los niveles observados los resultados de la modelación regional. Este tipo de calibración no existió en la modelación de los modelos locales, y se incorporó en el modelo regional, dando buenos resultados, sobre todo en la evaluación del porcentaje de error.

Conclusiones

Si bien las diferencias se establecieron en la discretización del dominio y en el tratamiento de sus condiciones de contorno, la similitud entre ambas simulaciones no hace pesar más

la conveniencia de un esquema u otro. Los resultados fueron muy satisfactorios en los dos casos, y trabajar con dominios menores o parciales de un acuífero mayor permite más rapidez en el tratamiento de problemas concretos, con buena calidad de resultados. Asimismo, el hecho de simular todo un acuífero como unidad, ilustra sobre los sistemas de flujo y su certidumbre, y comprueba o modifica los modelos conceptuales elaborados.

El planteamiento de un esquema unificado permite la evaluación del flujo regional, que incluye trayectorias de larga distancia desde las zonas de recarga a las de descarga y, en especial, conocer las zonas de influencia de los pozos de extracción, así como el destino de las trayectorias de partículas.

Agradecimientos

A la Secretaría de Relaciones Exteriores en México, Embajada de México en Uruguay, Cooperación de la Universidad de la República, en Uruguay; Instituto de Geofísica y Posgrado en Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de México. Se agradece también el importante apoyo técnico de los ayudantes del Grupo de Hidrología Subterránea (IMFIA), de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República), Alfonso Flaquer y Fabián Gómez.

Recibido: 12/10/2010

Aceptado: 04/09/2012

Referencias

- BEAR, J. and VERRUIJT, A. *Modeling groundwater flow and pollution*. Holland: D. Reidel Publishing Company, 1987, 414 pp.
- DE LOS SANTOS, J. (editor). *Modelación numérica del acuífero de Raigón*. Proyecto CONICYT-BID 71/94. Montevideo: IMFIA, Universidad de la República, Uruguay, 1998, 80 pp.
- DE MARSILY, G. *Quantitative Hydrogeology*. USA: Academic Press, Inc., 1986, 440 pp.
- HERRERA, I. Modelación matemática y computacional en hidrología: conceptos unificadores. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. VIII, núm. 1, enero-abril, 1992, pp. 30-35.
- McDONALD, M.G. and HARBAUGH, A.W. *A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model*. Colorado: USGS Techniques of Water Resources Investigation Report; book 6, Ch. A1, 1988, 585 pp.

Abstract

DE LOS SANTOS-GREGORASCHUK, J. & HERNÁNDEZ-GARCÍA, G. *Numerical modeling of an aquifer in two representations schematically: Raigón, Uruguay. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 4, September-October, 2013, pp. 151-158.*

The Raigón Aquifer System (RAS) contains fluvial sediments and has both free and confined sectors. Located in southern Uruguay, its area measures 1800 km² and its demand is high. It has been the subject of several studies since 1990, and the first digital model to represent it was developed in 1999. This model divided the region into four independent sectors with constant head boundary conditions. The results presented herein compare two portions of the study area and show changes in boundary conditions to a steady-state. The first model was based on constant head boundaries while the boundaries for the second —now internal singularities— were represented by rivers interconnected with the aquifer system. The results show great similarity in the behavior of water levels, with similar distributions for recharge areas and hydraulic conductivity-critical parameters for the fit between the observed and calculated values of the decision variable.

Keywords: *Raigón aquifer system, numerical simulation, water resources management.*

Dirección institucional de los autores

M.C. Jorge de los Santos Gregoraschuk

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Julio Herrera y Reissig 565

11300 Montevideo, URUGUAY

Teléfonos: +59 (82) 7115 276, 7115 279, extensión 214

Fax: +59 (82) 7115 277

jedls@fing.edu.uy

Dr. Guillermo Hernández-García

Instituto de Geofísica

Universidad Nacional Autónoma de México

Circuito Interior, Ciudad Universitaria

04360 México, D.F., MÉXICO

Teléfonos: +52 (55) 5622 4131, 5622 4133 y 5622 4135

Fax: +52 (55) 5622 4136

ghdez@geofisica.unam.mx