

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



ASAGAI
ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Córdoba - Argentina



Modelo de flujo de agua subterránea en el sector industrial planificado (Tornquist, provincia de Buenos Aires)

Groundwater flow model in the planned industrial sector (Tornquist, province of Buenos Aires)

Albouy, René ¹ ✉ - Lafont, Daniela ¹ - Lexow, Claudio ^{1,2} - Carrica, Jorge ¹

Recibido: 4 de noviembre de 2014 • Aceptado: 21 de abril de 2015

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo el diseño de un modelo numérico de flujo subterráneo, con el programa MODFLOW, con miras a analizar el transporte y migración de sustancias contaminantes en el acuífero freático. El mismo se formuló en una porción de la cuenca superior del río Sauce Chico (provincia de Buenos Aires, Argentina) que incluye el denominado Sector Industrial Planificado (SIP) de Tornquist. El funcionamiento hidrológico del acuífero se plantea con una recarga a partir del agua de lluvia y una descarga en el río que drena la cuenca. El modelo numérico de flujo corrobora el esquema conceptual de funcionamiento del sistema y reproduce en forma aceptable la configuración local de la superficie freática y las direcciones de flujo predominantes en el acuífero. Los niveles calculados y observados presentan un buen ajuste (coeficiente de correlación de 0,99) y el balance de masas resulta consistente con los datos de campo. El modelo construido es una herramienta interpretativa para analizar el transporte de sustancia en el agua subterránea, diagramar puntos de monitoreo y gestionar medidas tendientes a la preservación del recurso hídrico subterráneo.

Palabras clave: modelo de flujo, acuífero libre, SIP Tornquist.

Abstract

A numerical groundwater flow model with MODFLOW program in order to analyze the transport and migration of pollutants into groundwater is formulated. An area of the unconfined aquifer in the upper basin of the Sauce Chico River (Province of Buenos Aires, Argentina) was modeled. The Planned Industrial Sector (near Tornquist town) is located in this area. Hydrologically the aquifer recharges from rainfall and discharge in the river that drains the watershed. Numerical flow model is consistent with the hydrological conceptual scheme. The model reproduces the configuration of the water table and the main flow directions in the aquifer. Calculated and observed piezometric levels show a good fit (correlation coefficient = 0.99)

and the mass balance is consistent with the field data. The flow model is an interpretive tool to evaluate the mass transport in groundwater in order to design monitoring networks-programs for groundwater resource protection.

Keywords: flow model, unconfined aquifer, SIP Tornquist.

1. Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur.
San Juan 670, 8000 Bahía Blanca, Argentina.

✉ albouy@uns.edu.ar

2. PAID Comisión de Investigaciones Científicas (CIC),
Provincia de Buenos Aires, Argentina.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El presente artículo tiene por objetivo implementar un modelo de flujo subterráneo utilizando el programa MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) con el propósito de representar numéricamente el sistema hídrico subterráneo del Sector Industrial Planificado (SIP) en inmediaciones de la localidad de Tornquist (Provincia de Buenos Aires, Argentina), con miras a simular su comportamiento ante diferentes escenarios hipotéticos de transporte de solutos. El modelo numérico formulado permite validar el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y simular, en una próxima etapa, diferentes escenarios hipotéticos de transporte de solutos en el sistema subterráneo.

ÁREA DE ESTUDIO: UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO

El área de estudio se inserta en la vertiente suroccidental de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires, dentro de la cuenca alta del río Sauce Chico. El sector de interés abarca la margen izquierda del curso, entre la desembocadura del arroyo Ventana, hasta el cierre de la cuenca superior en la ex estación de aforos Paso Bower. El Sector Industrial Planificado

está proyectado construirlo en inmediaciones de la localidad de Tornquist, en una parcela de 12 Has situada a unos 3 km al NO de esta ciudad, cabecera del distrito homónimo (Figura 1). Desde un punto de vista geomorfológico, se trata de una llanura periserrana, cuyo desarrollo areal está limitado hacia el NE por los afloramientos cuarcíticos de las Sierras Australes. Se eleva entre los 300 msnm (en el NE) hasta 240 msnm (hacia el SO) y presenta una pendiente topográfica menor al 5%. El clima del lugar es subhúmedo, transicional hacia los áridos y de tipo mesotermal, con temperatura y precipitación media anual de 14,7°C y 781,5 mm respectivamente (Albouy, 1997). Los suelos han evolucionado a partir de sedimentos eólicos, limosos, con arena y arcilla; son medianamente profundos, de texturas francas y buena permeabilidad (Albouy, 1997). En el área del estudio y cubriendo el sustrato paleozoico de las sierras, aparece un conjunto de sedimentos limo-arenosos del Plioceno-Pleistoceno inferior denominados informalmente "sedimentos pampeanos" (Fidalgo et al., 1975) o Formación La Norma (De Francesco, 1992). Se trata de depósitos limo arenosos y hasta arcillosos, color castaño rojizo, compactos, sin estratificación, con cemento de carbonato de calcio y que culminan con un manto de tosca, discontinuo, de 1 a 3 m de espesor.

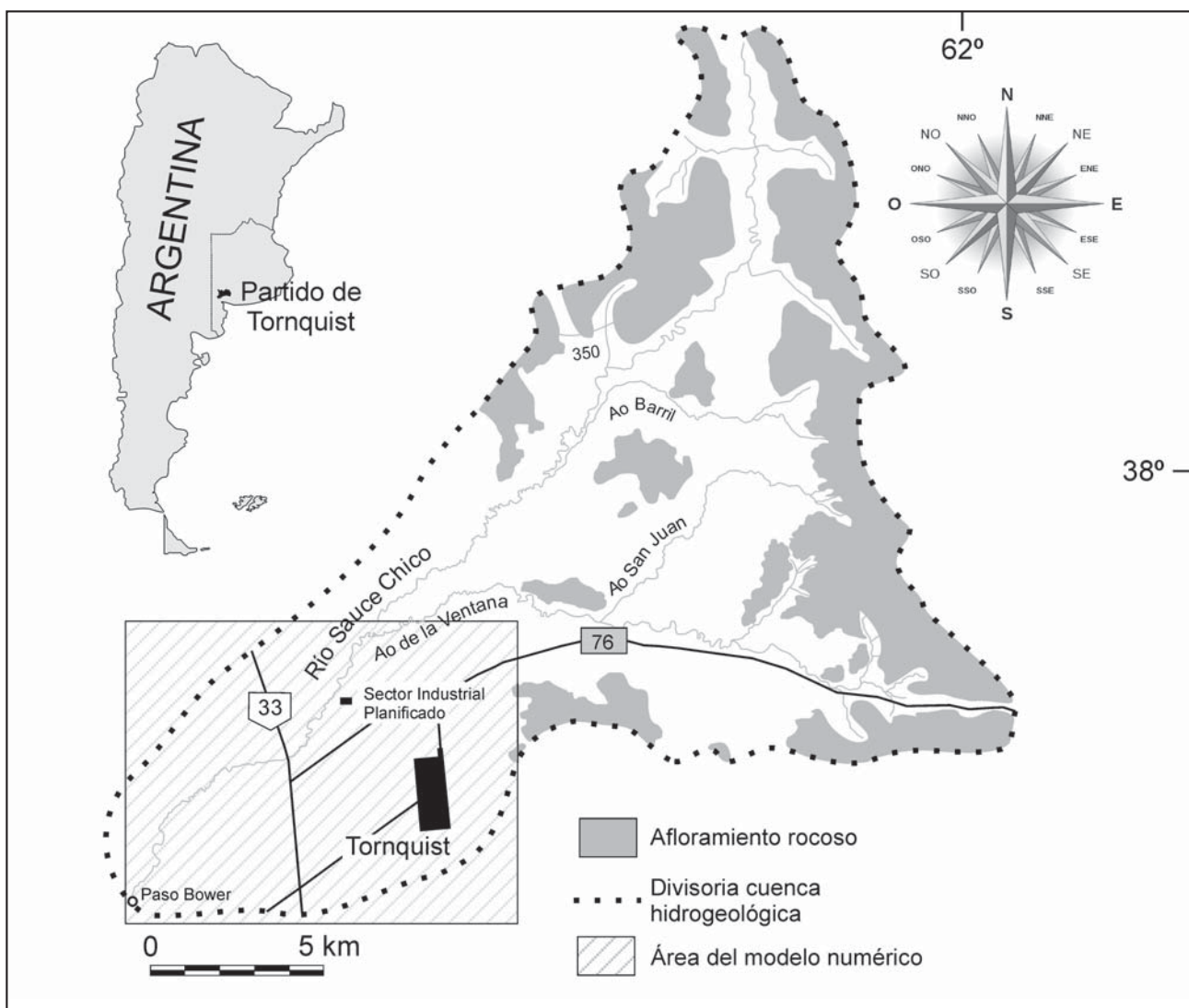


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la cuenca superior del río Sauce Chico.

Hidrogeología

De acuerdo al esquema hidroestratigráfico que propuso la *Dymas (1974e)* en el subsuelo de la cuenca superior del río Sauce Chico se reconocen el “basamento hidrogeológico” (o impermeable) y la Sección Epiparaneana. El basamento está compuesto por las rocas paleozoicas predominantemente cuarcíticas, primariamente acuífugas, sobre las cuales, en inmediaciones de las sierras, aparece un paquete de sedimentos, que abarca desde el Plioceno a la actualidad y que conforman la Sección Epiparaneana (*Hernández et al., 1979*). A efectos del presente trabajo, es la de mayor interés hidrogeológico ya que está en contacto con las fases superficial y atmosférica del ciclo hidrológico y es portadora del acuífero libre. La capa freática está contenida en los “sedimentos pampeanos” ampliamente distribuidos en toda la llanura Chaco-Pampeana del país. Desde un punto de vista hidrogeológico, los “sedimentos pampeanos” tienen un comportamiento acuífero-acuitado, producto de las variaciones litológicas que presentan. Hidráulicamente han sido caracterizados como un medio multicapa que funciona como un sistema único de transmisión del agua.

Geometría del cuerpo sedimentario acuífero

El registro de perforaciones de poco más de 100 m de profundidad, en el ámbito de las cuencas superiores del río Sauce Grande y Arroyo Napostá Grande (*Harrington, 1947*; *CFI, 1991*) indican que los sedimentos pampeanos, en inmediaciones de los afloramientos serranos, se apoyan directamente sobre las rocas paleozoicas cuarcíticas o “basamento hidrogeológico”. El mismo, se profundiza hacia el sudoeste (*CFI, 1991*; *Albouy, 1994*) determinado un acuñamiento hacia el sector serrano de la cubierta sedimentaria. La interpretación de nueva información geoelectrónica (Figura 2) relevada en el área de estudio complementada con la anterior (*CFI, 1991*) ha permitido identificar lo que puede considerarse el hidroapoyo del acuífero freático del área. Los valores de resistividad indican por un lado la zona no saturada parcialmente calcárea (> 100 y entre 50 a 100 ohm.m) y luego la porción acuífera loésica representada por los valores de entre 10 a 20 ohm.m, aunque también se detectan variaciones de resistividades superiores. El hidroapoyo o nivel de baja permeabilidad (limo arcilloso) está representado por la capa de resistividades < 10 ohm.m. Su profundidad es muy variable en el área, encontrándose entre los 100 m, al sur del perfil B-B', hasta los 22 a 26 metros en proximidades al río.

Acuífero libre: modelo conceptual de funcionamiento

La recarga (R) areal o difusa se verifica en toda la superficie de la cuenca superior del río Sauce Chico, por infiltración directa del agua de lluvia y en forma preferencial en los sedimentos permeables, modernos del piedemonte. Su valor, en base a los balances hídrico a nivel de cuenca y de masas del ión cloruro, se estimó en torno al 15% de la lluvia (*Albouy, 1997*). Estudios recientes (*Lexow et al., 2013*) formulan el balance diario de agua en el suelo, para un período de 16 años (1997-2012) a partir de registros pluviométricos continuos de la localidad de Tornquist. Dicho balance se adaptó a las condiciones físicas representativas del área del modelo numérico (tipo, profundidad y textura de suelo, cobertura vegetal, etc.) obteniéndose valores anualizados promedio de un 7,2 % de la lluvia equivalente a 51,9 mm.

Desde un punto de vista hidrodinámico, el sentido general de circulación del flujo subterráneo es NE-SO convergiendo hacia el curso principal del río Sauce Chico y tributarios, lugar donde se produce la descarga natural del flujo local del acuífero.

Modelo numérico de flujo subterráneo

Utilizando el programa Modflow (*McDonald y Harbaugh 1988*) en el entorno Visual Modflow Pro 3.1.0, que resuelve las ecuaciones de flujo de agua subterránea por medio del método de diferencias finitas, se diseñó el modelo numérico en una porción del acuífero freático que incluye el denominado Sector Industrial Planificado. El objetivo de la simulación ha sido integrar la información hidrogeológica del acuífero y cuantificar los procesos físicos actuantes. Además, el modelo sirve de base para simular el transporte subterráneo de solutos que permitirá evaluar y establecer el alcance de una eventual contaminación en un intervalo de tiempo determinado. Para la calibración en régimen estacionario se tomó como base el mapa de isopiezas relevado por *Albouy (1997)* y actualizado durante el estudio del *CFI (2011)* asumiendo que el mismo representa una condición media temporal de los niveles freáticos (Figura 3).

El área del modelo (Figura 1) abarca una superficie de unos 100 km² que se discretizó en 56 filas (desde 0 hasta 8750 m) y 72 columnas (desde 0 hasta 11.250 m) (4032 celdas). Cada celda activa regular, cuadrada, posee una superficie de 0,0244 km² (156,25 m de lado) y está limitada, arriba, por el nivel de terreno y abajo por una capa limo-arcillosa que constituye el hidroapoyo del acuífero. La base topográfica se construyó a partir de las Hojas Topográficas del IGM en escala 1:50.000 3963-5-2 (Tornquist) y 3963-5-1 (Estancia Los Cerritos). El área modelada tiene una altura entre 300 msnm (hacia el noreste) y 230 msnm hacia el suroeste. Verticalmente se discretizó el modelo en una sola capa, de espesor variable desde 25 y hasta 100 m. Las condiciones de contorno asignadas

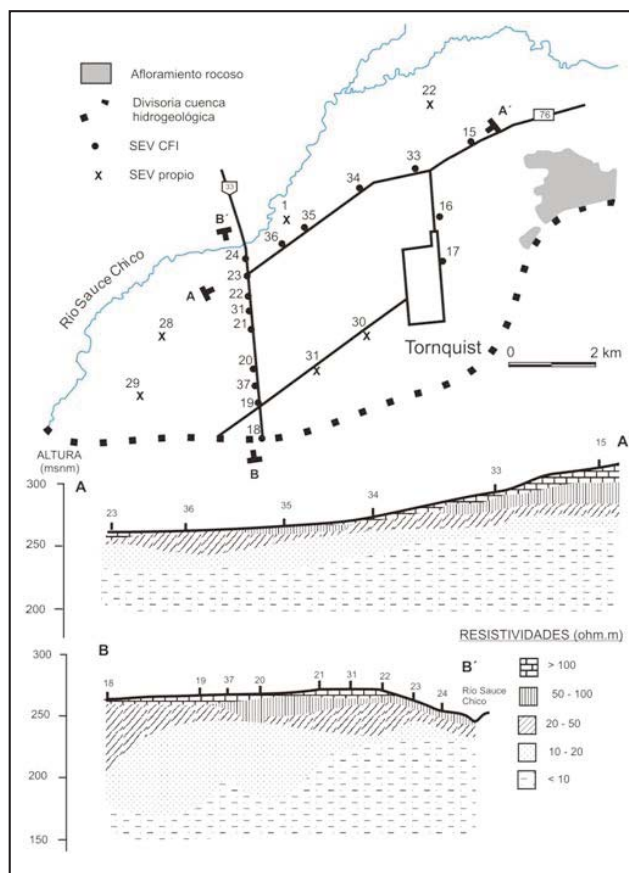


Figura 2. Distribución de sondeos eléctricos verticales y secciones geoelectricas (Modificado de CFI, 1991).

en los límites de la zona de estudio son: a) condición tipo río en coincidencia con el tramo del río Sauce Chico en el área del modelo; b) por el NE y siguiendo la isopieza de 270 m se introdujeron 30 pozos de inyección para simular los caudales de ingreso de agua subterránea y c) hacia el S se impuso una condición de caudal nulo siguiendo una línea de flujo (Figura 4). La relación espacial entre el espesor del acuífero libre y su extensión espacial permiten considerar la dirección del flujo subterráneo, como esencialmente horizontal. El principal ingreso de agua al sistema modelado lo constituye la recarga a partir del agua de lluvia. En base al modelo conceptual descrito en párrafos anteriores, la misma está en el orden al 7% de la precipitación, es decir unos 50 mm/año. El otro ingreso de agua lo constituye el flujo subterráneo proveniente de la porción más alta de la cuenta y que atraviesa la isopieza de 270 m. El único egreso de agua del sistema acuífero lo constituye la descarga al

río como caudal básico. La explotación actual de agua subterránea en la localidad de Tornquist no ha sido considerada debido a que los caudales erogados no impactan sobre el recurso disponible.

Calibración

La calibración se realizó mediante el método de prueba y error. Los parámetros utilizados en el proceso fueron la conductividad hidráulica del acuífero, la conductancia del río y los caudales subterráneos ingresantes por el borde norte del modelo. La conductividad hidráulica asignada a la capa durante la etapa de calibración fue de 1,5 m/d correspondiente a un valor coherente con los que constan en los trabajos documentados y consultados (Albouy, 1994 y 1997; Bonorino et al., 2000; Albouy et al., 2005; Albouy et al., 2010; Bonorino et al., 2010). La conductancia hidráulica del río se estableció en 1000 m²/d valor que arroja una descarga subterránea al curso, consistente con los valores de caudal básico aforados (Albouy, 1994). La conductancia hidráulica (C) se asignó de acuerdo a la conductividad hidráulica de los materiales del fondo (K_o), la longitud del río en cada celda (L), el ancho del río (W) y el espesor del material del lecho (M) y de acuerdo a la siguiente relación:

$$C = \frac{K_o LW}{M}$$

Para estimar el caudal subterráneo que ingresa al modelo, en principio se impuso, en el borde correspondiente, una condición de nivel fijo. El valor que arrojó el modelo, se ajustó durante la calibración y se contrastó con el que se estimó mediante cálculos basados en el conocimiento hidrogeológico (información freaticométrica, geoelectrica e hidráulica antecedente). El total del flujo que ingresa por este borde norte se cuantificó en unos 1200 m³/d. El valor de la recarga introducido, corresponde a un valor medio para el área modelada, por lo que se asignó de manera uniforme sobre todas las celdas activas y no se modificó en todo el proceso.

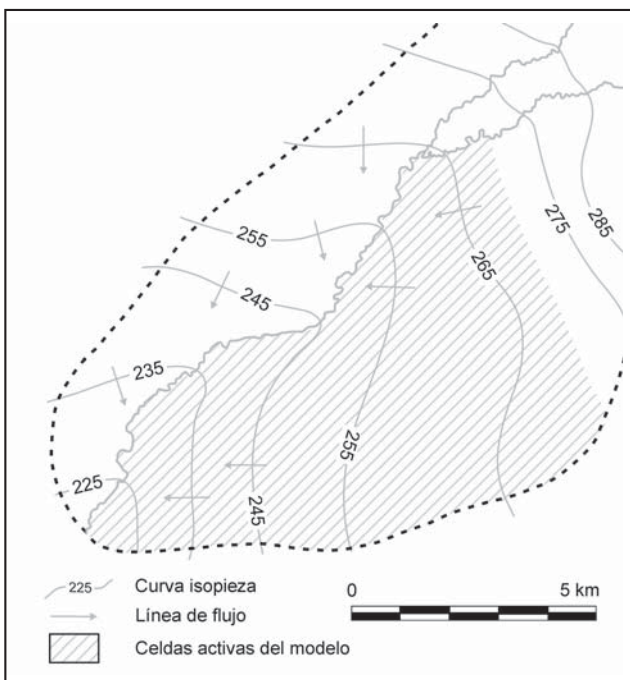


Figura 3. Mapa de isopiezas relevado en campo.

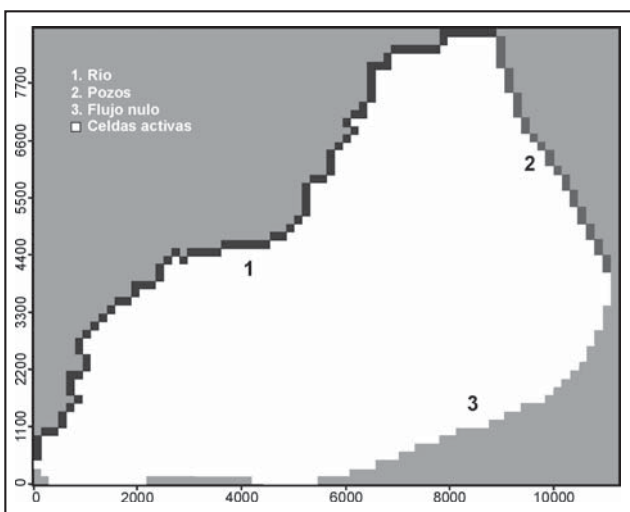


Figura 4. Área modelada: discretización espacial y condiciones de borde.

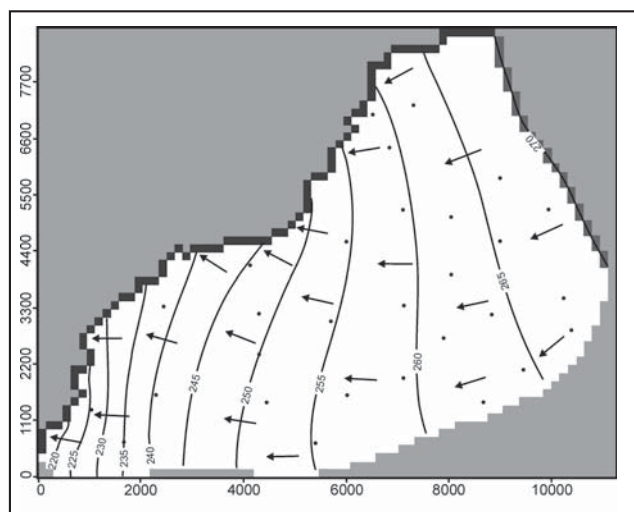


Figura 5. Mapa de isopiezas simulado.

RESULTADOS

El ajuste obtenido se evaluó comparando los niveles piezométricos medidos y calculados en 29 pozos de la red de registro del área. El mapa de isopiezas resultado de la calibración en régimen de flujo estacionario, se aprecia en la Figura 5.

El mapa piezométrico simulado reproduce la configuración local de la superficie freática y las direcciones de flujo predominantes en el acuífero. Además, muestra la relación hidráulica entre el arroyo y el acuífero observándose un comportamiento efluente del curso en todo el tramo del modelo, consistente con las evidencias de campo. El ajuste obtenido indica un coeficiente de correlación (r) entre valores medidos y simulados de

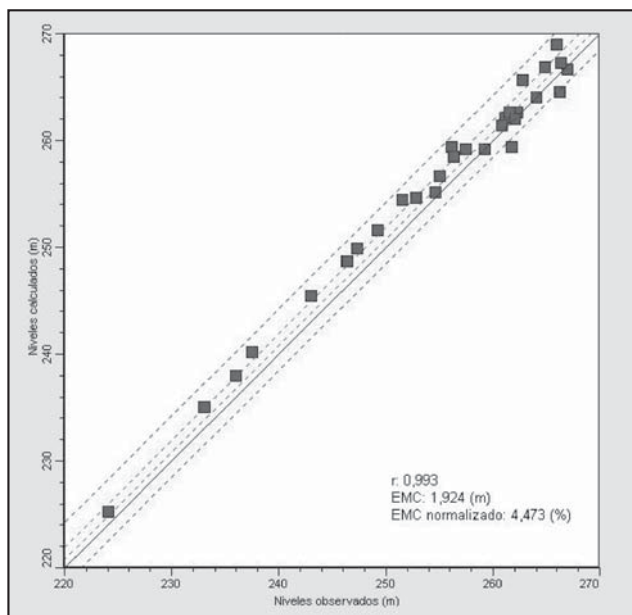


Figura 6. Niveles simulados versus niveles observados.

$r = 0,993$ (Figura 6); el error medio de las estimaciones es de 0,25 m, el medio absoluto de 1,35 y el medio cuadrático (EMC) de 1,90 m (error cuadrático medio normalizado de 4%). Si bien estos errores reflejan cierto grado de incertidumbre entre los valores medidos y simulados, el ajuste se considera satisfactorio y dentro del orden de magnitud de las fluctuaciones temporales de los niveles de agua en el área.

En la Figura 7 puede verse un balance de ingresos y egresos de agua al modelo que totaliza unos 9000 m³/d. Las entradas de agua al sistema corresponden a la recarga por agua de lluvia (85%) y flujo subterráneo (13%) que ingresa por la isopieza de 270 m. La única salida de agua del modelo (9000 m³/d) lo constituye la descarga al río, equivalente a unos 0,10 m³/s semejante a la que puede aproximarse mediante aforos directos con molinete hidrométrico (Albouy, 1994). El balance arroja un ingreso no significativo de agua (2%) a través del curso superficial.

El análisis de sensibilidad en base a la desviación del Error Medio Cuadrático indica que el modelo es sensible a todos los parámetros pero en mayor medida al cambio en los caudales subterráneos impuestos como condición de borde.

CONCLUSIONES

El modelo numérico permitió corroborar el modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero cuantificando los términos del balance agua convirtiéndose en un instrumento para analizar, en el futuro, el transporte de sustancia en el medio acuífero. La modelación numérica constituye una importante herramienta interpretativa que será de suma importancia para diagramar puntos de monitoreo y gestionar eventuales medidas tendientes a la preservación del recurso hídrico subterráneo, fuente de abastecimiento de agua para los usos doméstico e industrial del lugar.

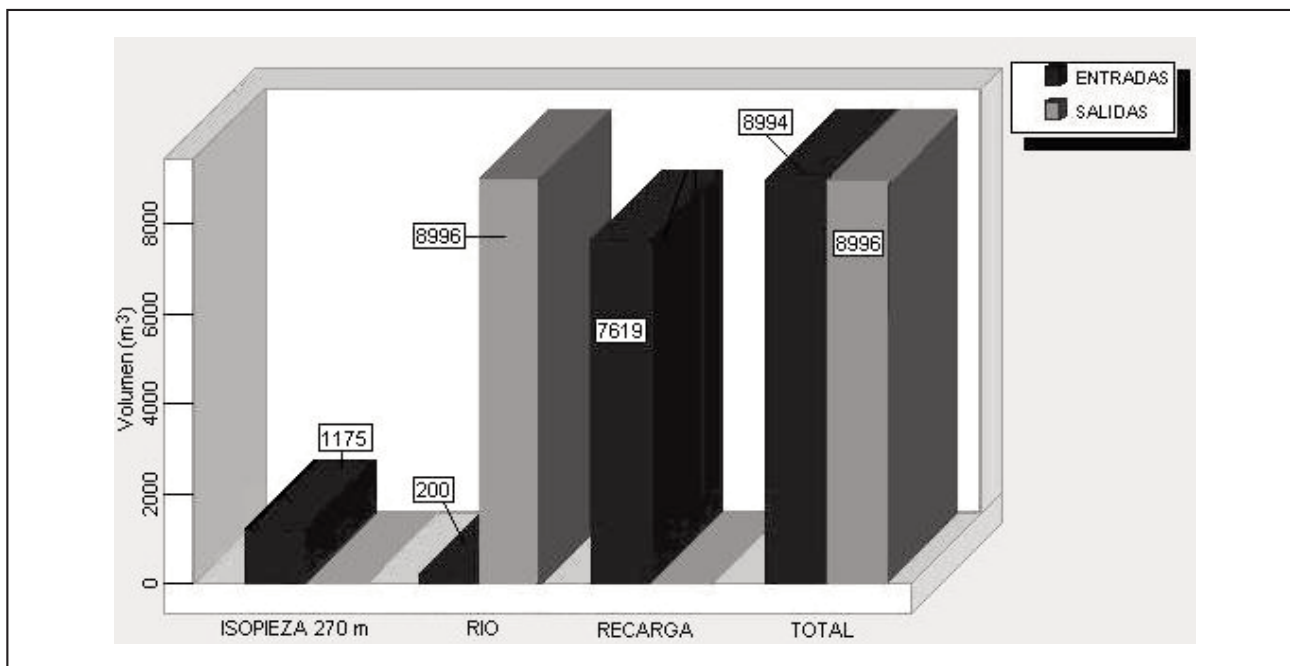


Figura 7. Balance de masas para condiciones estacionarias.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALBOUY, R., 1994.
Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires.
Tesis Doctoral. Biblioteca Central UNS. Bahía Blanca. 140 p. y anexos. (Inédita).
- ALBOUY, R., 1997.
Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. 52 (1): 81-92.
- ALBOUY, R., CARRICA, J. Y BONORINO, G., 2005.
Identificación y análisis del fenómeno de drenaje diferido en sedimentos pampeanos. Cuenca del Ao Napostá Chico, provincia de Buenos Aires.
IV Congreso Argentino de Hidrogeología, Actas (I): 259-268. Río Cuarto, Córdoba.
- ALBOUY, R., J. CARRICA Y D. LAFONT, 2010.
Crisis hídrica de la ciudad de Bahía Blanca: sustentabilidad de la explotación del recurso hídrico subterráneo.
I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. En: Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras, Tomo II: 449-456. Varni, Entraigas y Vives Editores.
- BONORINO, G., J. CARRICA, R. ALBOUY Y C. LEXOW, 2000.
Estudio hidrogeológico de la cuenca del Arroyo Napostá Chico. Etapas I, II y III.
Convenio AZURIX S.A. - FUNSA. 109 pp. y anexos (Inédito).
- BONORINO, G., J. CARRICA, R. ALBOUY Y C. LEXOW, 2010.
Ubicación de la batería de pozos de explotación de agua subterránea para abastecimiento humano en las cercanías de la localidad de Cabildo, partido de Bahía Blanca. Etapa II.
Convenio FUNSA-ABSA (Aguas Bonaerenses S.A.). 65 p. y anexos (Inédito).
- CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES (CFI), 1991.
Prospección geoelectrica en las cuencas superiores de los arroyos Napostá Grande, Chasicó y río Sauce Chico.
Convenio CFI-AGOSBA-UNS (Inédito).
- CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES (CFI) (CFI), 2011.
Prefactibilidad de sistematización y aprovechamiento de la cuenca del río Sauce Chico.
Fundación de la Universidad Nacional del Sur. Informe Final. Hidrogeología Tomo II: 1-74. (Inédito).
- DE FRANCESCO, F.O., 1992.
Estratigrafía del cenozoico en el flanco occidental de las sierras de Curamalal, Sierras Australes bonaerenses.
Terceras Jornadas Geológicas Bonaerenses. Actas: 3-12. La Plata.
- DYMAS, 1974E.
Contribución al mapa hidrogeológico de la provincia de Buenos Aires. Zonas de Bahía Blanca y Norpatagónica.
Ex Dirección de Yacimientos, Minería y Aguas Subterráneas. La Plata (inédito).
- FIDALGO, F., DE FRANCESCO, F. Y PASCUAL, R., 1975.
Geología superficial de la llanura bonaerense.
VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires: 103-108. Buenos Aires.
- HARRINGTON, H., 1947.
Hojas geológicas 33m y 34m: Sierras de Curamalal y de la Ventana, provincia de Buenos Aires.
Servicio Nacional Minero Geológico, Boletín (61), 43 p. Buenos Aires.
- HERNÁNDEZ, M., FILI, M., AUGE, M. Y CECI, J. H., 1979.
Geohidrología de los acuíferos profundos de la provincia de Buenos Aires.
6º Congreso Geológico Argentino. Actas: 479-500. Bahía Blanca.
- LEXOW, C., ALBOUY, R., CARRICA, J. Y LAFONT, D., 2013.
Funcionamiento del sistema hidrogeológico en el área del Sector Industrial Planificado de la localidad de Tornquist (Buenos Aires, Argentina).
Agua subterránea recurso estratégico (Eds. N. González, E. Kruse, M.M. Trovatto y P. Laurencena) Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (Edulp) (1): 58-65.
- MCDONALD, G. AND HARBAUGH, A., 1988.
A modular three-dimensional finite-difference Groundwater flow model.
US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1.



ASAGAI

ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Metodología para la delimitación de las áreas de riesgo hídrico en la Provincia de Santa Fe

Mastaglia, María Inés - Pusineri, Graciela - Arbué, Alejandra - Pilatti, Miguel Ángel

Modelo de redes funcionales orientado a pronóstico de crecidas en cursos de llanura del Gran Rosario, Santa Fe, Argentina

Scuderi, Carlos M. - Riccardi, Gerardo A. - Zimmermann, Erik D. .

Nota Técnica. Estabilización de las subrasantes loésicas utilizando el descarte de piedras ornamentales

Cruz, María P. - Martín Schmädke, Italo F. - Arnaudo, Carlos E. - Higa, José J.

Construcción de vínculos interdisciplinarios e intersectoriales desde las ciencias sociales para el abordaje del riesgo hídrico. Ciudad de Santa Fe

Córdoba, Anabella - Chialvo, Patricia - Morresi, María del Valle

Estimación de la lluvia de diseño mediante información multi-satélite de libre disponibilidad

Catalini, Carlos G. - García, Carlos M. - García, Cesar - Jovanovic, Nebo Z. - Bagan, Richard DH

Modelo de flujo de agua subterránea en el sector industrial planificado (Tornquist, provincia de Buenos Aires)

Albouy, René - Lafont, Daniela - Lexow, Claudio - Carrica, Jorge

Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná

Sepulcri, M.G. - Flamenco, E.A. - Pizarro, M.J. - Herrera, M.G. - Borus, J. - Giordano L.

Procesos modeladores en los acantilados de Las Grutas, provincia de Río Negro

Fucks, Enrique Eduardo - Schnack, Enrique Jorge - Scalise, Armando - Ahrendt, Kai - Vafeidis, Nassos - Sterr, Horst

Visión crítica por introducción de obras en márgenes y cauce del río Dulce entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda

Castellano, Juan - Ávila, Edgardo - Zerda, Hugo

Portada: Vista de las características geomorfológicas del valle en el que se localiza Junín de los Andes, en segundo plano volcán Lanín.

Fotografía: F.X. Pereyra

**Revista de Geología
Aplicada a la Ingeniería
y al Ambiente**

