



## Modelación numérica del flujo de agua subterránea del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba

Matteoda, Edel Mara <sup>1</sup> ✉ - Blarasin, Mónica <sup>1</sup> - Vives, Luis <sup>2</sup> - Cabrera, Adriana <sup>1</sup> - Felizzia, Juan <sup>1</sup>

Recibido: 19 de abril de 2011 • Aceptado: 01 de agosto de 2011

### Resumen

*En este trabajo se presenta el modelo conceptual del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal y la validación realizada mediante la modelación numérica del flujo de agua subterránea. El modelo numérico reproduce, con una buena aproximación, la configuración de la superficie freática, los balances de masa y las direcciones predominantes de flujo de agua en el acuífero que fueron planteadas en el modelo conceptual. El balance de masas muestra que las entradas de agua ocurren fundamentalmente por recarga areal por infiltración efectiva y en menor medida por diversas secciones de entrada al acuífero. El egreso de agua se da principalmente por el drenaje del arroyo y en menor medida en forma subterránea a la salida de la cuenca.*

*Un mejor ajuste permitirá mejorar la calibración e incrementar la confiabilidad del modelo numérico.*

**Palabras clave:** Modelo numérico, acuífero freático, balance de masas.

### Abstract

*This paper presents a conceptual model of the phreatic sedimentary aquifer of the Barreal stream basin. Also, the validation with a numerical model is showed, which reproduces with good accuracy the water mass balance, the water table morphology and groundwater flow explained in the conceptual model. The mass balance shows that the main water input to the aquifer occurs primarily by effective infiltration from precipitations, and, of minor interest, by various entry sections into the aquifer. Discharge of water occurs mainly in the stream and in the low basin by the aquifer section in the stream. More work and adjustment will improve the calibration and will increase the consistency of the numerical model.*

**Keywords:** Numerical Model, phreatic aquifer, mass balance.

<sup>1</sup> Dpto. Geología. Universidad Nacional de Río Cuarto.  
Ruta 36 Km 601. 5800. Río Cuarto. Córdoba.

<sup>2</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff"  
(UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul).  
República de Italia 780 (B7300), Azul, Buenos Aires, Argentina.

✉ ematteoda@exa.unrc.edu.ar

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

La cuenca del arroyo El Barreal (Figura 1) es un área predominantemente rural, en la que el agua subterránea es utilizada para todos los fines: consumo humano, ganadero, riego e industrial. La actividad principal del sector es la agricultura (mayormente de secano), con cultivos de soja, maíz y trigo, y en forma subordinada la ganadería de vacunos, porcinos y ovinos. Las prácticas agrícolas de rotación de cultivos se realizan desde hace pocos años y no están generalizadas, existiendo muchos sectores con monocultivo.

En el sector central de la cuenca se encuentra la localidad de Elena, de aproximadamente 3.000 habitantes, los que usan el agua subterránea que distribuye la Cooperativa Eléctrica a

través de una serie de perforaciones ubicadas en la periferia del pueblo, mientras que el agua superficial es el principal sumidero de efluentes urbanos e industriales.

Los estudios de base para comprender el funcionamiento del acuífero freático del área, consistieron en la realización de relevamientos geológico, geomorfológico e hidrogeológico, a escala 1:50.000, que fueron complementados con investigaciones de gabinete y laboratorio (Matteoda et al. 2007, Matteoda et al. 2008).

El presente trabajo tiene por objetivo mostrar el modelo conceptual del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal y su validación mediante la modelación numérica del flujo de agua subterránea, en régimen permanente.

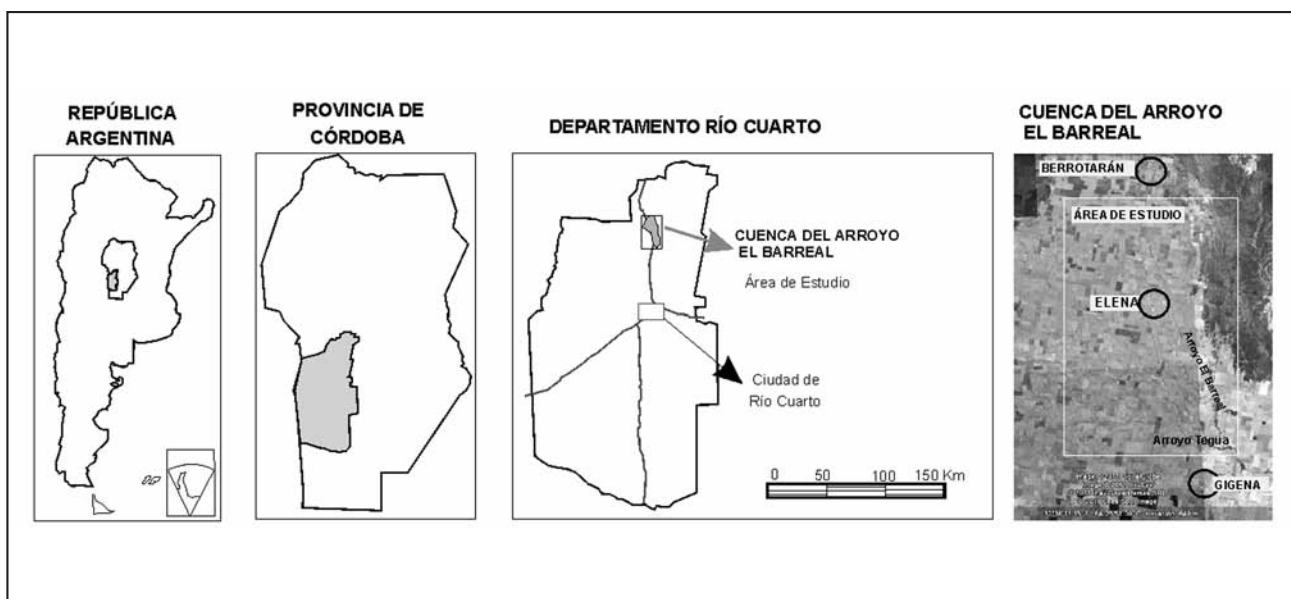


Figura 1. Mapa de ubicación.

## CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área estudiada se encuentra en la llanura Chaco-Pampeana, es un valle ubicado entre dos cordones serranos, y presenta un fuerte control estructural. Se distinguen 4 familias de fallas, siendo las más relevantes las del grupo N-S a N 10° y luego las de orientación E-O (90°). El perfil transversal Oeste-Este (Figura 2) del valle de La Cruz, que excede los límites de la zona estudiada, muestra un relieve ondulado, cuyo relleno sedimentario de edad Terciaria-Cuaternaria, está constituido por potentes depósitos loésicos y materiales areno-gravosos (secuencias fluviales y de abanicos descendentes de las serranías periféricas). Se observan niveles de calcretos a diversas profundidades o aflorantes en los pedimentos periserranos, apareciendo también en estos últimos relictos de basamento (Degiovanni y Cantú 1997).

En la Figura 3, obtenida en un camino profundizado, puede observarse por debajo de la cubierta actual la sedimentación loésica correspondiente a la Formación La Invernada.

Teniendo en cuenta la caracterización regional realizada (Figura 4), se efectuó la correlación estratigráfica de los

materiales encontrados en perforaciones descriptas para la zona de estudio. Se contó con la descripción de perfiles de litologías aflorantes y del subsuelo, sobre la que se describieron perforaciones de hasta 200 m de profundidad realizadas por particulares y organismos públicos (Dirección Provincial de Hidráulica-DPH, Cooperativas, Universidad Nacional de Río Cuarto-UNRC).

La cuenca del arroyo El Barreal se ubica principalmente en la Unidad geomorfológica Llanura fuertemente ondulada (Degiovanni et al. 2005) en la cual las principales subunidades geomorfológicas son morfoestructuras modeladas durante el Pleistoceno superior-Holoceno, las que corresponden a bloques diferencialmente ascendidos y basculados, que condicionaron la sedimentación, el actual relieve del área y consecuentemente, la dinámica y calidad del agua superficial y subterránea.

En el relevamiento de campo se reconocieron las unidades geomorfológicas descriptas por Degiovanni y Cantú (1997) (dos sistemas y 7 unidades geomorfológicas) y se reformularon algunas de las unidades en base a las cuales se elaboró el mapa geológico-geomorfológico (Figura 5).

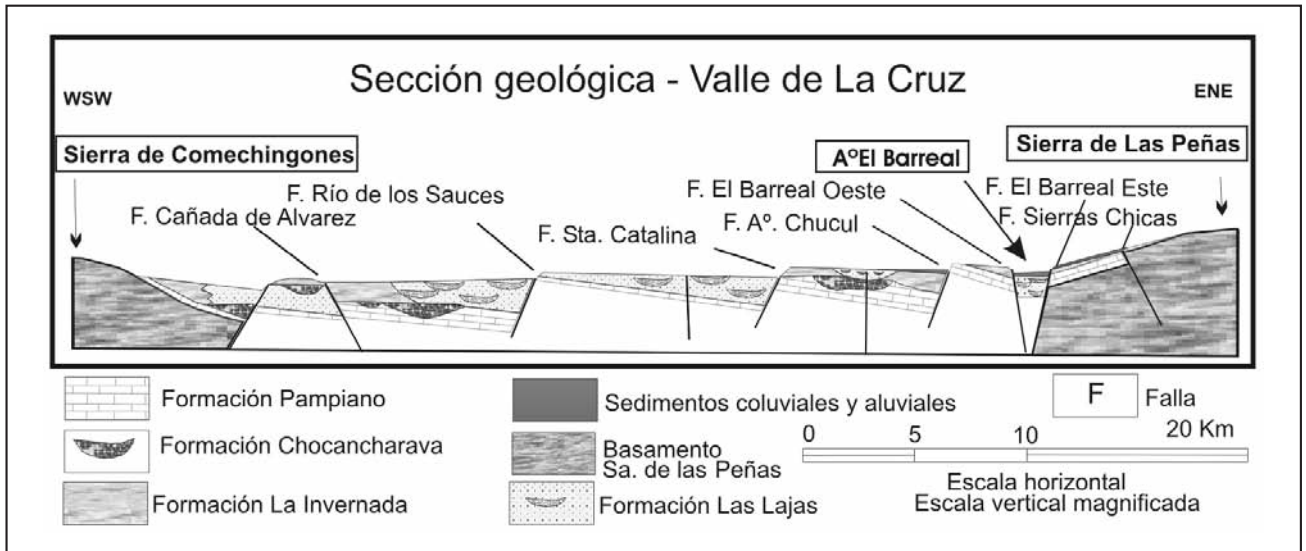


Figura 2. Perfil transversal. Valle de La cruz. Modificado de Degiovanni y Cantu, 1997.

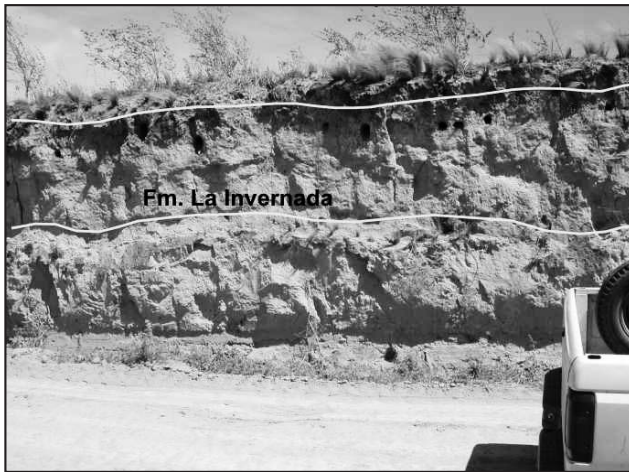


Figura 3. Afloramiento de sedimentos cuaternarios.

### MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

En el sector central de la cuenca, al pie de la sierra de Las Peñas, se encuentra la unidad descrita como Depresión Central-Faja Fluviol del Arroyo El Barreal, representada por un bloque hundido elongado en sentido NNO-SSE en el que se instala, por afloramiento del agua freática, un conjunto de pequeños humedales, que constituyen el “Sistema Humedal El Barreal” de los cuales, el mayor y situado al norte, da origen al arroyo (Figura 6). Este sistema humedal es drenado en forma natural por el arroyo El Barreal, tributario del arroyo Tegua, ubicado 20 km al sur de la cuenca estudiada, el que se constituye en el nivel de base local. La depresión central de la cuenca recibe escurrimientos superficiales efímeros del flanco oriental de las Sierras de Las Peñas y de la planicie circundante, organizados en redes de flujo cuyos colectores principales son los caminos rurales. El sistema humedal se origina por afloramiento de agua subterránea, siendo éste el aporte dominante, aunque en épocas de lluvia se ve incrementada la superficie.

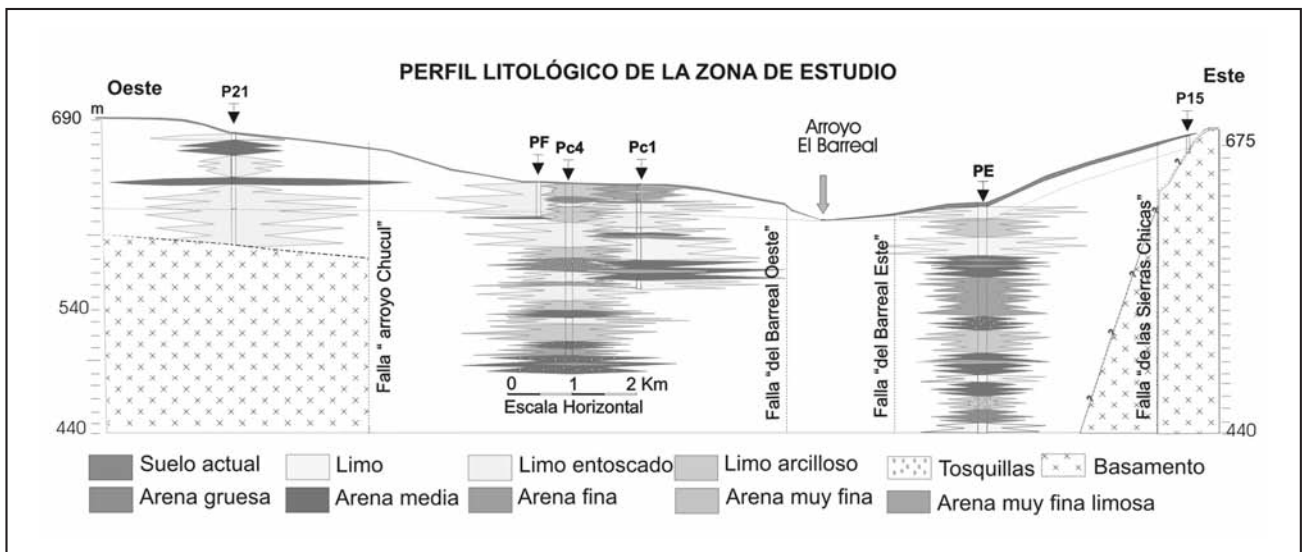


Figura 4. Perfil litológico. Sector central de la cuenca del arroyo El Barreal.

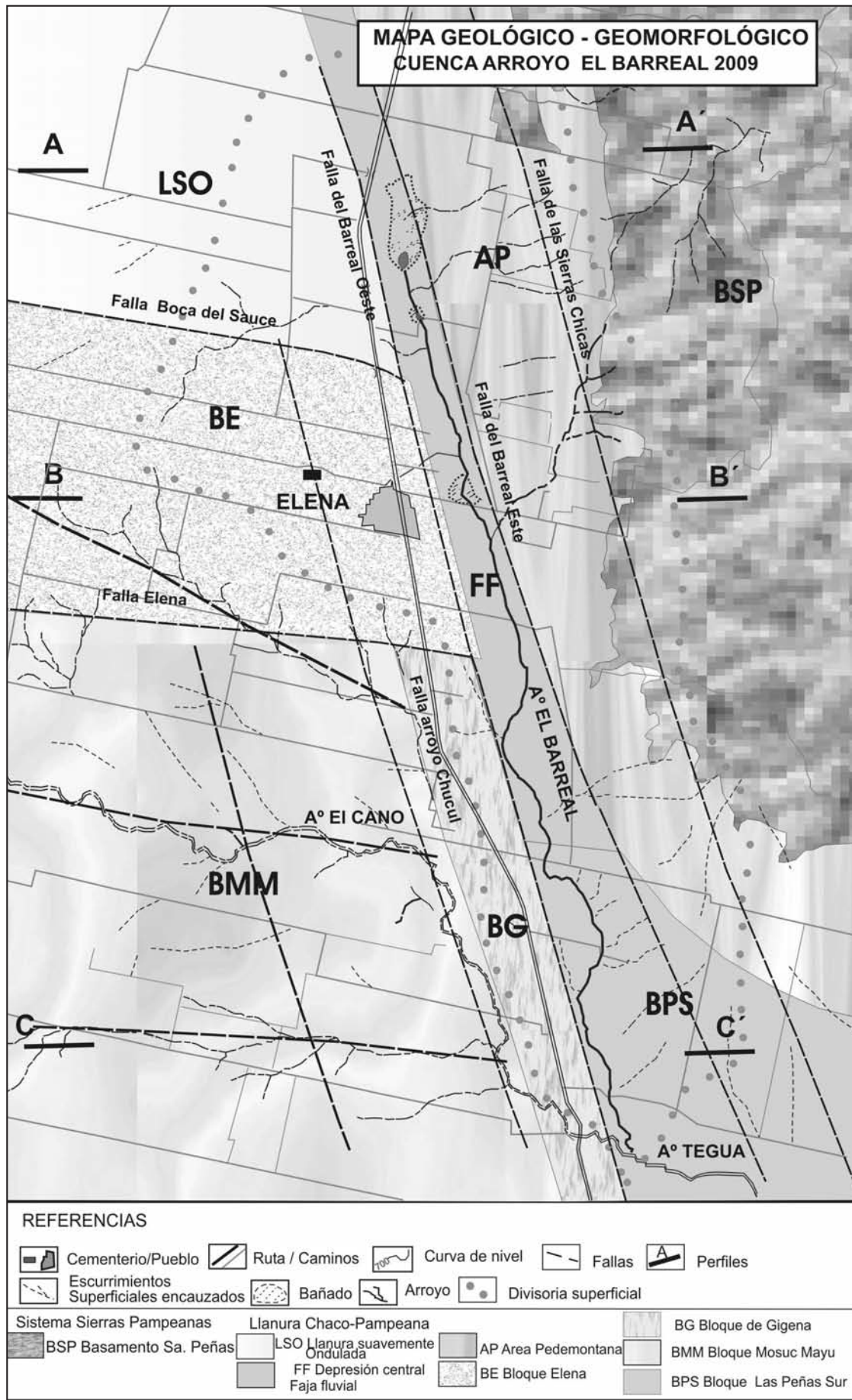


Figura 5. Mapa Geológico- Geomorfológico. Límites de la zona de estudio.

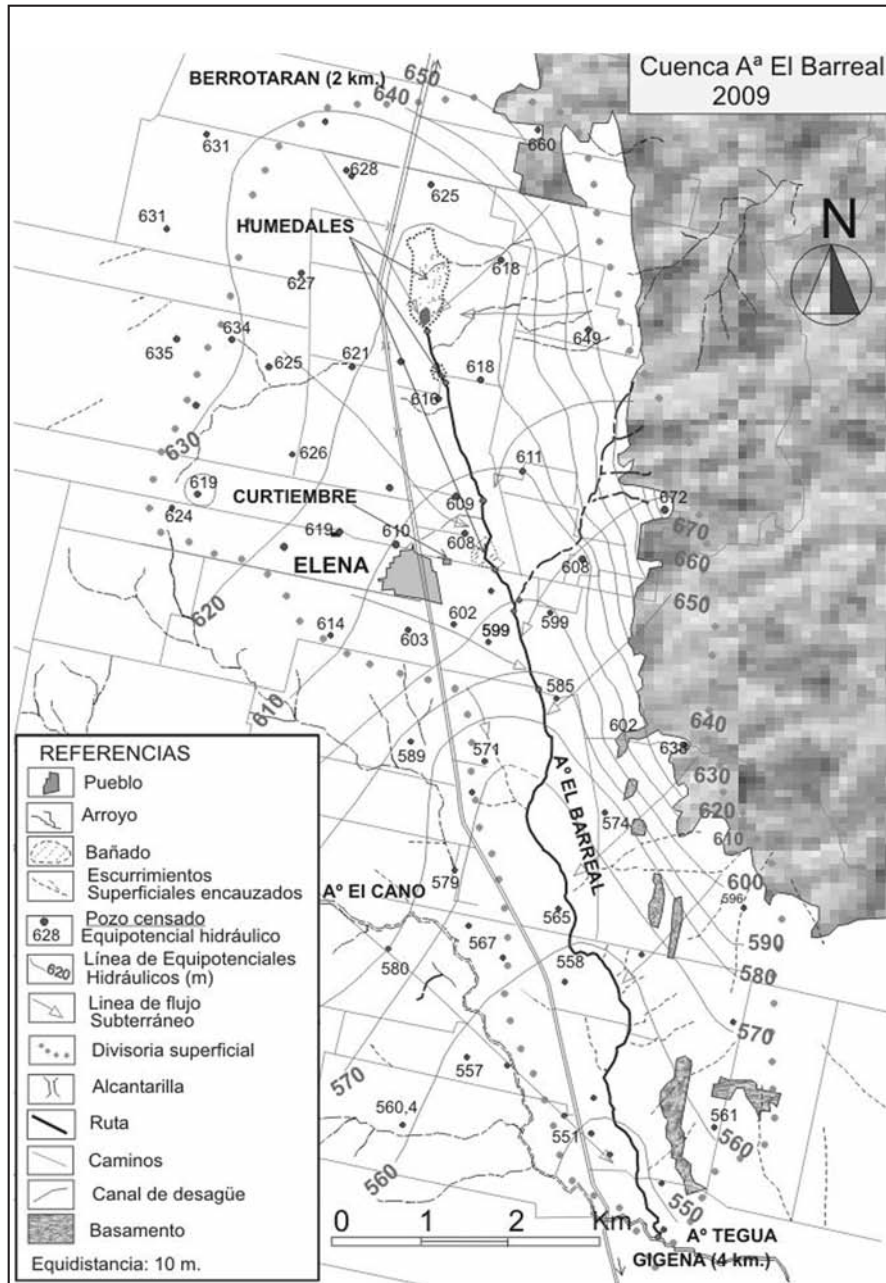


Figura 6. Equipotenciales hidráulicos. Censo 2008 - 2009.

A partir de variaciones litológicas descritas en perforaciones y estudios geofísicos (sondeos eléctricos verticales) pudo determinarse que el acuífero freático está constituido por material poroso clástico de origen eólico y fluvial, representado por sedimentos limosos con intercalaciones limo-arenosas, arenosas y gravosas. Los primeros metros del subsuelo son sedimentos loésicos, diferencialmente cementados por carbonato de calcio. En el ámbito occidental de la cuenca se detectaron paleocauces a distintas profundidades, constituidos por sedimentos arenosos finos, arenosos gruesos y gravosos de los que se extraen mayores caudales de agua de mejor calidad. La morfología de la superficie freática es suavemente ondulada y fuertemente asimétrica. Se encuentra condicionada por las morfoestructuras y presenta una gran diferencia de gradientes hídricos a ambas márgenes del arroyo El Barreal. Los gradientes de la margen izquierda son muy elevados, del orden del 1,5 %, mientras que

en la derecha son de 0,5 %. El sistema de flujo del acuífero libre es centrípeto y circula hacia el sistema humedal y el arroyo, otorgándole a ambos carácter permanente (Figura 6). En perforaciones ubicadas en distintos sectores de la cuenca pudo detectarse, entre los 70 a 90 m de profundidad, un material arcilloso que posiblemente esté actuando como base del acuífero freático.

La precipitación media anual en la cuenca es de 798 mm, distribuida en dos períodos muy marcados, correspondiendo el más húmedo a los meses de noviembre a marzo con el 76 % del total anual. Se observa una alternancia de años lluviosos y secos, con una tendencia al aumento de la precipitación media anual. El balance hídrico modular exhibe un marcado déficit hídrico, permitiendo caracterizar al clima de la zona como subhúmedo seco con nulo a pequeño exceso de agua. Sin embargo, la elaboración del balance hídrico seriado para el mismo

período, permitió observar claramente que los ciclos más húmedos resultaron en excesos hídricos, coincidentes con las crecientes en el arroyo, los escurrimientos superficiales en campos y caminos que generaron las cárcavas más importantes de la cuenca y el ascenso de niveles freáticos, aspectos corroborados mediante encuestas realizadas a productores de la cuenca. La recarga, calculada por el método del ión cloruro (Custodio y Llamas 1983), es aproximadamente entre el 7 y el 10 % de la precipitación, dependiendo de los materiales y el relieve.

**MODELO NUMÉRICO Y MODELACIÓN**

La zona seleccionada para simular numéricamente posee un área de 120 km<sup>2</sup> y, como se indicara, se modela el acuífero libre poroso, heterogéneo e isótropo. Para realizar la modelación se empleó el programa computacional Modflow (Mc Donald y Harbaugh 1988) y la versión Visual Modflow Versión 2.8.1, que resuelve las ecuaciones de flujo de agua subterránea por medio del método de las Diferencias Finitas.

Se utilizó como base del modelo el mapa de líneas equipotenciales del acuífero elaborado a partir de potenciales hidráulicos medidos durante el censo de perforaciones de 2008 - 2009 (Figura 7). Se discretizó el dominio de modelación en una malla de 3480 celdas (60 filas x 58 columnas) con dos tamaños de celdas de 460 x 395 m y 460 x 195 m inactivando todas aque-

llas correspondientes al dominio no modelado (1590 celdas). El refinamiento de la malla se realizó en la margen izquierda del arroyo donde los gradientes topográficos son más elevados. Se utilizó un modelo de acuífero monocapa no confinado. El régimen temporal es estacionario y el dominio del modelo es bidimensional.

La capa tiene impuesta como superficie superior la topografía que se extrajo del modelo digital del terreno Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), información captada en el mes de febrero del año 2000, resolución 3 segundos ~ 90 m (logrado a partir de imágenes en banda C y X). La capa inferior se interpoló con la información de las perforaciones. La Figura 8 presenta algunos cortes Oeste-Este, los que se encuentran ubicados en la Figura 5.

Las condiciones de borde empleadas fueron de flujo nulo, nivel fijo y condición mixta, las cuales se distribuyeron según se indica en el mapa de la Figura 9, utilizándose valores de conductancia según el detalle indicado en la Tabla 1. A la salida por el borde Sur se la trabajó como de nivel constante, en coincidencia con la línea de equipotencial de cota 550 m.

En el caso en particular del límite Norte, y a manera de ejemplo, el valor de la conductancia (C) fue calculada por medio de la ecuación (1).

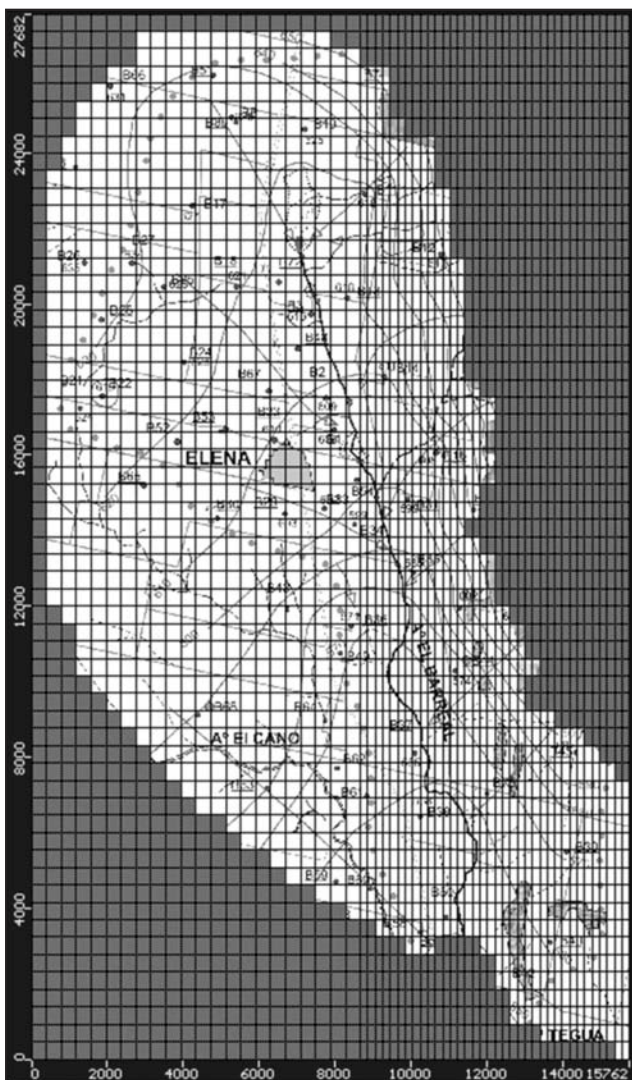


Figura 7. Malla de Diferencias Finitas.

Tabla 1. Condiciones de contorno. El límite de flujo variable se asocia a una condición River o General Head Boundary de MODFLOW.

Zona	Límite usado	Observación
1	Línea de flujo	Impermeable
2	Flujo variable	Conductancia 400 m <sup>2</sup> /d
3	Flujo variable	Conductancia 200 m <sup>2</sup> /d
4	Flujo variable	Conductancia 1 m <sup>2</sup> /d
5	Flujo variable	Conductancia 1 m <sup>2</sup> /d
6	Nivel Fijo	Equipotencial 550 m
9	Flujo variable	Conductancia 100 m <sup>2</sup> /d
10	Flujo variable	Conductancia 2 m <sup>2</sup> /d
11	Flujo variable	Conductancia 1000 m <sup>2</sup> /d

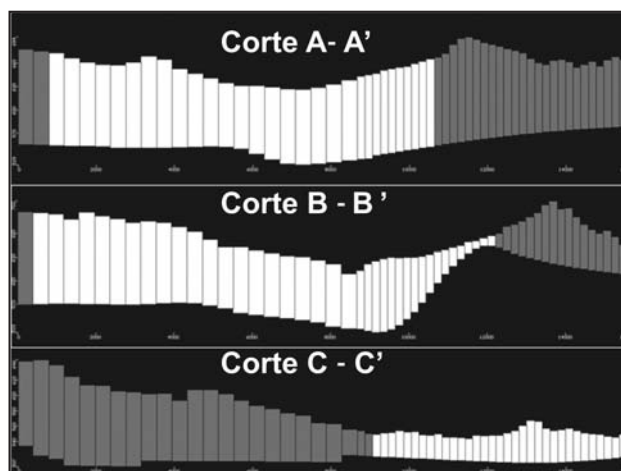


Figura 8. Perfiles oeste-este con exageración vertical 1:20.

$$C = k \cdot a \cdot e / L = 220 \text{ m}^2/\text{d} \quad (1)$$

Donde,

$k$  (conductividad hidráulica) = 0,4 m/d

$a$  (ancho de la celda) = 395 m

$e$  (espesor del acuífero en la celda) = 70 m

$L$  (distancia en que las isopiezas varían una unidad) = 50 m

Para simular el humedal aguas arriba del arroyo El Barreal se estimó un valor de conductancia de 1000 m<sup>2</sup>/d por cada celda, una cota del fondo de 617 m y un tirante de agua de 0,1 m.

El arroyo El Barreal se trabajó mediante una condición de río donde se adoptó una cota inicial en la zona en que se origina de 617 m como fondo de cauce y un tirante de agua de 0,10 m variables hasta la celda donde finaliza con una cota de fondo de cauce de 549,8 m y una cota de pelo de agua de 550 m. Para asignar la conductancia  $C$  a cada celda se realizó el cálculo de la ecuación (2).

$$C = kR \cdot L \cdot W / M \quad (2)$$

Donde:

$kR$  (de los materiales del fondo) = 0,1 m/día

$L$  (longitud del río en cada celda) = 450 m

$W$  (ancho del río) = se adoptó variable de 0,60 m en el origen y 2,5 m a la salida.

$M$  (espesor del material del lecho) = se adoptó variable de 0,50 m en el origen y 0,3 m a la salida.

De esta manera se obtuvo una conductancia variable con valores en cuenca alta de 54 m<sup>2</sup>/día y de 375 m<sup>2</sup>/día a la salida de la cuenca.

En relación a la entrada de agua al acuífero, como recarga o infiltración eficaz, según la precipitación anual calculada para la serie 1975 - 2009 con el método del ión cloruro (Custodio y Llamas 1983) y de variación de niveles usando la aplicación Liqko (Alincaastro y Algozino 2010), se definieron dos áreas de recarga anual: en el sector E, al pie de la sierra de Las Peñas, de 40 mm y para el resto de la cuenca 50 mm.

En cuanto a la asignación de las conductividades hidráulicas (Figura 10 y Tabla 2) y dada la gran heterogeneidad de los materiales de la región, se asignaron 11 zonas diferentes que en

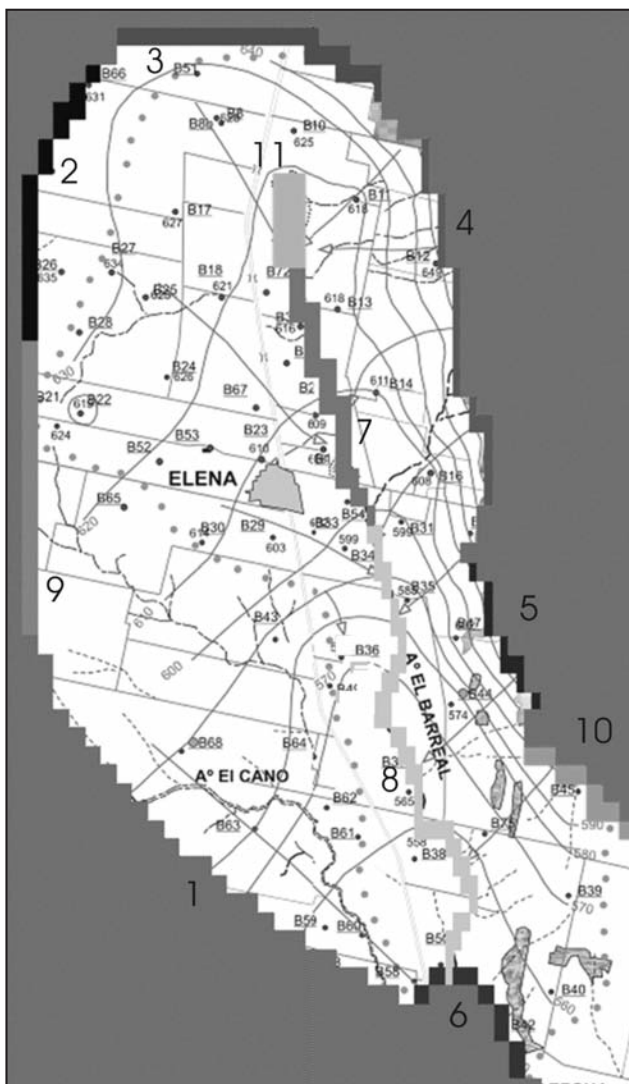


Figura 9. Condiciones de contorno con el número de zona.

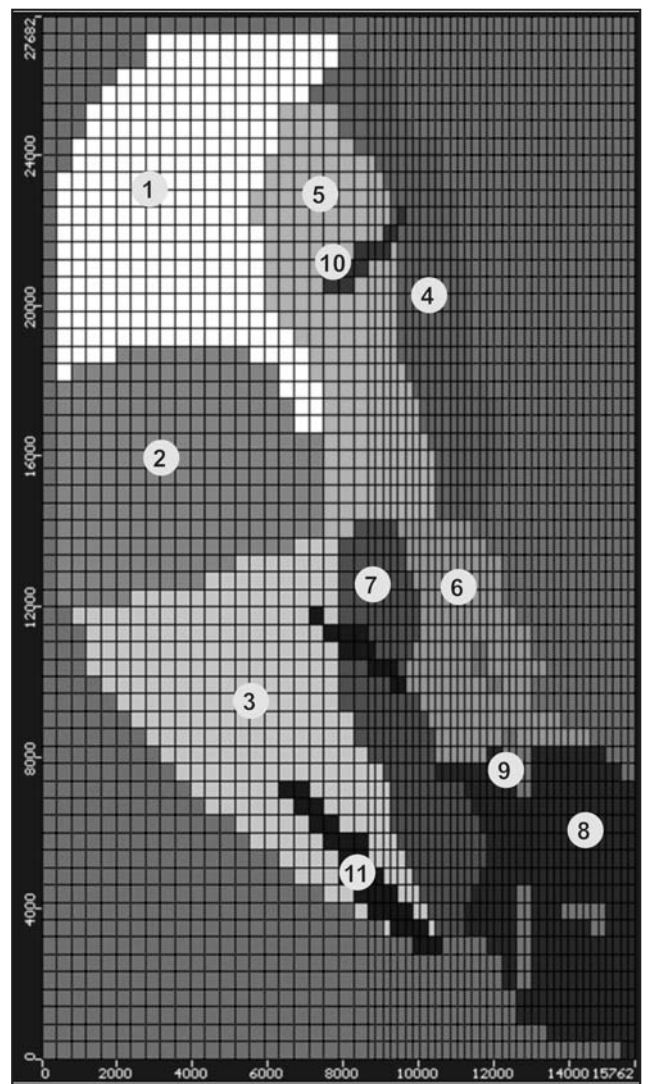


Figura 10. Zonas de conductividades.

términos generales coincidieron con las unidades geomorfológicas descritas. Con la adopción de  $k$  equivalentes se trató de simular la existencia de diversos paleocauces de gran desarrollo portadores de materiales gravosos y arenogravosos (zonas 10 y 11) y en sectores donde la densidad de los paleocauces es de mediana a alta se eligieron valores de  $k$  del orden de los 3 -5 m/d, tal como ocurre en el sector del “Bloque elevado de Elena”, “Bloque Gigena” y la “Llanura suavemente ondulada”, si bien en perforaciones de la zona fueron alumbrados, además, calcretos y niveles loésicos a diferentes profundidades. Para representar los sectores donde aflora el basamento de la Sierra de la Peñas se estimó una  $K= 0,03$  m/d.

Se incluyeron 50 perforaciones, distribuidas en toda la cuenca, en las que se midieron los potenciales hidráulicos, que sirven como puntos de observación para el proceso de calibración (Figura 11). Para la determinación de la cota de referencia de cada punto se empleó la carta del Instituto Geográfico Nacional.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el mapa equipotencial obtenido con la modelación numérica (Figura 12), puede observarse la similitud existente con el observado (Figura 6).

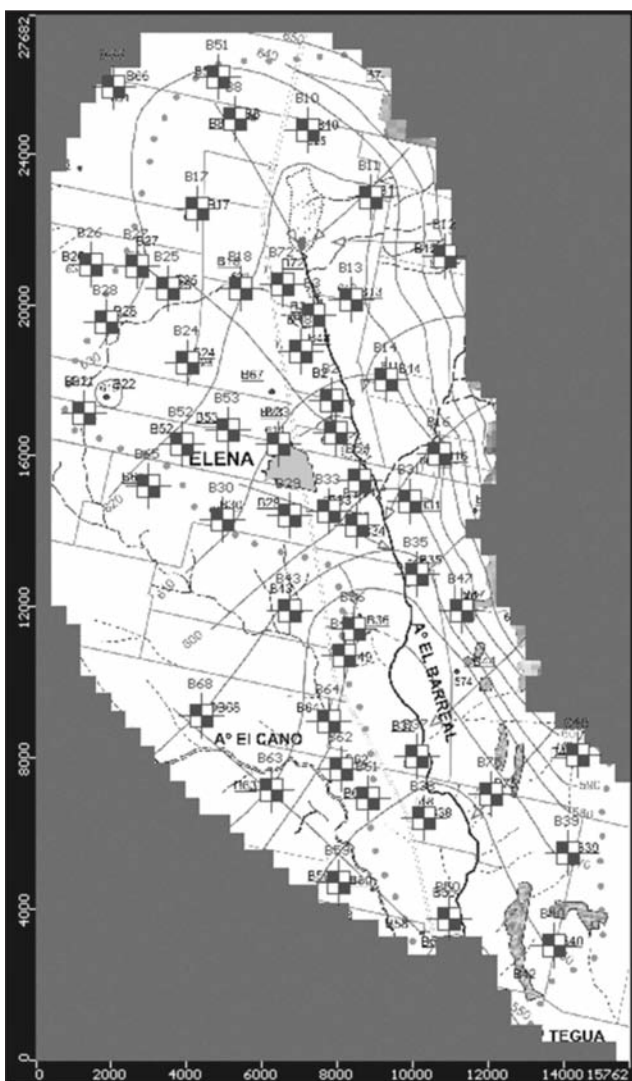


Figura 11. Puntos de observación.

Tabla 2. Conductividades hidráulicas en m/d.

Zona	Valor (m/d)	Zona	Valor(m/d)
1	5	7	5
2	3	8	1,75
3	3,25	9	0,03
4	0,3	10	12
5	6	11	60
6	0,2		

En la Figura 13 se presentan las cargas hidráulicas observadas versus calculadas donde se observa un buen ajuste con un índice de correlación  $R= 0,99$  y un error cuadrático medio normalizado de 4 %. El error medio absoluto es de 3,5 m, aunque se obtuvieron errores significativos en algunos sectores de la cuenca.

En este sentido, son numerosos los factores que pueden contribuir al error, entre ellos la compleja geometría del acuífero, la gran heterogeneidad de los materiales, pendientes muy disímiles en ambas márgenes del arroyo, el cálculo de niveles

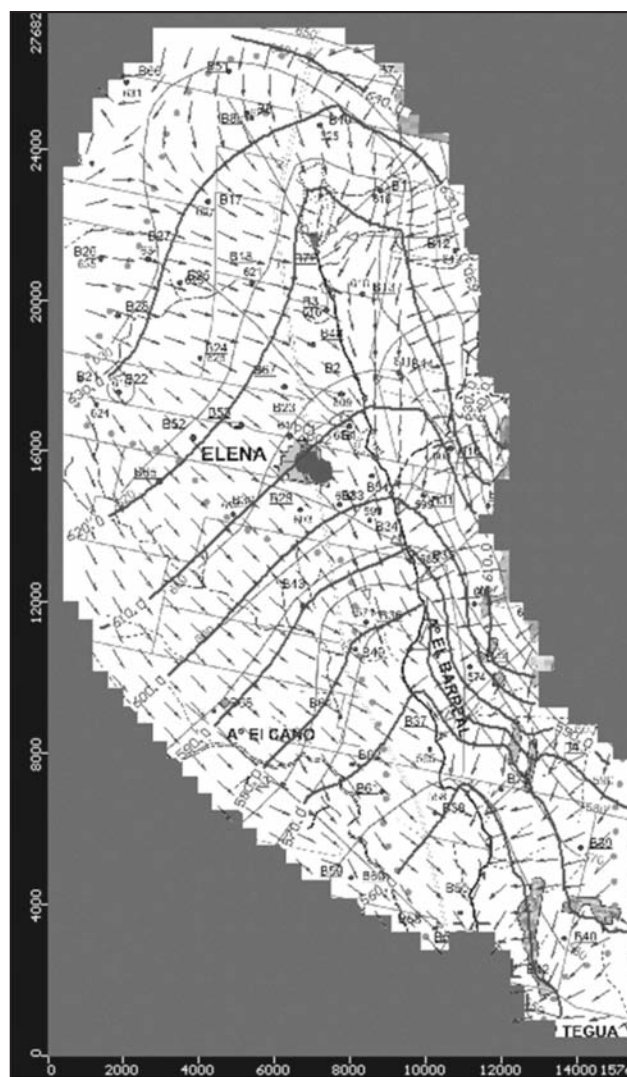


Figura 12. Mapa equipotencial (equidistancia 10 m) y velocidades de flujo.



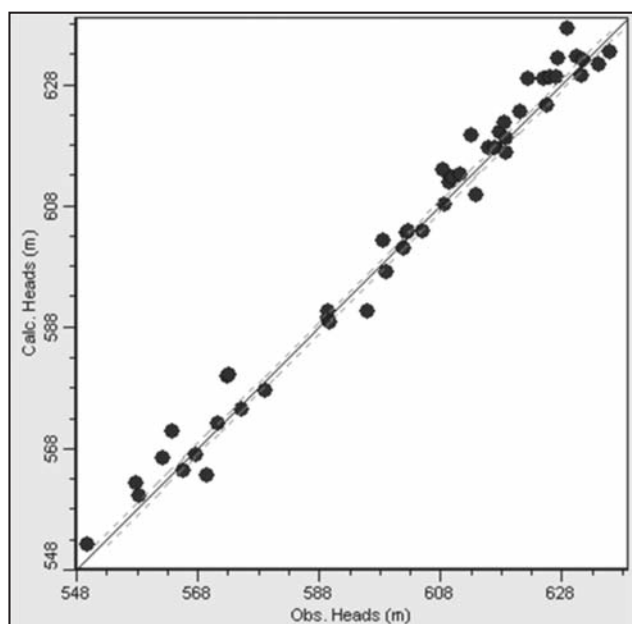


Figura 13. Niveles Medidos vs. Calculados.

piezométricos realizados en base a cartas topográficas con equidistancias de 25 m, entre otros.

La Figura 14 presenta los espesores saturados calculados para los perfiles Oeste-Este de la Figura 8.

En cuanto al balance de masas, puede observarse que las entradas de agua ocurren por recarga areal por infiltración efectiva del agua de lluvia (58,5 %), por diversas secciones de entrada al acuífero (41,5 %) simuladas en las condiciones de borde identificadas en la Figura 9 e identificadas como zonas 9 (3,1 %), 2 (4,0 %), 3 (15,9 %), 4 (0,7 %), 5 (0,3 %), 10 (3,1 %), y en algunos sectores por aporte del arroyo. Los egresos están constituidos en su mayor parte por el drenaje del río (78,1 %) y por la salida de carga constante (17,6 %). Con respecto a la relación agua superficial-subterránea, se observa un predominio del carácter efluente del arroyo, si bien en algún tramo el modelo muestra lo contrario, aspecto no planteado en el modelo conceptual y para trabajar en un futuro ya que corresponde a un sector donde hay menor coincidencia entre las cargas hidráulicas calculadas y observadas. El caudal descargado del acuífero al río (caudal base) por el paso de la ciudad de Elena es de  $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$  y de  $0,215 \text{ m}^3/\text{s}$ , ambos coherentes con los aforos realizados.

Los valores de recarga efectiva resultaron adecuados a la modelación, así como los de conductancia en los cuerpos de agua, aunque podrían ajustarse mejor si es incluido con mayor

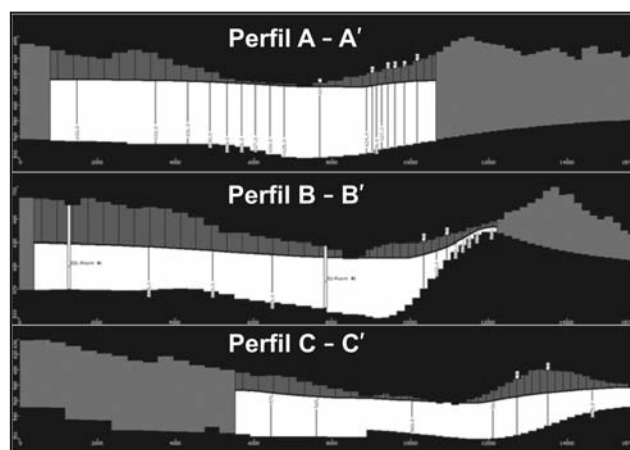


Figura 14. Perfiles piezométricos oeste-este calculados por el modelo, con exageración vertical 1:20.

detalle los diferentes tramos y sus respectivas características geológicas y geomorfológicas.

## CONCLUSIONES

En general el modelo numérico presenta un buen ajuste de niveles, reproduce en forma satisfactoria la configuración de la superficie freática y las direcciones predominantes del flujo, pero fundamentalmente es coherente con el modelo conceptual de funcionamiento del sistema propuesto.

El balance de masas muestra ingresos y egresos de agua a la cuenca coherentes para la zona de estudio; en este sentido se ha monitoreado durante años el caudal del arroyo, arrojando valores coincidentes totalmente en orden de magnitud con el obtenido en la modelación.

El modelo, si bien preliminar, ha sido de utilidad para integrar la información disponible y mejorar el análisis cualitativo del funcionamiento hidrodinámico del acuífero. Un mejor ajuste y una extensión al análisis temporal, permitirá mejorar la calibración e incrementar la confiabilidad del modelo numérico con el objetivo de emplearlo para la gestión de los recursos subterráneos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con subsidio de FONCYT-PICT 562/06 y SECYT-UNRC.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALINCASTRO, N. Y R. ALGOZINO, 2010.  
Liqko. Aplicación informática para el cálculo de la recarga en acuíferos freáticos.  
*Informe de Práctica Profesional de Ingeniería. Dpto de Geología. UNRC*
- CUSTODIO, E. Y M. LLAMAS, 1983.  
Hidrología subterránea.  
*Ediciones Omega. Barcelona. 2 Vol. 1-2350.*
- DEGIOVANNI, S. Y CANTÚ, M. 1997.  
Neotectonic activity in the La Cruz-Gigena depresión, Córdoba, Argentina.  
*IV International Conference on Geomorphology. Tomo I. Bologna. Italia.*

DEGIOVANNI,S., VILLEGAS, M., BLARASIN, M. Y SAGRIPANTI G. COLABORADORES:

MATTEODA, E., DOFFO, N. Y VILLALBA, G. 2005.

“Hoja Geológica 3363-III-Río Cuarto”.

*Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Boletín N° 349. SEGEMAR. 95 pp.*

*ISSN: 0328-233*

MATTEODA, E., BLARASIN, M, DAMILANO, G. Y CABRERA, A. 2007.

Valores característicos del fondo natural de flúor y arsénico en aguas subterráneas en la cuenca del arroyo

El Barreal, Córdoba.

*II Taller sobre arsénico en aguas. V Congreso Hidrogeológico Argentino. Entre Ríos. 31-41. ISBN: 978-987-23936-4-9.*

MATTEODA E., BLARASIN M., DAMILANO, G. Y CABRERA, A. 2008.

Contaminación por nitratos en el acuífero freático: análisis del fondo natural y relaciones con las actividades de uso del territorio.

*IX Congreso ALHSUD. Quito, Ecuador.*

MC DONALD, M.G. AND HARBAUGH, A. 1988.

A modular three dimensional finite difference groundwater flow model.

*USGS. Techniques of Water resources investigations. Book 6. Chapter A1.*