

MODELO HIDRODINÁMICO EN UNA CUENCA DE LANURA TRIBUTARIA DEL RÍO DE LA PLATA (BUENOS AIRES, ARGENTINA)

Nilda GONZÁLEZ¹
María Marta TROVATTO²
Mario A. HERNÁNDEZ³

RESUMEN

Se plantea para la cuenca Martín-Carnaval, un modelo conceptual hidrodinámico basado en siete años de estudios. Se distinguen dentro del sistema geohidrológico los subsistemas Activo (Zona No-Saturada y acuíferos freático + semilibre Pampeano + semiconfinado Puelche) y Profundo (acuíferos Paraná y Olivos) sobre un basamento acuífugo, analizándose las interrelaciones dentro del primero. La recarga ocurre por la ZNS y conjunto freático-Pampeano hacia el semiconfinado en los sectores medio-superior, invirtiéndose el sentido del flujo vertical en la planicie del río de la Plata. La circulación horizontal incluye la descarga como caudal básico del subsistema activo y el flujo regional hacia el río de la Plata. Considerando el sector medio-superior, los resultados del modelo indican sobre 34.7 hm³ de excesos, salidas de 1.82 hm³ por efluencia superficial, 7.0 hm³ por filtración vertical (de los cuales 1.31 hm³ egresan por el acuífero semiconfinado), 0.63 hm³ por efluencia freática y 5.4 hm³ son extraídos por bombeo, con una variación de almacenaje de 18.54 hm³. En una zona del sector medio, la relación hidráulica favorece al acuífero semiconfinado, con transferencia vertical ascendente. Comparando los aportes netos con la efluencia subterránea se verifica la validez de las cifras, controlándose las variaciones del almacenamiento a través de una red de registro en operación.

ABSTRACT

A conceptual hydrodynamic model based on seven years of study is formulated for the Martín-Carnaval basin. Considering a geohydrologic system divided into two subsystems: active (non-saturated zone and the phreatic + semifree Pampean + semiconfined Puelche aquifers) and deep (Parana and Olivos aquifers, located on an aquifuge basement), a discussion on the interrelations in the former subsystem is presented. The recharge occurs by the non-saturated zone and the phreatic-Pampean aquifers to the semiconfined aquifer in the medium-higher sector, while in the River Plate coastal plain the direction of the upward flow reverses. The horizontal circulation includes the discharge as the base flow of the active subsystem and the regional flow to the River Plate. Considering a surplus of 34.7 hm³, the results of the model in the middle-upper sector show an output of 1.82 hm³ by surface outflow, 7.0 hm³ by vertical leakage (1.31 hm³ of which flow by the semiconfined aquifer), 0.63 hm³ by phreatic outflow and 5.4 hm³ are extracted by pumping with a storage variation of 18.54 hm³. In an area of the medium sector, the hydraulic relation favours the semiconfined aquifer, with an upward vertical transfer. When the net inputs are compared with the groundwater outflow, the validity of the magnitudes can be corroborated, the storage variations being controlled through a recording network under operation.

Palabras clave: Hidrogeología de llanuras (Flatland Hydrogeology), Geohidrología (Geohydrology), Modelo conceptual (Conceptual model), Modelo hidrodinámico (Hydrodynamic model).

¹ Cát. de Hidrogeología. Universidad Nacional de La Plata – CIC. Email nilda_h@sinectis.com.ar

² Becaria Universidad Nacional de La Plata – Email mariamar@netverk.com.ar

³ Cát. de Hidrogeología. Universidad Nacional de La Plata. CONICET. Email mario_h@sinectis.com.ar

INTRODUCCIÓN

Desde el año 1994 la Cátedra de Hidrogeología de la Universidad Nacional de La Plata viene realizando estudios geohidrológicos en la cuenca de los arroyos Martín-Carnaval, tributaria del río de la Plata y próxima a la ciudad homónima. El objetivo inicial fue el seguimiento hidrodinámico e hidroquímico de la Zona No-Saturada (ZNS) y acuífero freático y el establecimiento de un "background" ambiental referido a la presencia de nitratos, nitritos, metales pesados e hidrocarburos.

Los resultados logrados para los sectores medio y superior fueron ampliamente difundidos en eventos científicos de Argentina y el exterior (Hernández et al., 1994; González et al., 1997; González et al. 2001; Hernández et al., 2001).

La estrecha relación del acuífero freático con otro semiconfinado denominado *Puelche* (el más explotado en volumen en el país), del cual es la unidad generadora de recarga, motivó a extender las investigaciones al conjunto en una caracterización cuantitativa en tres dimensiones y ampliada al sector inferior, que corresponde a la planicie de inundación del río de la Plata. Se densificó en consecuencia la red de monitoreo que se viene operando desde 1994, tanto en sentido vertical como areal.

Se llega de esta manera a la formulación de un modelo conceptual hidrodinámico, base sobre la cual fue desarrollada una modelación matemática, en la intención de contar con herramientas adecuadas para la simulación y pronóstico de la evolución de la explotación y sus implicancias ambientales.

CARACTERÍSTICAS DEL AREA

Con una extensión de 130 km², la cuenca se desarrolla en sentido SW-NE desembocando en el río de la Plata (Figura 1). Los límites de la misma están dados al NW por la cuenca de los arroyos Pereyra - San Juan, al SE por la del arroyo Rodríguez y al Sur por la cuenca del río Samborombón. La pendiente media es del orden de 1.10^{-3} distinguiéndose claramente, por un quiebre topográfico, una unidad morfológica de mayor expresión y elevación (sectores medio y superior), de la planicie aluvial del río (sector inferior) donde la pendiente desciende a valores de 2×10^{-4} . Coinciden estas geoformas mayores con la presencia de sedimentos continentales del Pleistoceno Superior (*Pampeano*) en la primera, y remanentes de una ingresión marina holocena en la restante, cuyo testimonio es la presencia de cordones conchiles alineados paralelamente al mencionado quiebre de pendiente. Geoformas menores son los propios valles de los arroyos y los interfluvios, que suelen presentar restos desbastados de dunas continentales holocenas.

El clima es de régimen subhúmedo-húmedo, con una precipitación media anual del orden de 1028mm (1909-2000) de los cuales 783mm/año son sustraídos por evapotranspiración, 30mm/año disipados superficialmente y 215mm/año ingresados al sistema subterráneo. De ellos, 147.5mm/año conformarían la recarga de un acuífero semiconfinado. El drenaje es de diseño dendrítico en el sector superior, característica que se desdibuja aguas abajo hasta transformarse en un escurrimiento divagante al ingresar a la planicie, de características anegables.

El escurrimiento se halla facilitado por la canalización parcial del Ao. Martín en su tramo inferior, y de ambos a partir de su confluencia hasta la desembocadura, aunque suele presentar reflujos de importancia en posiciones de pleamar del estuario, en coincidencia con vientos del cuadrante Sudeste.

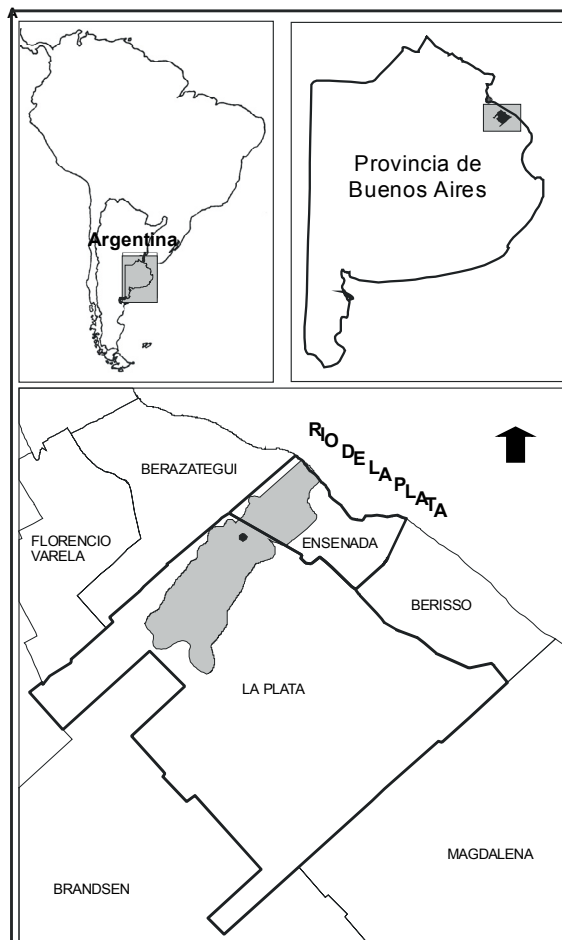


Figura 1: Mapa de ubicación

Los suelos son *Argiudoles vérticos* y *acuérticos*, *Natracuoles* y *Natracualfes* en los sectores medio y superior, *Natracuertes* en la planicie aluvial y *Rendoles* en coincidencia con

los cordones conchiles que marcan la interfase entre las geoformas mayores.

Las principales radicaciones urbanas son las localidades de City Bell, Villa Elisa, Abasto, Colonia Urquiza y Arturo Seguí, contando con una población total de aproximadamente 54.000 habitantes. Las tres primeras tienen parte de su ejido atendido por servicios de provisión de agua y cloacas. La actividad socioeconómica primaria fundamental es la agricultura intensiva (horticultura y floricultura), con un mediano desarrollo de la secundaria (servicios) en los centros mencionados y terciaria (industrial) en el sector medio.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA GEOHIDROLÓGICO

La relación entre el flujo del agua subterránea y la conformación geológica del sistema en estudio, permiten diferenciar las componentes básicas del sistema geohidrológico con sus límites, compuesto por:

- la **Zona No-Saturada** (ZNS) entre la superficie del terreno y el nivel freático como límites superior e inferior, límites laterales dados por las divisorias con las cuencas aledañas, supuestos como “impermeables” a fines del modelo, presentando espesores medios para la cuenca superior y media del orden de los 4 m, con extremos de hasta 10 m y menores a 1m, en los sectores interfluviales e inferior, respectivamente.
- el **acuífero freático** y un **acuífero semilibre** asociado, contenidos en los depósitos de la *Formación Pampeano* miembro superior (parcialmente en los sedimentos holocenos en las partes bajas y sector inferior de la cuenca), que desde el punto de vista hidráulico se comportan como una sola unidad, con la superficie freática como límite superior y el techo del acuitardo como límite inferior, ambos considerados permeables. El espesor promedio reconocido a partir de los perfiles geológicos de la zona es del orden de 35 m.
- un **acuitardo**, representado por la *Formación Pampeano* miembro inferior, con un espesor promedio de 6 m y sus límites superior e inferior semipermeables.
- el **acuífero semiconfinado Puelche**, correspondiente a las arenas de la formación homónima, con su límite superior permeable y el inferior impermeable, profundizándose hacia el Norte de la cuenca y presentando un espesor promedio de 22 m, el cual aumenta también hacia el Norte.
- un **acuicludo**, representado por la sección arcillosa o cuspidal de la *Formación Paraná*, considerado en su nivel superior como base del sistema geohidrológico activo.

La información geológica de las unidades fue extraída de 64 perfiles de la cuenca y zonas aledañas, de los cuales el 50% se ubica en las localidades de City Bell y Villa Elisa (sector N-NE de la cuenca) coincidentes con la mayor densidad de población y por ende mayor disponibilidad de perforaciones. En contraposición, en el sector S-SW la densidad de pozos es menor, asociado esto a un predominio de población rural, dedicada a la actividad florihortícola y sin información geológica documentada de las perforaciones existentes.

MODELO CONCEPTUAL

El funcionamiento del sistema geohidrológico mostrado en la Figura 2, se ha planteado a partir del análisis de la información recopilada durante siete años y la aplicación de determinadas metodologías, sobre la base de registros obtenidos en tres áreas experimentales, ubicadas cada una de ellas en los sectores superior, medio e inferior de la cuenca. Es dable aclarar que, tanto la incorporación de la información vinculada al acuitardo y acuífero semiconfinado y sus relaciones con el acuífero freático + semilibre, como su análisis, corresponden al período marzo-setiembre de 2001.

El sistema funciona con la entrada o “input” proveniente de las precipitaciones (P), que junto con otros datos meteorológicos y la aplicación del método Thornthwaite-Matter para la resolución de balances mensuales y diarios seriados y consecutivos en el período 01/10/1999-30/09/2001, permitieron obtener un volumen correspondiente a la evapotranspiración real (Evtr) y otro de excesos o aporte neto.

Dado que se elaboraron balances diarios secuentes a partir de 01/01/1995 hasta la actualidad, al 1/10/1999 se contó con una partida suficientemente real de almacenaje de agua útil del día anterior. La evolución del balance diario secuente fue controlada con una serie freatigráfica (González et al., 2001).

Luego de alcanzada la capacidad de campo de los suelos del área (200 mm de acuerdo a la textura y profundidad radicular) y atravesar la zona no saturada, el volumen de excesos se traduce en la recarga para el subsistema activo, ingresando en principio al acuífero freático + semilibre. A expensas de la diferencia de niveles freáticos y piezométricos a favor de los primeros con un valor promedio de 1,35 m, calculado sobre las posiciones de niveles de marzo a septiembre de 2001, se produce la filtración vertical (Fv) descendente a través del acuitardo interpuesto, constituyendo la recarga del acuífero semiconfinado.

Este proceso predomina en los sectores superior y medio de la cuenca, mientras que la

filtración vertical ascendente se presenta en la cuenca inferior, en la parte inferior del sector medio y en un área coincidente con el álveo del arroyo Carnaval.

En lo que respecta a las salidas o "output" del sistema, se reconocen el escurrimiento fluvial (Ef) incluyendo el escurrimiento básico

(Eb) producido por el aporte del acuífero freático a los cursos superficiales, en su comportamiento influente. El valor del escurrimiento superficial y básico se ha estimado como un porcentaje de la precipitación, del orden del 3%, por cotejo con otras cuencas semejantes y ante la ausencia de registros o aforos.

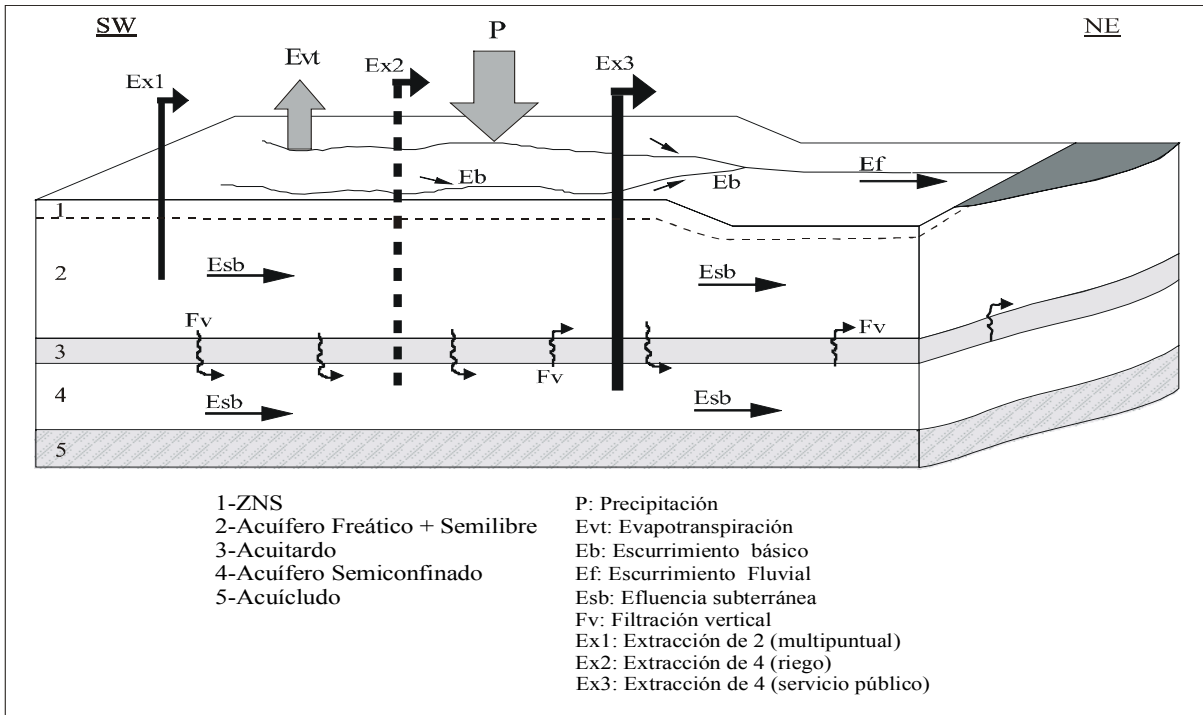


Figura 2: Diagrama de flujo

La efluencia subterránea (Esb) en los acuíferos freático + semilibre y semiconfinado constituye otro vector de salida, con dirección de flujo general hacia el NNE (río de la Plata). En particular, la dirección de la efluencia subterránea del acuífero semiconfinado es influenciada en las localidades de City Bell y Villa Elisa por la actividad extractiva destinada al abastecimiento público y privado (Ex3), que junto con la extracción para riego (Ex2) constituyen el último "output" o salida del modelo conceptual, sujeto a consideración en la modelación matemática aplicada.

En cuanto a la hidrodinámica analizada para el período 03/2001-09/2001, se compararon posiciones extremas de los niveles freáticos y piezométricos (marzo-setiembre) observándose una elevación de los mismos, ocasionada por la ocurrencia de precipitaciones mayores a la media anual (1168 mm para 10/99-09/00 y 1364 mm para 10/00-09/01).

MODELO MATEMÁTICO

Con el estudio y análisis del comportamiento del sistema acuífero real, el

modelo de flujo en zona saturada ha sido construido utilizando el código de simulación MODFLOW (McDonald, y Harbaugh, 1996; Hernández García, 1996), modelo tridimensional en diferencias finitas y en bloque centrado.

La **discretización espacial** o grilla definida consta de 47 filas x 33 columnas x 6 capas, generando un total de 9306 celdas, de las cuales 3510 son activas, presentando la mayoría de ellas un tamaño de 500 m x 500 m. Para los sectores de la cuenca donde se ubican las localidades de City Bell y Villa Elisa, junto con la zona flori-hortícola, se estableció un tamaño menor de las celdas con el fin de tener mayor detalle de los niveles, frente a la mayor densidad de pozos de extracción en esas localidades. La escala de trabajo elegida fue de 1: 25000 y el área involucrada en la modelación sólo abarca por el momento los sectores superior y medio de la cuenca (aproximadamente 90 km²).

El espesor de las celdas activas es variable, respondiendo a los límites de las capas componentes del subsistema, referenciadas respecto al nivel del mar. Se asignaron dos capas para cada uno de los elementos

intervinientes (acuífero freático + semilibre, acuitado y acuífero semiconfinado) resultando un total de seis.

La información topográfica asignada a cada una de las celdas fue extraída de la cartografía altiplanimétrica convencional a escalas 1:50000 y 1:25000, y nivelación óptica en las zonas de menor pendiente (sector inferior). En cuanto a la información de profundidad, fue proporcionada por la interpretación de perfiles geológicos en la cuenca y zonas aledañas, a partir de los cuales se confeccionaron mapas isopáquicos y paleomorfológicos de las unidades involucradas en el subsistema activo. De ellos fueron levantados los valores correspondientes a cada celda para definir el sistema 3D.

La **discretización temporal** se estableció sobre la base de las mediciones de las profundidades de los niveles freáticos y piezométricos realizadas en el campo, correspondientes a los meses de marzo, mayo, julio y setiembre del año 2001, abarcando un tiempo total de 6 meses.

En principio las corridas se realizaron bajo régimen estacionario y posteriormente en régimen transitorio, con tres períodos de stress de 60 días cada uno para toda la simulación, manteniéndose constante en ellos las acciones exteriores. Para cada período de stress, se definió el factor de multiplicación y el número de pasos de tiempo, y el programa calcula el Δt , constituyendo progresiones geométricas. Se emplearon 25 pasos de tiempo y un factor de 1.3 en cada período considerado, con un criterio de convergencia de 0.01 que permitió en las sucesivas corridas, concurrir a la solución dentro del número de iteraciones establecido por defecto.

Como **características hidráulicas** del subsistema activo (acuíferos freático + semilibre *Pampeano*, acuitado y semiconfinado *Puelche*), se describen para el acuífero freático valores de K entre 1 y 10 m /día (Auge, 1995) y un valor de S equivalente a la porosidad efectiva de 0.1.

Para el acuífero semiconfinado se aplicó un coeficiente de permeabilidad K comprendido entre 10 y 50 m /día y un coeficiente de almacenamiento S de 5×10^{-3} (Auge, 1995), y para el acuitado un valor de K' (permeabilidad vertical) entre 8×10^{-3} y 5×10^{-4} (Sala y Auge, 1973; Auge, 1995). Aplicando el método de recuperación de Theis, se obtuvo a partir de un ensayo de bombeo realizado en un pozo de la localidad de City Bell, un coeficiente de transmisividad (T) de 395 m²/ día, a partir del cual se determinó el coeficiente de permeabilidad (K) de 18 m/d para un espesor de 22 m, presentando ordenes de magnitud semejantes a los obtenidos

por Auge (1995). Los parámetros descriptos fueron ajustados en las diferentes corridas.

En cuanto a las **condiciones de contorno**, se definieron las celdas llamadas de No Flujo y de Carga Constante, donde las primeras marcan los bordes S-SW, W-NW y E-SE considerados impermeables, coincidentes con las divisorias de aguas. Para el borde NNE de la cuenca, conectado al sector inferior no incluido en la modelación, se definieron celdas de carga constante en las seis capas, asignándose los valores correspondientes obtenidos de la interpolación de las curvas freáticas y potenciométricas, para los tres períodos de stress considerados.

Se distinguen además las celdas correspondientes a los arroyos Martín y Carnaval, con las cuales se representó la relación acuífero-arroyo, estableciéndose valores de conductancia sobre la base de la longitud de los tramos de cada curso de agua a lo largo de cada celda, del ancho del mismo y de la estimación de la conductividad hidráulica del material del fondo o lecho del arroyo. Se completa esta información con la carga hidráulica y la cota del fondo en las celdas (Trovato, 2000).

Las **acciones exteriores** consideradas para la modelación del flujo han sido la recarga (input) y el bombeo o extracción de agua del sistema (output).

En régimen estacionario, el modelo respondió de manera sensible a las variaciones en la recarga, en tanto que en régimen transitorio, los valores de excesos, obtenidos del balance hídrico diario, fueron ingresados en los correspondientes períodos de stress, respondiendo adecuadamente como se verá más adelante.

En cuanto al bombeo o extracción, se trabajó en principio con los 62 pozos al acuífero Puelche, registrados para el sistema 3D desde el comienzo, además de los 23 pozos al acuífero freático. Luego se incorporaron los 12 pozos de extracción operados por la empresa responsable del servicio público (para provisión de agua potable a City Bell y Villa Elisa) con un caudal individual de extracción aproximado de 70 m³/h, lográndose mejores resultados en las sucesivas corridas.

El número de pozos de extracción para riego en la zona con actividad flori-hortícola, fue estimado teniendo en cuenta las áreas destinadas a dicha actividad (26,60 km²) y estableciendo un tamaño de área productiva mínima de 10 hectáreas. La extracción individual media es del orden de los 30 m³/h.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados preliminares de la modelación en el sistema 3D en estudio, se

visualizan en las figuras 3 y 4, donde se han representado las curvas medidas y calculadas de los niveles freáticos de Marzo de 2001 y de los niveles piezométricos de Setiembre de 2001 (inicio y fin del período considerado).

El análisis de los valores residuales, obtenidos de la diferencia entre valores medidos y calculados para cada posición: EMS 03/2001= 0.85 y EMS 09/2001= 1.05 (EMS= Error medio absoluto), indica que la aproximación alcanzada es buena, teniendo en cuenta que existen insumos sujetos a ajuste, y que los valores de altura topográfica asignados a cada una de las celdas, fueron levantados en parte de la carta topográfica a escala 1:50.000, presentando diferencias al considerar valores medios.

Esto conlleva a que los pozos que fueron utilizados para el proceso de calibración, registren diferencias del orden de los 0.70 m en promedio.

En la Figura 3 el ajuste logrado para los niveles freáticos calculados se debe, entre otras cosas a una distribución uniforme de los puntos de medición.

Para los niveles piezométricos calculados y mostrados en la Figura 4, el ajuste se alcanza en aquellos sectores con mayor densidad de información correspondiente a los centros urbanos de City Bell y Villa Elisa.

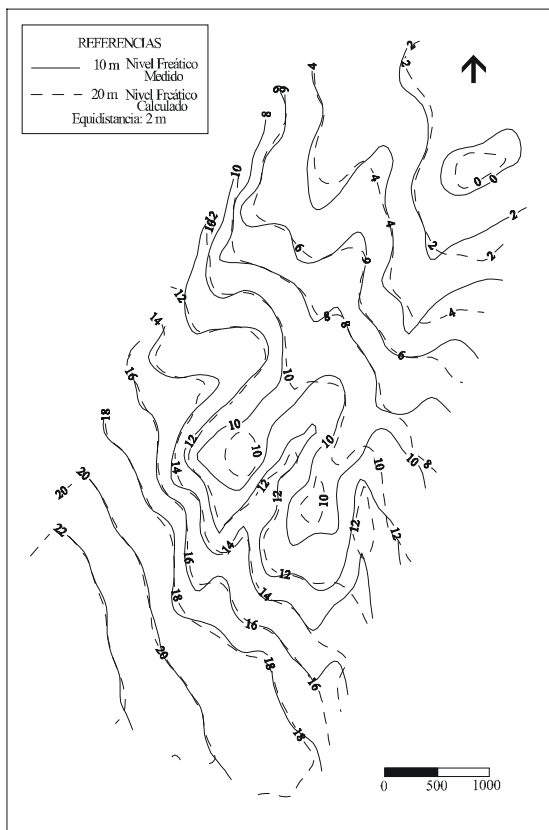


Figura 3: Mapas isofreáticos

En el Cuadro 1 se presenta una síntesis de los resultados. Los insumos (expresados en hm^3 y en mm) correspondientes al período Marzo-Setiembre 2001, son balanceados a través de la expresión **Entradas – Salidas = Variación del Almacenaje**.

Las diferencias resultantes entre los valores estimados y los calculados por el modelo pueden localizarse en algunos de los términos de la ecuación, fundamentalmente en la estimación de la efluencia subterránea (acuífero Puelche) y del volumen asignado a la extracción, los cuales encierran un cierto grado de incertidumbre al considerarse valores aproximativos para la descarga artificial. De todas formas, las diferencias teniendo en cuenta el volumen total de agua en juego, son poco importantes.

A título de conclusiones, puede señalarse la importante magnitud que adquiere la variación de almacenaje positiva en todo el sistema, coincidente con la información procedente de las mediciones freáticas y piezométricas efectuadas en el período considerado, para un lapso de excesiva pluviosidad.

Se destaca además la importancia de la Filtración Vertical como recarga del acuífero Puelche, que prácticamente alcanza a satisfacer la extracción por bombeo y la efluencia subterránea propia. La diferencia está representada por el volumen de los conos de depresión localizados en City Bell y Villa Elisa. Estos conos implican a su vez una sustracción a la efluencia subterránea del acuífero.

También debe señalarse que la Filtración Vertical alcanza en el lapso una magnitud superior a la suma de la efluencia superficial y subterránea freática.

El trabajo de modelación que se presenta se halla en pleno desarrollo, mediante la operación permanente de la red de observación freática y piezométrica instalada.

El aporte de mayor información sobre la hidrogeología de subsuelo a expensas de nuevas perforaciones y pruebas de bombeo para densificar la cuantificación de los parámetros hidráulicos utilizados, acudirá a la mejora de los resultados aquí comunicados.

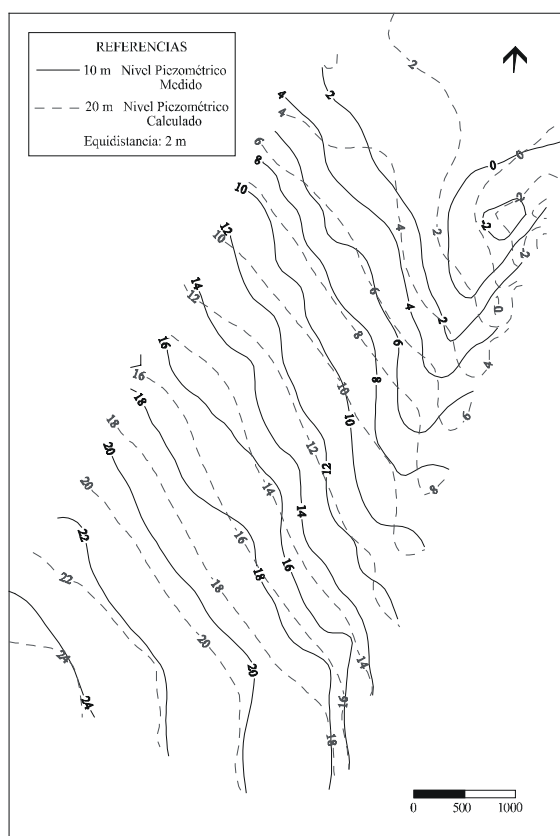


Figura 4: Mapas isopiézicos

| | ENTRADAS | SALIDAS | | | | | VARIACIÓN ALMACENAJE |
|-------------------------|----------|----------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| | | <i>Excesos</i> | <i>Efluencia Superficial</i> | <i>Filtración Vertical</i> | <i>Efluencia Subterr.</i> | <i>Efluencia Subterr.</i> | |
| Estimado (mm) | 390 | 20.8 | 61.3 | 10.4 | 24.1 | 51.2 | 222.2 |
| (hm ³) | 35.0 | 1.87 | 5.5 | 0.93 | 2.16 | 4.6 | 19.94 |
| Modelo (mm) | 386.6 | 20.3 | 78 | 7.0 | 14.6 | 60.2 | 206.6 |
| (hm ³) | 34.7 | 1.82 | 7.0 | 0.63 | 1.31 | 5.4 | 18.54 |

* Insumo sujeto a ajuste

Cuadro 1: Síntesis de resultados

REFERENCIAS

AUGE, M. 1995. Manejo del agua subterránea en La Plata, Argentina. (Groundwater management in La Plata, Argentina). *Convenio UBA-International Development Research Centre*. (Canadá). Buenos Aires (inéd.).

GONZÁLEZ, N., M.A. HERNÁNDEZ y A.V. RUIZ DE GALARRETA. 1997. Balance hidrológico a nivel de la zona no-saturada en un área de la cuenca de los arroyos Martín y Carnaval. La Plata, Pcia. de Buenos Aires, Argentina. (Hydrological balance at level of unsaturated zone in a Martín-Carnaval basin area. La Plata. Pcia. de Buenos Aires). *Actas III Seminario Hispano-Argentino sobre temas actuales de Hidrología Subterránea*, 97-106. B. Blanca.

- GONZÁLEZ, N., M. M. TROVATTO y M. A. HERNÁNDEZ. 2001. La zona no-saturada en áreas de llanura. Estimación de la velocidad de infiltración por correlación diaria aportes-freatigrafía. (The unsaturated zone in flatland areas. Estimation of infiltration velocity by input/phreatigraphy daily correlation). *Las caras del Agua Subterránea. IGME*, I: 249-254. Madrid. ISBN: 84-7840-427-9.
- HERNÁNDEZ, M., A.V. RUIZ DE GALARRETA y L. MINGHINELLI. 1994. Reconocimiento de la zona no saturada y características ambientales del acuífero freático en las Cuencas de los Arroyos Martín y Carnaval. Provincia de Buenos Aires, Argentina. (Unsaturated zone survey and environmental characteristics of the phreatic aquifer in the Martín-Carnaval basin). Buenos Aires Province. Argentina). *2° Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, I: 55-66. Santiago de Chile.
- HERNÁNDEZ M. A., GONZÁLEZ, N. y M. M. TROVATTO. 2001. La zona no-saturada en áreas de llanura. Estimación de la evapotranspiración real por medio del balance hidrológico en la ZNS. (The unsaturated zone in flatland areas. Estimation of actual evapotranspiration through hydrological balance in the Unsaturated Zone) *Las caras del Agua Subterránea. IGME*, I: 241-247. Madrid, ISBN:84-7840-427-9.
- HERNÁNDEZ GARCÍA, G. 1996. Notas para el curso de modelación matemática de flujo de agua subterránea. Tema: MODFLOW. (Notes for the course on groundwater flow mathematical modelation. Theme MODFLOW). *Curso de Hidrogeología. Postgrado en Ciencias de la Tierra. UACPyP-UNAM*. Ciudad Universitaria, México, D.F. (inéd.).
- McDONALD, M.G. y A.W. HARBAUGH. 1996. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Código MODFLOW. *U.S. Geological Survey*.
- SALA, J.M. y M. P. AUGE. 1973. Presencia de capas filtrantes en el noreste de la Provincia de Buenos Aires. Su determinación. (Leaky aquifers presence in the northeast of Buenos Aires Province. Its determination). *Actas V Congreso Geológico Argentino*, V: 185-194. Buenos Aires.
- TROVATTO, M. M.. 2000. Planteo y operación de modelos matemáticos de flujo en zona no saturada y zona saturada. (Statement and operation of flow mathematical models in the unsaturated and saturated zones). *Informe Final Beca de Iniciación UNLP*. La Plata (inéd.).