



## La explotación del recurso hídrico subterráneo: una alternativa para suplementar el abastecimiento a Bahía Blanca, Argentina

### *Exploitation of groundwater resources. an alternative to supplement the water supply to Bahia Blanca, Argentina*

Albouy, Edgardo René <sup>1</sup> ✉ - Carrica, Jorge Carlos <sup>1</sup> - Lexow, Claudio<sup>1-2</sup> - Lafont, Daniela <sup>1</sup> - Bonorino, Guillermo <sup>1</sup>

Recibido: 08 de Julio de 2011 • Aceptado: 27 de Diciembre 2011

#### Resumen

*El advenimiento de años pluviométricamente secos provocó los niveles históricos más bajos del Dique Paso de Las Piedras, que abastece de agua potable a la ciudad de Bahía Blanca, Gran Bahía Blanca y Punta Alta (360.000 habitantes). Esta circunstancia generó una "crisis" hídrica que responde más a problemas de gestión y de control, que a la falta de proyectos técnicos o de la disponibilidad del recurso hídrico. Esta contribución tiene como objetivo demostrar la sustentabilidad de explotación del recurso subterráneo para suplementar el abastecimiento de agua a los mencionados núcleos urbanos. El área de estudio abarca una porción de la cuenca superior-media del Ao. Napostá Chico, en la vertiente suroccidental de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires. El acuífero libre del sector se emplaza en los denominados genéricamente "sedimentos pampeanos" ampliamente difundidos en toda la llanura pedemontana. La información hidrogeológica disponible permitió construir un modelo numérico de flujo subterráneo mediante el programa Modflow a partir del cual se simuló distintos escenarios de bombeo a efectos de analizar el impacto que tendrían las extracciones de agua subterránea sobre la hidrodinámica del acuífero. Los resultados demuestran la factibilidad de extracción de agua subterránea mediante una batería de pozos ubicados en proximidades de la localidad de Cabildo y de los acueductos provenientes del dique. Se concluye que una explotación racional del acuífero, sustentable en el tiempo, constituye una alternativa técnica viable para paliar la crítica situación hídrica.*

**Palabras claves:** recurso hídrico subterráneo - Bahía Blanca - Modflow.

#### Abstract

*The arrival of dry rainfall years resulted in the lowest historical levels of the Paso de Las Piedras dam, which supplies drinking water to Bahía Blanca city, Gran Bahía Blanca and Punta Alta. This situation created a "water crisis" that is mostly due to*

<sup>1</sup> Departamento de Geología (UNS) - San Juan 670 (8000), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

✉ albouy@uns.edu.ar

<sup>2</sup> PAID Comisión de Investigaciones Científicas Prov. de Buenos Aires

control and management problems, than to the lack of technical projects or the availability of the water resource. This contribution aims to demonstrate sustainability of exploitation of groundwater resources to supplement the water supply. The study area covers a sector of the Napostá Chico stream watershed in the southwestern slopes of the Sierras Australes range, Buenos Aires province. The unconfined aquifer is located in the "pampean sediments" widely distributed throughout the piedmont plain. Available hydrogeological information allowed to formulate a numerical flow model by means of the Modflow program. Pumping scenarios were simulated and their impact on the hydrodynamics of the aquifer was tested. The results demonstrate the feasibility of extracting groundwater through a well battery located in close proximity of Cabildo locality. A rational exploitation of the aquifer, sustainable in time, constitutes a viable alternative to alleviate the critical water situation.

**Keywords:** groundwater resource - Bahía Blanca city - Modflow.

## INTRODUCCIÓN

La continua demanda de agua para uso humano e industrial hace necesario contar con un adecuado conocimiento de los recursos hídricos disponibles que permitan llevar a cabo una apropiada planificación hidrológica. A fines de la década de los 80<sup>s</sup> se comenzó un estudio de evaluación de las potenciales fuentes de abastecimiento de agua a Bahía Blanca, Gran Bahía Blanca y Punta Alta (unos 360.000 habitantes) a través de un convenio entre el Ministerio de Obras Públicas, la Comisión de Investigaciones Científicas (ambos de la provincia de Buenos Aires) y la Universidad Nacional del Sur (UNS). Dicho trabajo (*MOP 1990*) consistió en evaluar distintas alternativas para suplementar la única fuente de abastecimiento a las mencionadas ciudades, el dique Paso de las Piedras, limitado por la disponibilidad del recurso y la capacidad de transporte de los acueductos a unos 3 m<sup>3</sup>/s. En el estudio se analizaron distintas propuestas de suministro y se dio prioridad por la relación costo-beneficio a la explotación de 1 m<sup>3</sup>/s de agua subterránea de la capa freática del sector pedemontano de las Sierras Australes, dentro de la cuenca del Ao. Napostá Grande. La situación quedó indefinida hasta que en el año 2000, la empresa Azurix, por entonces concesionaria del servicio, encargó al Grupo de Hidrogeología de la UNS nuevos estudios de agua subterránea. En esa oportunidad, en base a trabajos previos, se seleccionó un área de interfluvio entre las cuencas medias del río Sauce Grande y el Ao. Napostá Chico, cercana a la localidad de Cabildo y al actual acueducto proveniente de Paso de las Piedras. Se planificó la extracción sostenible de hasta 0,8 m<sup>3</sup>/s, caudal que podría incrementarse si la explotación es "a demanda" es decir, estacional (*FUNS 2000*). Con la retirada de la empresa de la concesión del servicio, el proyecto se suspendió.

En el período 2005-2009 se registró en la región una sucesión de años secos con una media pluviométrica de 495 mm muy por debajo del módulo anual (674 mm; período 1960-2009). Este hecho derivó en una notable merma en las reservas del dique Paso de las Piedras que de un volumen máximo de 328 hm<sup>3</sup> pasó a valores por debajo de los 70 hm<sup>3</sup>. Esta situación, denominada por la prensa "crisis hídrica" aún no ha sido revertida, aunque en parte aliviada con algunas acciones y obras de emergencia y por las lluvias ocurridas durante enero del 2011. Las obras paliativas consisten en tomas adicionales de agua superficial y la construcción de algunos pozos someros (de 50 m) para extracción de agua subterránea en el Bajo San José, dentro del valle medio del río Sauce Grande, aguas abajo del embalse.

A partir de esta situación de "crisis" la concesionaria actual del servicio Aguas Bonaerenses S.A. (ABSA) decidió retomar los estudios, realizados en el año 2000, por el Grupo de Hidrogeología de la UNS en la cuenca del Ao. Napostá Chico. El principal objetivo del trabajo fue seleccionar los sectores del

acuífero freático con mayor potencial de producción y mejor calidad química para consumo humano. El área de prospección se restringió, lo más próxima posible, a la traza del acueducto proveniente del dique Paso de las Piedras, a fin de optimizar los costos de transporte del agua. Derivado de dicho objetivo se formuló un modelo numérico de simulación del flujo con el que se pretende sostener que una explotación racional del acuífero constituye una alternativa técnica y económicamente viable para paliar la crítica situación hídrica de la ciudad.

Esta contribución sintetiza la reciente propuesta científico-técnica de explotación del recurso hídrico subterráneo, la que se está ejecutando hoy en día.

## METODOLOGÍA

El método de trabajo se basó en la recopilación de la información previa relevada, la realización de un nuevo censo hidrológico más local, que permitió complementar la información disponible y la ejecución de 12 sondeos eléctricos verticales (SEV) cuyo objeto principal fue estimar la profundidad de los eventuales pozos de explotación. Durante el censo se tomaron muestras de agua subterránea a fin de verificar su aptitud para consumo humano. Los análisis físico-químicos fueron realizados por ABSA y comprendieron la determinación de elementos mayoritarios, nitratos, flúor, arsénico y bacteriológico. En base a la información precedente se propuso un área de explotación en la que se efectuó una perforación de estudio de 137m para determinar las características litológicas y productividad del acuífero. El estudio se complementó con la elaboración de un modelo numérico del flujo subterráneo con MODFLOW (*McDonald y Harbaugh, 1988*) en base al cual se plantearon hipotéticos casos de bombeo y analizaron las situaciones hidrodinámicas generadas en el sistema acuífero modelado.

## ÁREA DE ESTUDIO Y MEDIO FÍSICO

El área de estudio comprende una superficie de unos 300 km<sup>2</sup> en proximidades de la localidad de Cabildo, provincia de Buenos Aires. Se inserta en la zona de interfluvio de las cuencas medias del Ao. Napostá Chico, que la atraviesa de noroeste a sur y del río Sauce Grande, hacia el este (Figura 1). Ambos cursos desaguan parte de la vertiente sur y este de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires.

El clima según los índices de Thornthwaite es subhúmedo-húmedo, mesotermal. La temperatura media anual está en el orden a los 14,7 °C y la lámina anual media precipitada en la localidad de Cabildo es de 674 mm (período 1960-2009). El paisaje forma parte de la denominada área de piedemonte de las Sierras Australes que conecta hacia el sur con la llanura subventánica (*González Uriarte, 1984*). La geología local responde

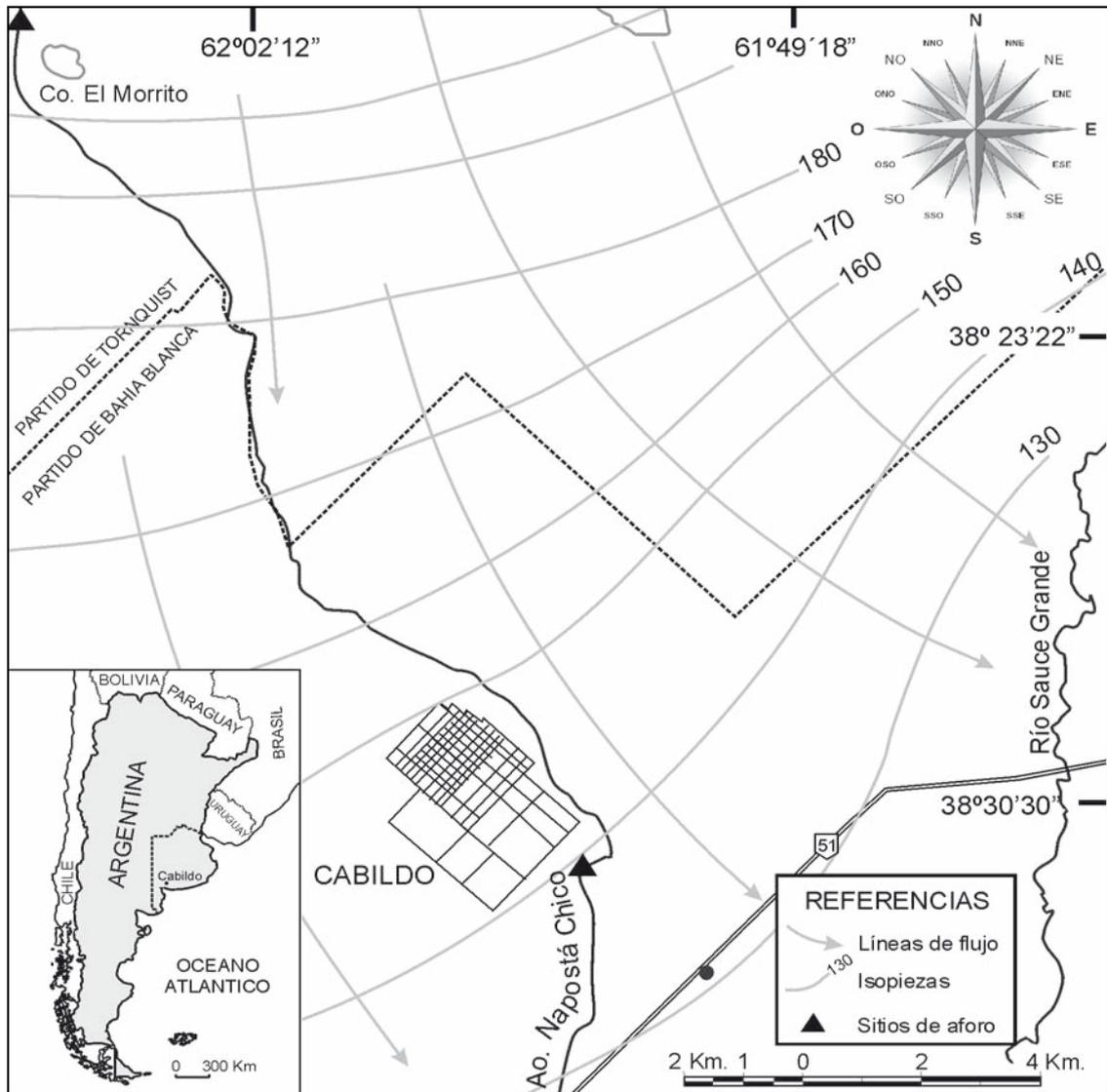


Figura 1. Área de estudio y red de flujo subterráneo (modificado de FUNS 2000).

a las características impuestas por dos regiones morfoestructurales en cuyo límite se inserta el área de estudio: las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires y la Cuenca del Colorado. La cuenca presenta en su mayor parte, un relieve de llanura con suave pendiente hacia el sur. El único elemento orográfico lo constituyen los afloramientos cuarcíticos remanentes de las Sierras de la Ventana, que delimitan hidrológicamente a la cuenca media en el sector septentrional.

La morfología de la zona corresponde a una planicie, suavemente ondulada por la presencia de médanos fijos-semifijos de 1-2 m de altura que la atraviesan en su parte central. La presencia de estos cordones arenosos y la ausencia de tosca en las partes topográficamente bajas del relieve, resultan de suma importancia en la infiltración del agua de lluvia y recarga del acuífero. El Ao. Napostá Chico presenta un régimen efluente y permanente hasta la localidad de Cabildo a partir de donde adquiere un carácter influente hasta desaparecer por infiltración en proximidades de Bahía Blanca. El módulo anual al ingresar al área de estudio (ver Figura 1) se estimó en 0,2 m<sup>3</sup>/s y a la altura de Cabildo, en 0,5 m<sup>3</sup>/s (FUNS 2000). El río Sauce Grande es de carácter permanente y ganador con un caudal básico

en la zona, de unos 0,6 a 0,7 m<sup>3</sup>/s debido al cierre total que ejerce el dique Paso de las Piedras. Ambos ingresan a la llanura como cursos maduros, alóctonos y con valles encajonados producto del rejuvenecimiento del paisaje.

#### HIDROGEOLOGÍA

El área de estudio se inserta en la región hidrogeológica interserrana y periserrana (González 2005). El basamento hidrogeológico está conformado por cuarcitas y areniscas cuarzosas paleozoicas de la Fm. Trocadero (Harrington 1947 en Llambías y Prozzi 1975) que afloran en la margen derecha del Dique Paso de las Piedras y en las últimas estribaciones serranas que limitan el área de estudio por el norte. De acuerdo a los estudios geofísicos realizados (SEV) se profundiza hacia el sur habiéndose detectado a unos 450 m de profundidad en el límite austral del área de estudio (FUNS 2010). Una perforación exploratoria realizada por ABSA en el Bajo San José (10km al este de Cabildo) alcanzó a los 396 m b.b.p. rocas masivas que a partir de los 442 m b.b.p. se identifican como granitos miloníticos. En este sector existe una concordancia entre el basamento hidrogeológico y el geológico por la ausencia de la cobertura sedimentaria paleozoica. Por encima, se atravesaron unos 75m de

sedimentos continentales adjudicados a la Fm. Ombucta, del Eoceno-Oligoceno (Yrigoyen 1969 en Bonorino 1988) con características acuitardas-acuícludas. Estos sedimentos pasan transicionalmente hacia arriba a la Fm. Barranca Final, conocida regionalmente como “Mioceno Verde”, o “ingresión paranaense” de ambiente de sedimentación marino de plataforma, que se extendería hasta los 236 m b.b.p. Se trata de niveles acuícludos y acuitardos intercalados con algunos niveles acuíferos, con agua de elevada salinidad (Figura 2).

Por encima aparecen los denominados “sedimentos pampeanos” (Fidalgo et al. 1975) del Mioceno superior-Plioceno superior que conforman las zonas saturada y de aireación. En el área de estudio se estiman espesores de unos 180 m, que se acuñan hacia los afloramientos serranos. Se tratan de limos arenosos y hasta arcillosos, macizos, cementados con carbonato de calcio y rematados por niveles de tosca (2 a 3 m de espesor) que la caracterizan. La tosca aflora en las lomas mientras que en los bajos es discontinua o puede estar ausente.

EDAD	Prof. m	FORMACION	LITOLOGIA
PLEISTOCENO SUPERIOR	- 250	LA NORMA	
MIOCENO MEDIO		"Sedimentos Pampeanos" limos-arenas acuíferos- acuitardos	
MIOCENO		BARRANCA FINAL arcillas-limos acuícludo-acuitardo	
EOCENO-OLIGOCENO		OMBUCTA arcillas-limos acuícludo-acuitardo	
TRIASICO A PRECAMBRICO	- 400	BASAMENTO HIDROGEOLOGICO cuarcitas acuífugo	

Figura 2. Esquema hidroestratigráfico.

Los “sedimentos pampeanos” presentan anisotropías hidrolitológicas que dan lugar a una alternancia de niveles acuíferos-acuitardos (sistema multicapa) con un comportamiento hidráulico único. Los sondeos eléctricos verticales indican la presencia en el área de estudio de niveles acuitardos y/o acuícludos a unos 180-200 m de profundidad que podrían constituir el hidroapoyo del acuífero freático (FUNS 2010). Ensayos de bombeo, a caudal constante, realizados en los primeros 100 m de espesor saturado arrojaron transmisividades promedio de 144 m<sup>2</sup>/d con máximos de hasta 230 m<sup>2</sup>/d y coeficientes de almacenamiento del orden de 0,1, con drenaje diferido (Albouy et al. 2005; FUNS 2000).

La capa freática presenta una morfología radial divergente con dos zonas de recarga preferenciales: una en el sector pedemontano de las sierras y otra coincidente con la presencia de cordones medianos en el sector meridional del área de estudio y cuya delimitación resulta más evidente desde un punto de vista hidroquímico que hidrodinámico. En la zona medana, la recarga preferencial favorece la calidad química del agua del acuífero, cuya conductividad eléctrica, en general, no supera los 1000 µS/cm. Es del tipo bicarbonatada clorurada calcio-sódica y químicamente potable hasta las profundidades de los ensayos realizados, es decir unos 100 m de espesor saturado (FUNS 2010). Las zonas de descarga del acuífero libre son los cursos efluentes que drenan el área.

La descripción de las características hidrogeológicas e hidrolitológicas precedente permite establecer que la principal fuente de explotación de agua subterránea de la zona, la constituye la capa freática, descartándose, en principio, la explotación de niveles acuíferos más profundos (FUNS 2000).

### RECARGA Y RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

La recarga por agua de lluvia en el área de estudio se cuantificó mediante balances hidrológicos a nivel cuenca y del ión cloruro, obteniéndose un valor promedio del 12,5% de la precipitación media, esto es unos 84 mm/año (FUNS 2000) valor coherente con los obtenidos por otros autores en climas semiáridos-semihúmedos con suelos arenosos (Carrica 2009).

El ingreso subterráneo de agua por el límite norte del área de trabajo (ver Figura 1) se estimó en base a balances hidrológicos, el mapa de isopiezas, la permeabilidad calculada por ensayos de bombeo y el espesor del acuífero libre inferido mediante geoelectrónica (Albouy et al. 2010). Esta recarga indirecta puede cuantificarse en unos 14.500 m<sup>3</sup>/d (5,3 hm<sup>3</sup>/año) de los cuales un 35% (5000 m<sup>3</sup>/d) pasaría a formar parte del escurrimiento subterráneo profundo (Bonorino 1988; Carrica 1998). El recurso hídrico subterráneo dentro del área estudiada equivaldría a la recarga media por agua de lluvia (16,8 hm<sup>3</sup>/año) más el aporte por escurrimiento subterráneo proveniente de la cuenca superior (3,4 hm<sup>3</sup>/año). Ello totaliza unos 20 hm<sup>3</sup>/año que en términos de consumo equivalen a 0,63 m<sup>3</sup>/s. Considerando un espesor medio saturado de 160 m, un área de unos 200 km<sup>2</sup> y una porosidad eficaz de 0,1 las reservas totales de agua se cifrarían en el orden a los 3.220 hm<sup>3</sup>.

En el área del trabajo, sobre la margen izquierda del arroyo Napostá Chico y hasta el río Sauce Grande, no existe ninguna explotación significativa del acuífero; las extracciones de agua se limitan a establecimientos rurales y para uso doméstico. La localidad de Cabildo, de unos 2000 habitantes, se abastece de dos perforaciones ubicadas sobre la margen derecha del Ao. Napostá Chico.

### MODELO NUMÉRICO DE FLUJO SUBTERRÁNEO

En este apartado se describe el modelo de simulación del flujo de agua subterránea en una porción del acuífero freático, con el empleo del 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. El objetivo de la simulación ha sido integrar la información hidrogeológica del acuífero y cuantificar los procesos físicos actuantes. Además, el modelo construido sirve de herramienta para analizar cualitativa y cuantitativamente los efectos hidrodinámicos del bombeo sobre el acuífero y demostrar la viabilidad de la explotación racional del agua subterránea para paliar la crítica situación hídrica de la ciudad.

El modelo abarca un área activa de unos 300 km<sup>2</sup> que se discretizó en 116 filas, 91 columnas de 180 m de lado y una

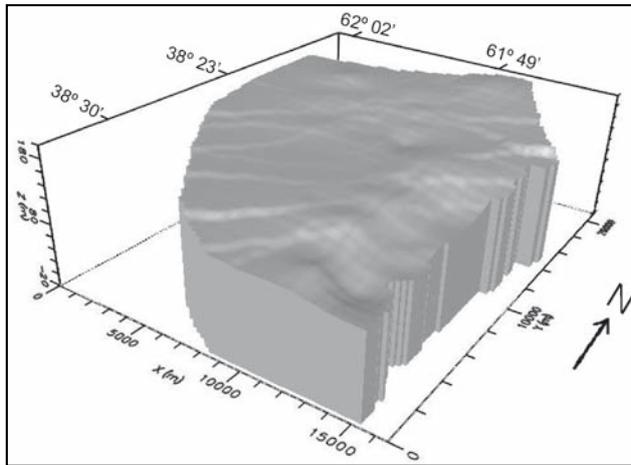


Figura 3. Diagrama de la topografía en 3D.

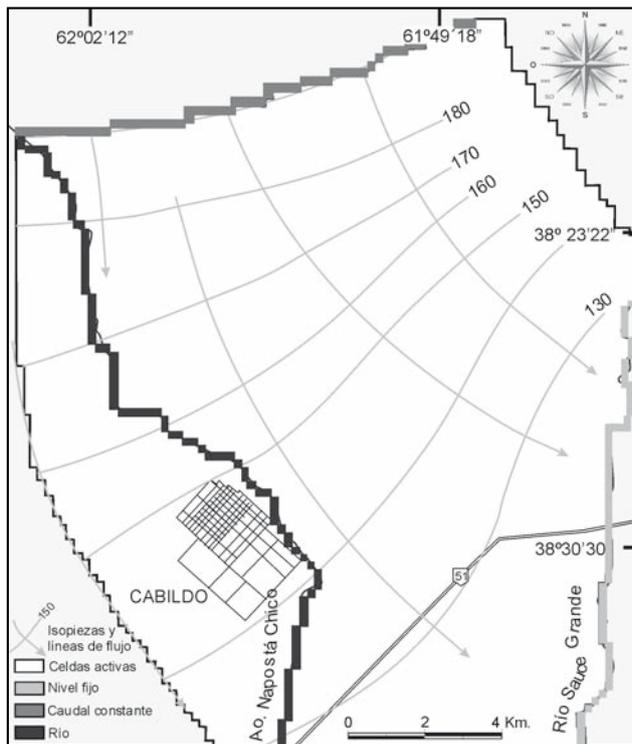


Figura 4. Área del modelo y condiciones de borde.

capa de sedimentos pampeanos de 160 m de espesor medio correspondiente a lo que se considera como capa freática. La relación espacial entre el espesor del acuífero y su extensión areal permiten considerar la dirección del flujo subterráneo, como esencialmente horizontal. Las celdas están limitadas, arriba, por el nivel de terreno y abajo por la presencia de una capa predominantemente arcillosa que constituye el hidroapoyo del acuífero (FUNS 2000). La base topográfica se construyó a partir de la Hoja 3963-12-1 (CABILDO) en escala 1:50.000 del IGM. El área tiene una altura entre 200 m s.n.m. (hacia el norte) y 120 m s.n.m. (en la porción sur) (Figura 3).

Las condiciones de contorno asignadas en los límites de la zona de estudio son: nivel fijo al este y sureste (en correspondencia con el curso effluente y permanente del río Sauce Grande); por el norte se introdujeron caudales de ingreso de agua subterránea y por el noreste y oeste una condición de caudal nulo siguiendo líneas de flujo. Dentro del área del modelo se estableció una condición tipo río en coincidencia con el curso del Ao. Napostá Chico que atraviesa el sector del modelo de norte a sur (Figura 4). La condición de flujo nulo siguiendo una línea de escurrimiento subterráneo impuesta hacia el sur, debe tomarse como un límite teórico y aproximado a la realidad, ya que la ausencia de información hidrodinámica del acuífero no permiten extender el modelo hacia ese sector.

Para construir el modelo en régimen estacionario se tomó como base el mapa de isopiezas de julio del 2000 (Figura 1) asumiendo que el mismo representa una condición media temporal de los niveles freáticos.

#### Ingresos de agua del modelo

El principal ingreso de agua al sistema es la recarga a partir del agua de lluvia. En base al modelo conceptual descrito en párrafos anteriores, la misma está en el orden al 12,5% de la precipitación, es decir 84 mm/año. El otro ingreso significativo de agua al modelo lo constituye el flujo subterráneo proveniente de la cuenca superior del Ao.. Este valor se estimó en torno a los 14500 m<sup>3</sup>/d de acuerdo a la información piezométrica, geoelectrica e hidráulica obtenida en estudios previos (FUNS 2000).

#### Calibración y resultados en régimen estacionario

La calibración se realizó mediante el método de prueba y error. Los parámetros utilizados en el proceso fueron la recarga, la conductancia del río y los caudales subterráneos que ingresan por el borde norte del modelo. La conductividad hidráulica asignada a toda la capa fue de 1,7 m/d correspondiente al valor promedio obtenido a través de los seis ensayos de bombeo efectuados en el área estudiada (FUNS 2000; Albouy et al. 2005). El valor de la recarga calculado, corresponde a un valor medio para el área, por lo que se lo asignó de manera uniforme sobre todas las celdas activas.

Sobre el curso del Ao. Napostá Chico se estableció una condición mixta tipo río. La cota del fondo del cauce en el origen se impuso en 189 m variable hasta la celda donde finaliza con una cota de 120 m y un tirante de agua medio a lo largo de todo el trayecto de 1 m. La conductancia hidráulica del río (C) se estableció según la conductividad hidráulica de los materiales del fondo (K<sub>0</sub>), la longitud del río en cada celda (L), el ancho del río (W) y el espesor del material del lecho (M) de acuerdo a la siguiente relación:

Durante la calibración se obtuvo una conductancia hidráulica entre 250 m<sup>2</sup>/d y 500 m<sup>2</sup>/d que arroja una descarga subterránea coherente con los valores de caudal básico aforados (FUNS 2000). Tales valores se obtienen considerando: L = 180 m, W = 3,5 m, K<sub>o</sub> = 0,2 m/d y M variable entre 0,25 y 0,5 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 contrastó luego con el que se estimó mediante cálculos basados en el conocimiento hidrogeológico. Del total del flujo entrante por el borde norte (14.500 m<sup>3</sup>/d), donde el acuífero libre tiene un espesor bien definido por el basamento hidrogeológico paleozoico subyacente, una parte alimenta a los niveles acuíferos más profundos, situados, fundamentalmente en la Fm. Ombuca y otra a la capa freática. En el límite sur del área de estudio, el basamento geológico precámbrico-paleozoico se encuentra a unos 450 m de profundidad, lo cual pone de manifiesto la existencia de niveles acuíferos profundos. Bonorino (1988) y Carrica (1998) calcularon para el sector pedemontano de las Sierras Australes, que alrededor del 35 % del caudal ingresante pasaría a formar parte del escurrimiento subterráneo profundo. En base a lo anterior, se asumió un caudal entrante al acuífero freático de 9.425 m<sup>3</sup>/d. Este caudal subterráneo se distribuyó de manera uniforme y proporcional a lo largo de las 66 celdas activas que abarcan todo el borde norte del área modelada (Q = 142,8 m<sup>3</sup>/d por celda).

El modelo en régimen de flujo estacionario resultado de la calibración, se aprecia en la Figura 5. El mapa piezométrico simulado reproduce la configuración regional de la superficie freática y las direcciones de flujo predominantes en el acuífero. Además, muestra la relación hidráulica entre el Ao. y el acuífero observándose un comportamiento efluente del curso hasta la localidad de Cabildo, consistente con las evidencias de campo.

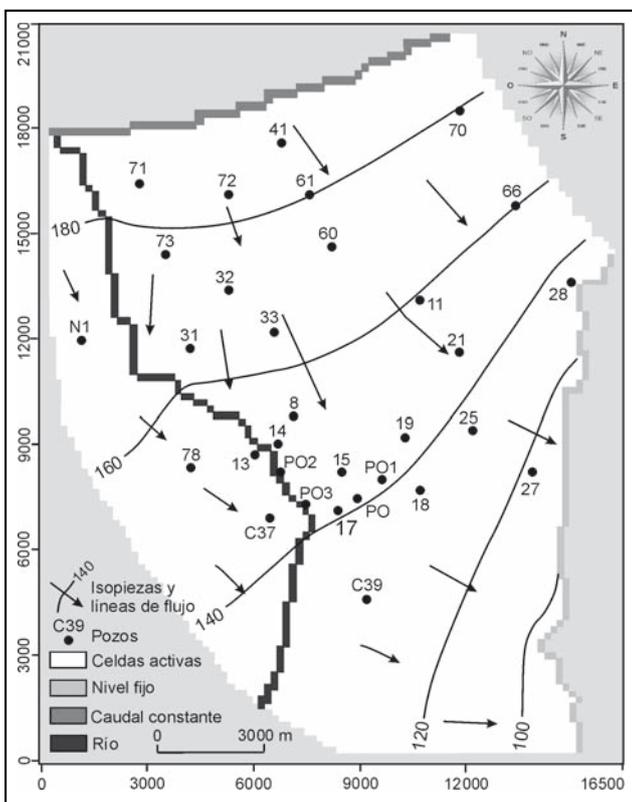


Figura 5. Mapa de isopiezas simulado. Equidistancia 20 m.

El ajuste obtenido se evaluó comparando los niveles medidos y observados en 31 pozos de la red de registro de niveles en julio del 2000 (Tabla 1 y Figura 6). El mismo indica un coeficiente de correlación (r) entre valores simulados y medidos de r = 0,99 con un error cuadrático medio normalizado del 6 %. El error medio absoluto es de 3 m (valor que está en el orden de las fluctuaciones plurianuales de los niveles freáticos del área) aunque se obtuvieron diferencias significativas en algunos sectores de la cuenca que podrían adjudicarse fundamentalmente a variaciones locales en la litología del material.

En la Figura 7 puede verse un balance de ingresos y egresos de agua de agua al modelo que totaliza unos 64.093 m<sup>3</sup>/d. Las entradas de agua al sistema acuífero corresponden a la recarga por agua de lluvia (83%), flujo subterráneo que ingresa por el norte del área de estudio (15 %) e influencia del Ao. (2%). Las salidas de agua del acuífero se reparten entre flujo a través del nivel fijo o sea flujo subterráneo saliente por el río Sauce Grande (39.446 m<sup>3</sup>/d) y la descarga al Ao. Napostá Chico (24.677 m<sup>3</sup>/d). Este último valor significa un aporte del acuífero al curso de unos 0,285 m<sup>3</sup>/s consistente con la información hidrométrica de campo.

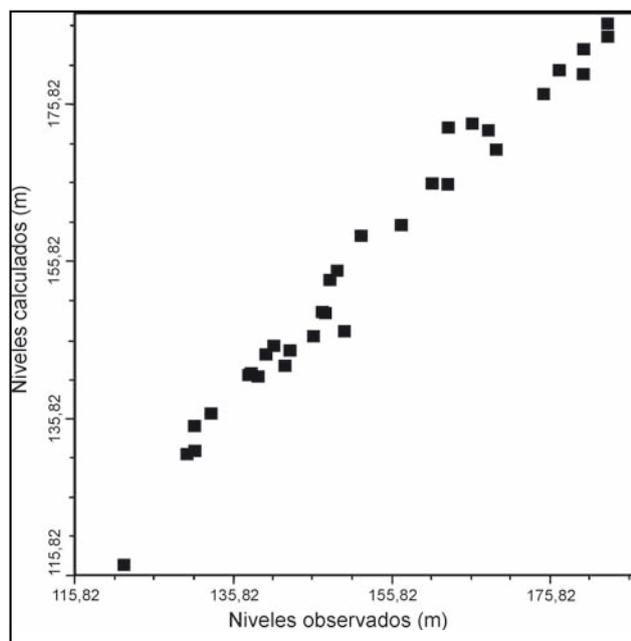


Figura 6. Niveles simulados versus observados.

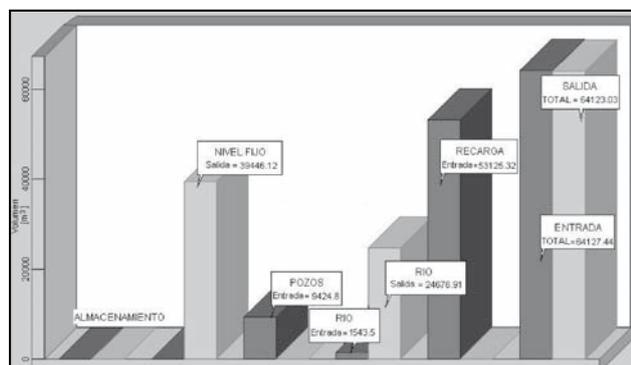


Figura 7. Balance de masas de ingresos y egresos de agua al modelo.

Tabla 1. Niveles estáticos medidos y simulados.

Pozo	Coordenada X en el modelo (m)	Coordenada Y en el modelo (m)	Nivel Observado Obs. (m)	Nivel Calculado Calc. (m)
11	10,700	13,100	152,00	159,13
13	6,032	8,703	147,50	149,27
14	6,700	9,000	147,00	149,40
15	8,500	8,200	141,00	145,00
17	8,400	7,100	139,00	141,08
18	10,700	7,700	133,00	136,50
19	10,300	9,200	140,00	143,87
21	11,800	11,600	150,00	146,86
25	12,200	9,400	131,00	134,89
27	13,900	8,200	122,00	117,19
28	15,000	13,600	130,00	131,36
31	4,200	11,700	163,00	165,63
32	5,300	13,400	168,00	172,54
33	6,600	12,200	161,00	165,70
41	6,800	17,600	183,00	186,03
60	8,200	14,600	166,00	173,17
61	7,600	16,100	177,00	180,03
66	13,400	15,800	157,00	160,44
70	11,800	18,500	180,00	179,63
71	2,800	16,400	183,00	184,39
72	5,300	16,100	180,00	182,79
73	3,500	14,400	175,00	177,17
78	4,230	8,356	149,00	154,61
08	7,100	9,800	148,00	153,41
C37	6,435	6,885	143,00	144,48
C39	9,200	4,600	131,00	131,73
N1	1,176	11,936	169,00	170,01
PO	8,927	7,470	137,80	141,45
PO2	6,750	8,193	146,10	146,27
PO3	7,473	7,295	142,45	142,55
PO4	9,646	8,011	138,10	141,56

#### Simulación de bombeos en estado transitorio

La modelación del flujo estacionario se empleó como condición inicial para realizar una simulación transitoria de bombeos, a efectos de analizar el impacto hidrodinámico que tendrían las extracciones de agua subterránea sobre la hidrodinámica del acuífero y sustentar la posibilidad de llevar a cabo una explotación como las supuestas. Los resultados teóricos que se obtienen se corresponden con los valores de transmisividad del ajuste del modelo estacionario y con un coeficiente de almacenamiento medio de 0,1 calculado en base a los ensayos de bombeo a caudal constante realizados en pozos próximos a la localidad de Cabildo (Albouy *et al.* 2005). Durante la ejecución de las

pruebas a caudales constante y variable se midieron los niveles dinámicos en los pozos de bombeo a pared desnuda que sirven para testear los descensos teóricos que arroja la simulación en estado transitorio.

Un primer escenario de bombeo se planteó considerando una extracción de agua subterránea por medio de una batería de 15 pozos que bombean 100 m<sup>3</sup>/h cada uno, durante los 365 días del año, lo que equivaldría a una extracción que en términos de consumo representa unos 0,41 m<sup>3</sup>/s. La distancia entre pozos se estimó en 250 metros teniendo en cuenta la superposición teórica entre conos de bombeo en base a parámetros calculados por Albouy *et al.* (2005) y a criterios

económicos (longitud de acueductos de interconexión). La ubicación de la batería se estableció en base a criterios geofísicos e hidroquímicos y de conformidad con ABSA sobre calles vecinales, con 12 pozos en sentido noreste y una batería de 6 pozos con rumbo noroeste.

La Figura 8 muestra el nuevo esquema hidrodinámico que se establecería en el acuífero luego de los 365 días de bombeo y que en líneas generales, no difiere del de la simulación estacionaria.

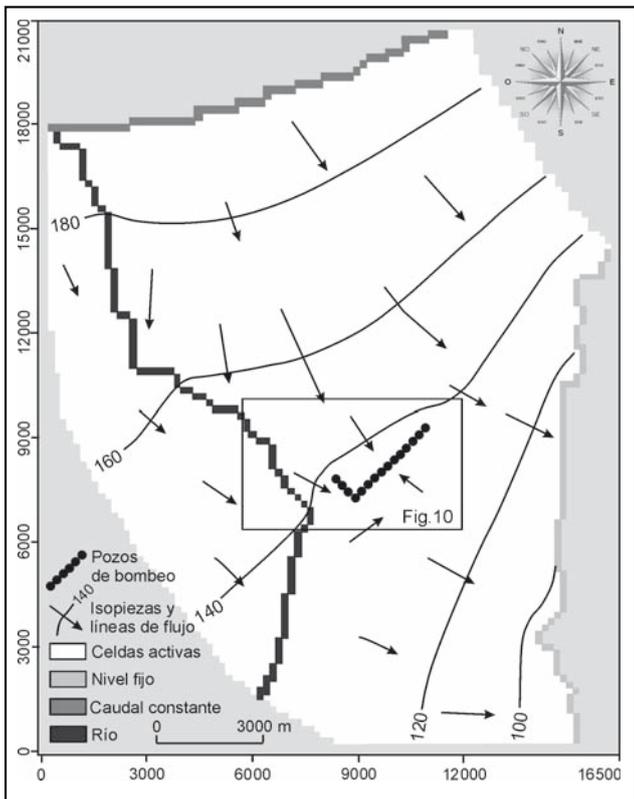


Figura 8. Simulación I. Equidistancia 20 m.

El balance de masas (Figura 9) indica que en esta simulación transitoria de régimen influenciado por bombeo se tomarían del almacenamiento del acuífero unos 33342 m<sup>3</sup>/d. La descarga de agua del acuífero al curso pasa de 24677 m<sup>3</sup>/d (estacionario, sin bombeo) a 23163 m<sup>3</sup>/d por lo que se produciría una merma de unos 1514 m<sup>3</sup>/d (0,018 m<sup>3</sup>/s). Asimismo se induciría una captación adicional desde el arroyo (por influencia) de unos 0,01 m<sup>3</sup>/s por lo que se produciría una merma del orden del 6% en su caudal básico (0,5 m<sup>3</sup>/s) a la altura de Cabildo.

El máximo abatimiento se produciría a unos 500 m de la intersección de las dos líneas de pozos y sobre la más extensa y sería del orden de 18 m no superando el 20% del espesor saturado del acuífero (Figura 10).

El bombeo no debería afectar los niveles de agua sobre la margen derecha del Ao. (donde está la localidad de Cabildo) tal como lo indican los vectores del flujo en el acuífero y por lo tanto sobre esa margen la influencia del campo de bombeo debería ser nula ya que el Ao. Napostá Chico se comporta como un límite o barrera positiva. El cono de descensos generado afectaría el nivel de agua subterránea en las captaciones próximas a las líneas de pozos de bombeo y en general hasta una distancia de 1000 m podrían aparecer efectos de la extracción.

En el supuesto que el bombeo continuara hasta alcanzar un régimen estacionario, el balance de masas (Figura 11) indica que se tomarían del arroyo unos 0,127 m<sup>3</sup>/s y se verificaría una baja en la descarga subterránea de agua al curso que produciría una merma del orden del 50% en su caudal básico. Asimismo se interceptaría o captaría parte del escurrimiento del acuífero hacia el río Sauce Grande. Estos resultados demostrarían que este escenario de bombeo podría mantenerse teóricamente en el tiempo con la consecuente merma de los caudales de estiaje.

Otro escenario hipotético planteado, supone una explotación constante a lo largo de 365 días de 0,83 m<sup>3</sup>/s por medio de una batería de 30 pozos, separados entre sí 250 m, con

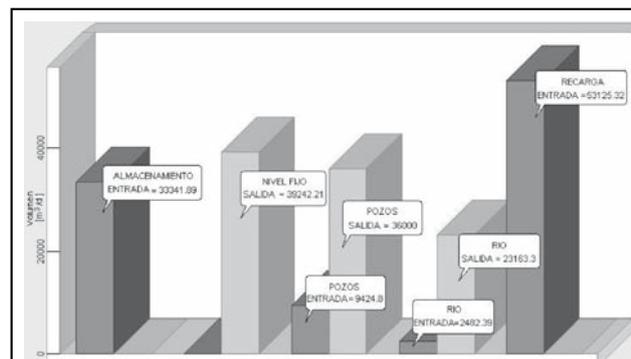


Figura 9. Simulación I. Balance de masas.

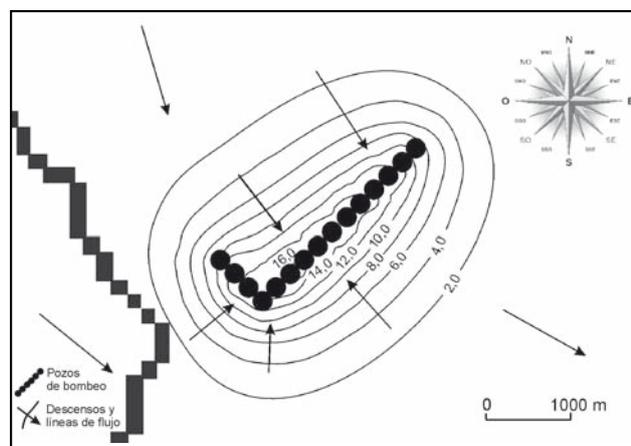


Figura 10. Escenario de bombeo I: Cono de descensos simulado. Equidistancia 2 m.

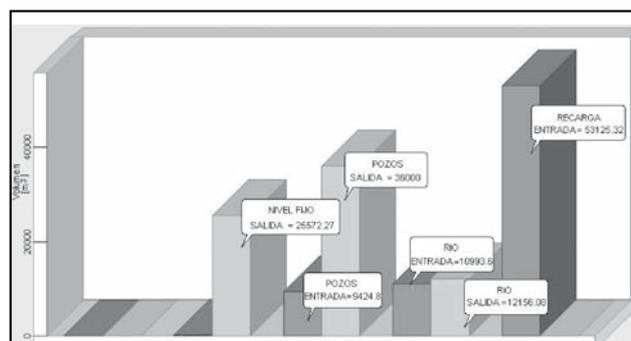


Figura 11. Simulación I. Balance de masas en régimen estacionario.

un caudal de extracción de 100 m<sup>3</sup>/h. La batería está compuesta por la anterior adicionando tres pozos a la línea noroeste y una línea con otros doce pozos en una calle vecinal perpendicular a la anterior y con orientación noreste.

La Figura 12 muestra la configuración que adquiriría la superficie piezométrica luego de un año de bombeo y en la cual se aprecia que se mantiene el esquema hidrodinámico general de flujo subterráneo.

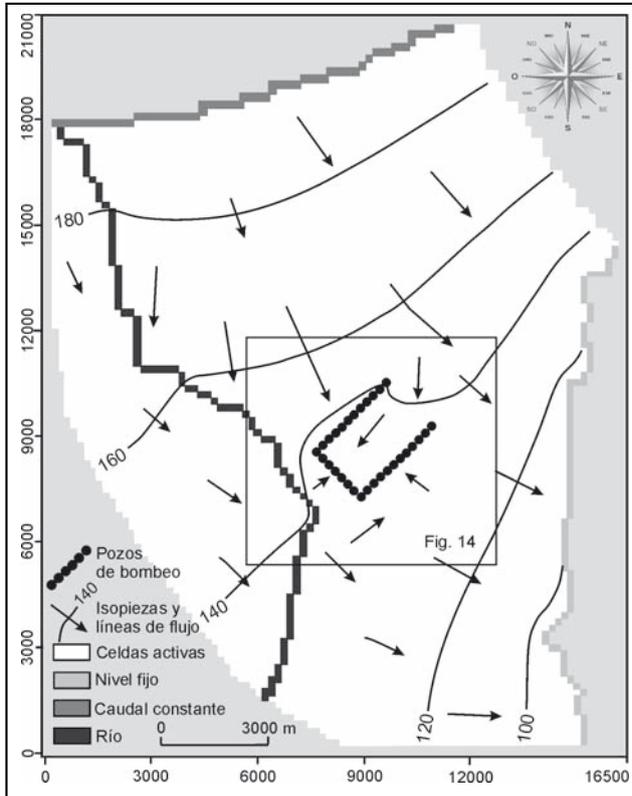


Figura 12. Simulación II. Equidistancia 20 m.

El balance de masas (Figura 13) indica que en esta otra situación hipotética se tomarían del almacenamiento del acuífero unos 64794 m<sup>3</sup>/d. La descarga de agua del acuífero al curso pasaría de 24677 m<sup>3</sup>/d (estacionario, sin bombeo) a 20917 m<sup>3</sup>/d por lo que se produciría una merma de unos 3760 m<sup>3</sup>/d (0,043 m<sup>3</sup>/s). Asimismo se induciría una captación adicional desde el arroyo (por influencia) de unos 0,037 m<sup>3</sup>/s por lo que se produciría una merma del orden del 20% en su caudal básico.

Los máximos abatimientos del nivel freático se producirían en el sector interno a la intersección de la línea de pozos y estarían en orden a los 18-19 m (Figura 14). El radio de influencia de la batería de pozos evoluciona con el tiempo de bombeo, y luego de un año de explotación, los resultados de la modelación indican que, podrían verificarse descensos medios de hasta 5 m en el nivel de agua, en los pozos ubicados hasta 1000 m de la batería de explotación. El cono de descensos no debería afectar el nivel de agua en los pozos que abastecen a la localidad de Cabildo, situada sobre la otra margen del Ao. Napostá Chico y el impacto de la explotación debiera ser poco significativo sobre esta margen.

Si bien los resultados demuestran la factibilidad de llevar a cabo una explotación anual transitoria como la supuesta anteriormente, se trata de un escenario de bombeo excepcional y teórico ya que una extracción de este tipo se instrumentaría, en

la práctica, solo en forma acotada en el tiempo y en función de las necesidades de consumo. Así podría pensarse en una explotación estacional sustentable del acuífero, en los meses de demanda pico del verano.

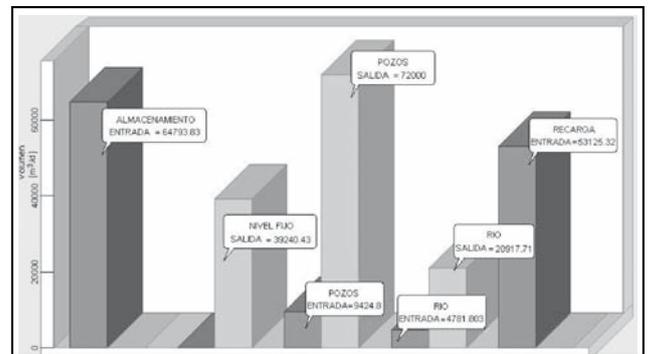


Figura 13. Simulación II. Balance de masas.

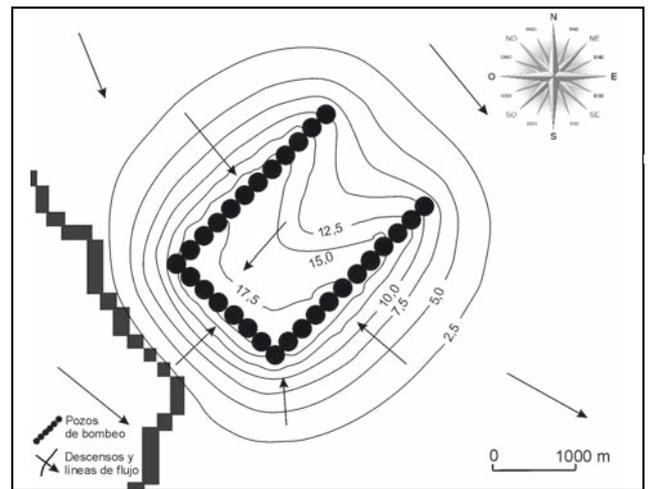


Figura 14. Escenario de bombeo II: Cono de descensos simulado. Equidistancia 2,5 m.

## CONCLUSIONES

La información hidrogeológica disponible permitió formular un modelo conceptual confiable respecto al funcionamiento del sistema acuífero estudiado. Asimismo, los estudios de campo previos, en particular sobre los parámetros hidráulicos del acuífero y la recarga, permiten otorgar robustez al modelo numérico construido.

El análisis del impacto hidrodinámico que ejercerían los campos de bombeo simulados sobre el sistema, demuestran la factibilidad de extracción de agua subterránea, para suplementar el abastecimiento a la ciudad de Bahía Blanca, Punta Alta y alrededores aún considerando sólo una pequeña parte del extenso acuífero freático del pie de monte de las Sierras Australes. Una adecuada gestión de los recursos hídricos debería tener en cuenta el aprovechamiento conjunto o coordinado de las aguas superficiales y subterráneas lo que permitiría proporcionar el recurso hídrico de manera racional y sustentable, en función de las necesidades de la demanda ya que los acuíferos o embalses subterráneos permiten complementar a los superficiales en épocas de sequía. En este sentido, una explotación racional del acuífero constituye una alternativa técnica y económicamente viable para paliar la crítica situación hídrica en la región.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALBOUY, R., J. CARRICA, Y G. BONORINO, 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), Río Cuarto, 259-268.*
- ALBOUY, R., J. CARRICA Y D. LAFONT, 2010.  
Crisis hídrica de la ciudad de Bahía Blanca: sustentabilidad de la explotación del recurso hídrico subterráneo para abastecimiento humano.  
*I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. En: Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras, Tomo II: 449-456. Azul, Buenos Aires, Argentina. Varni, Entraigas, Vives Editores.*
- BONORINO, G., 1988.  
Geohidrología del sistema hidrotermal profundo de la región de Bahía Blanca.  
*Tesis doctoral. Biblioteca Central UNS. 289 p. Inédita.*
- CARRICA, J., 1998.  
Hidrogeología de la cuenca del Ao. Napostá Grande, provincia de Buenos Aires.  
*Tesis doctoral. Biblioteca Central UNS. 215 p. Inédita.*
- CARRICA, J., 2009.  
Cálculo de la recarga en zonas áridas y semiáridas. Recarga de acuíferos. Aspectos generales y particulares en regiones áridas.  
*VI Congreso Argentino de Hidrogeología, Santa Rosa, 71-80.*
- FIDALGO, F., F. DE FRANCESCO Y R. PASCUAL, 1975.  
Geología superficial de la llanura bonaerense.  
*VI Congreso Geológico Argentino, Relatorio, Bahía Blanca, 103-138.*
- FUNDACIÓN UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR, FUNS, 2000.  
Estudio hidrogeológico de la cuenca del Ao. Napostá Chico. Estapas 1, 2 y 3.  
*Inéditos.*
- FUNDACIÓN UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR, FUNS, 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. 64 pp y anexos (Inédito).*
- GONZÁLEZ URIARTE, M. 1984.  
Características geomorfológicas de la porción continental que rodea la Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires.  
*IX Congreso Geológico Argentino, S. C. Bariloche, (3): 556-576.*
- GONZÁLEZ, N. 2005.  
Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos Aires.  
*En Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires. XVI Congreso Geológico Argentino, Relatorio, La Plata, (22): 359-374.*
- LLAMBÍAS, E. Y C. PROZZI, 1975.  
Ventania.  
*VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología de la provincia de Buenos Aires, Bahía Blanca, 79-103.*
- MCDONALD, G. Y A. HARBAUGH, 1988.  
A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.  
*US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, chapter A1.*
- MINISTERIO OBRAS PÚBLICAS PROVINCIA DE BUENOS AIRES (MOP), 1990.  
Plan Integral de Abastecimiento de Agua a Bahía Blanca, Gran Bahía Blanca y Punta Alta.  
*Prefactibilidad Técnica y Económica. Convenio MOP-CIC-UNS. Inédito.*