

Evaluación del impacto de nuevas perforaciones en el Sistema Acuífero Guaraní sobre el conjunto de pozos operando en las ciudades de Concordia y Salto

Impact evaluation of new drillings in the Guaraní Aquifer System on the set of operating wells in the cities of Concordia and Salto

RECIBIDO: 4/4/2019 → APROBADO: 27/5/2019 ✉ rbanega@unorte.edu.uy

✎ BANEGA, PABLO RAFAEL (1); GAMAZO, PABLO (1); RAMOS, JULIÁN ANDRÉS (1); ERASUN, VANESSA (1); SAPRIZA, GONZALO (1); BESSONE, LUCAS (1).

(1) DEPARTAMENTO DEL AGUA, CENTRO UNIVERSITARIO REGIONAL LITORAL NORTE SEDE SALTO, UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA, SALTO, URUGUAY.

RESUMEN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG), cuya extensión comprende parte de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay, es uno de los reservorios de agua dulce más grandes del mundo. En las inmediaciones de las ciudades de Concordia y Salto el acuífero se encuentra confinado por aproximadamente un kilómetro de basaltos y es explotado para uso recreacional. En este contexto se generó un modelo de agua subterránea para esa zona, que comprende una totalidad de 15 perforaciones, con base en estudios regionales y locales previamente realizados. Asimismo, se mejoró el modelo geológico del área de estudio mediante la incorporación de información procedente de nuevas perforaciones y estudios geofísicos.

Durante el proceso de calibración se estimaron valores de nivel fijo de contorno compatibles con la piezometría regional y valores de conductividad y de coeficiente de almacenamiento específico que permitieron reproducir la historia de la variación de piezometría. Como resultado, se generó un modelo matemático capaz de reproducir el comportamiento del SAG en el área de estudio. Mediante el modelo se creó un mapa del impacto de nuevas perforaciones que podría ser utilizado por los entes reguladores de permisos de pozos de Argentina y Uruguay para evaluar el impacto de futuras explotaciones.

PALABRAS CLAVE: Modelo matemático de agua subterránea, gestión de pozos, ModelMuse, mapa de impacto.

ABSTRACT

The Guaraní Aquifer System (SAG), which includes parts of Brazil, Argentina, Paraguay, and Uruguay, is one of the largest reservoirs of fresh water in the world. Near the city of Concordia and Salto, the aquifer is confined by proximally a kilometer of basalts and is exploited for recreational use. In this context, a groundwater water model was created for this area, which comprises 15 wells, based on previous regional and local studies. Also, the geological model was updated by considering new drilling information and geophysical studies.

During the calibration process, fixed contour levels, compatible with regional piezometry, conductivity and specific storage values were estimated, in a way that the history of the piezometry variation was recreated. As a result, a mathematical model capable of reproducing the SAG behavior in the study area was generated. Through the model, an impact map for new wells drilling was created which can be used by the regulatory bodies for well permits in Argentina and Uruguay to evaluate the impact of new drillings.

KEYWORDS: Groundwater mathematical model, well management, ModelMuse, impact map.

INTRODUCCIÓN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG), cuya extensión comprende parte de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay, es uno de los reservorios de agua dulce más grandes del mundo (Figura 1). En el marco del proyecto «Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní» (PSAG), desarrollado por los países abarcados por el reservorio, se generaron modelos numéricos de flujo de agua subterránea para áreas definidas como piloto, entre las cuales se encuentra la zona de Concordia (Argentina) y Salto (Uruguay) (Proyecto SAG, 2008a). Desde el año 2015 a la fecha, el Departamento del Agua del Centro Universitario Regional del Noroeste de la Universidad de la República (UdelaR) ha llevado adelante diferentes estudios que mejoran la descripción SAG en el noreste del territorio uruguayo (Ramos, et al., 2015a; Ramos, et al., 2015b; Ramos, et al., 2015c; Ramos et al., 2018). En ese mismo año, la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA) del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente de Uruguay resolvió desarrollar un nuevo modelo, con apoyo del Departamento del Agua de la UdelaR, en el que se amplió considerablemente su dominio y se incorporó nueva información (Gamazo, et al., 2016).



Figura 1. Límites del Sistema Acuífero Guaraní.

En este trabajo se presenta una actualización del modelo incorporando esta nueva información y cambiando el pre y posprocesado del modelo a ModelMuse 3.9 desarrollado por la *United States Geological Survey* (USGS por sus siglas en inglés, 2017). Dicha interface, mucho más moderna que la anterior, ofrece más facilidades para el remallado en particular y para la evaluación de diferentes escenarios de explotación. Mediante la nueva interface se realizó un estudio en el que se desarrolló un mapa de impacto para nuevas perforaciones en el Sistema Acuífero Guaraní sobre el conjunto de pozos en operación, en las ciudades de Concordia y Salto. El mapa permitirá a los entes administradores de permisos de ambos países, la DINAGUA, de Uruguay, y el Ente Regulador de los Recursos Termales de la Provincia de Entre Ríos (ERRTER), de Argentina, identificar las zonas donde la realización de nuevas perforaciones afectaría el funcionamiento de las explotaciones actuales y estimar el impacto sobre ellas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo se desarrolló mediante el software MODFLOW-2005 y la interfaz gráfica ModelMuse versión 3.9, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2017).

Área de estudio

Al igual que en los anteriores modelos del SAG desarrollados para el área estudiada (Proyecto SAG, 2008a; Gamazo, et al, 2016), las formaciones elegidas para modelar fueron únicamente Rivera y Tacuarembó (Jurásico) y Buena Vista (Triásico), debido a que la gran mayoría de los pozos extraen agua únicamente de las mismas.

Dentro del PSAG se desarrolló un modelo regional que tomó como base la piezometría del modelo conceptual de LEBAC-UNESP (Proyecto SAG, 2008b). Esta piezometría fue construida mayormente con datos de niveles medidos en el momento de la construcción de los pozos, en consecuencia, abarcan una ventana temporal de 20-30 años a partir del año 1970. Por lo tanto, en los informes del LEBAC-UNESP los técnicos aclaran que la superficie piezométrica resultante no sería representativa de niveles actuales, en particular en zonas de explotaciones significativas.

Cabe mencionar que, para el área piloto Concordia-Salto y sobre un área importante del noreste de Entre Ríos y sureste de Corrientes, la piezometría propuesta por LEBAC tiene un componente principal Este-Oeste en la dirección de flujo resultante y uno menor en dirección Sur-Norte (Figura 2, zona 5).

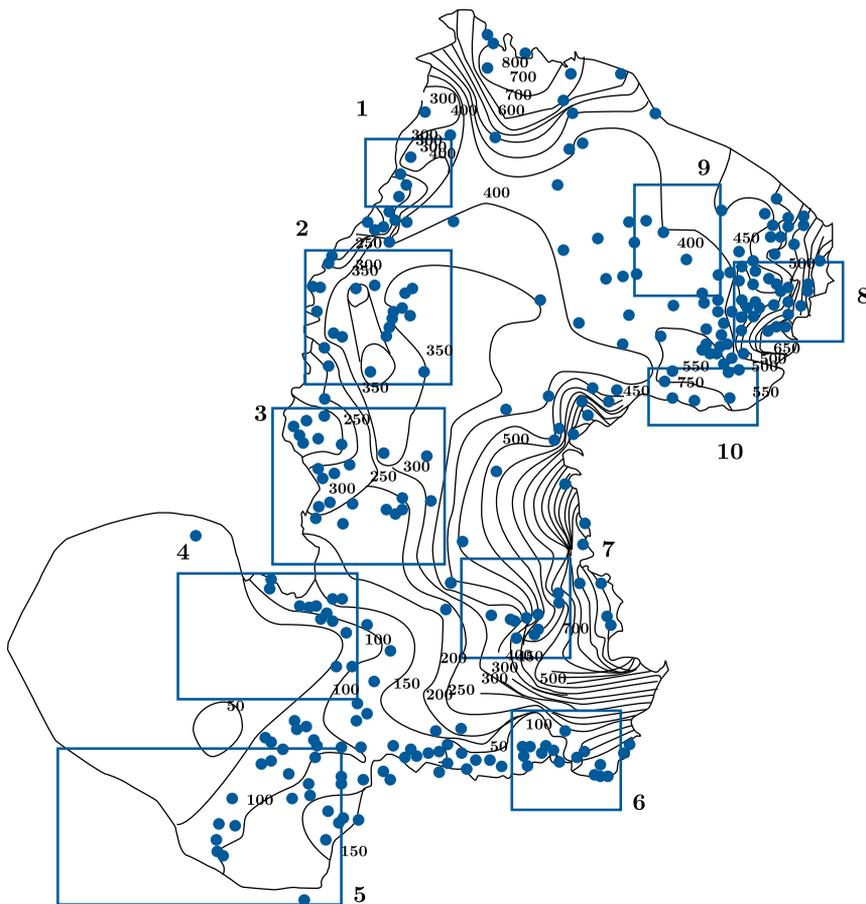


Figura 2. Ubicación de pozos de observación de niveles piezométricos y curvas piezométricas. Fuente: Proyecto SAG (2008a).

Como punto de partida para el desarrollo del modelo se distingue para el área de influencia una dirección de flujo en dirección Este-Oeste con una desviación de la dirección respecto de la horizontal 30° hacia el norte. Con base en lo anterior, se definió un dominio cuadrado de 70 km de lado con los contornos suroeste y noreste paralelos a la dirección de flujo predominante y los contornos sureste y noroeste perpendiculares a la misma dirección (Figura 3).

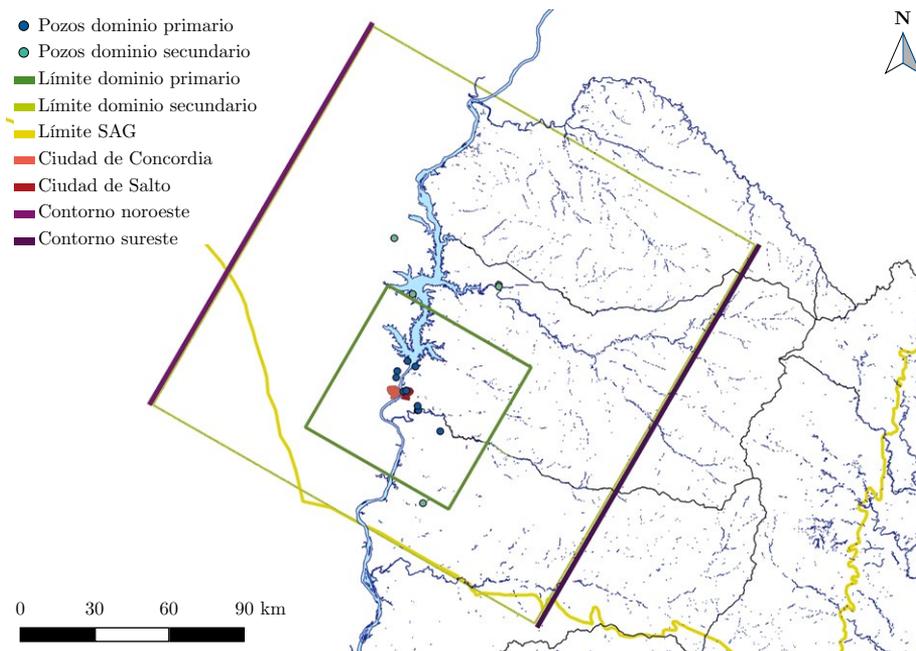


Figura 3. Dominios y perforaciones consideradas para el modelo.

Este dominio es el de mayor interés para la gestión, ya que en él se concentran 10 perforaciones infrabasálticas que extraen un caudal total de $18.912 \text{ m}^3/\text{día}$. Se le denominó dominio primario, y a los efectos de contextualizarlo en el marco de flujo regional, se extendió el dominio del modelo a un dominio secundario de 195 km^2 , donde existen otras cinco perforaciones. De esta forma, el límite suroeste del dominio coincide en gran parte con los límites del acuífero donde se considera flujo nulo. El contorno noreste, al estar alineado con la dirección de flujo regional, se consideró de flujo nulo. Los contornos sureste y noroeste se consideraron de nivel fijo. En el límite suroeste del dominio, y en menor medida en el sureste, se definieron celdas como inactivas por estar fuera del dominio del acuífero.

Tanto el valor de los niveles de contorno del modelo, como los valores de conductividad y almacenamiento específico del acuífero, se ajustaron para reproducir la variación histórica de la piezometría en el dominio primario. Para ello se consideraron los niveles estáticos reportados en el momento de la construcción de nuevas perforaciones (estos valores no han sido tomados en todos los pozos). En la Tabla 1 figuran los datos utilizados: fecha de perforación, nivel estático en ese momento y caudal de explotación. Dichos valores fueron facilitados por la DINAGUA y el

ERRTER. Los valores de cota del terreno fueron obtenidos del modelo digital del terreno ASTER V2 (fasterweb.jpl.nasa.gov).

TABLA 1. Información de los pozos utilizada. Los pozos del dominio primario se encuentran en negrita.

Perforación	Nivel de terreno [m]	Nivel estático a boca de pozo [m]	Nivel estático absoluto [m]	Fecha de puesta en marcha y medida del Ne [m]		Caudal [m ³ /d]
Daymán						2080
Arapey						4320
OSE	38	54	92	1992	mayo	0
San Nicanor	69	36,5	105,5	1992	julio	1280
Guaviyú				1992		1920
Federación				1994		6160
Quiroga	34	58	92	1995	marzo	2400
Vertiente	24	66,11	90,11	1996		4352
Chajarí				2000		4800
Remeros	10	68	78	2001	julio	960
Kanarek	16	55	71	2001	agosto	2400
Posada	21	52,82	73,82	2002		1600
Zorraquín				2006		2400
Perilago				2010		1440
Altos Arapey				2013		2400
OSE	38	22	60	2018	enero	0

Modelo geológico

A diferencia de los modelos geológicos considerados para los modelos anteriores, y gracias a la nueva información incorporada, se consideró la hipótesis de que la porción del paquete sedimentario correspondiente al Jurásico y Triásico varía linealmente (en espesor) entre el este y el oeste del dominio, tomando 43% en la frontera de Brasil con Uruguay y 0% a 120 km al oeste de la frontera entre Argentina y Uruguay. Para la diferenciación de los espesores se consideró que el Jurásico y el Triásico toman un 53% y un 47% de la porción, respectivamente (Figura 4). Estas estimaciones no pretenden ser una descripción geológica del sistema, sino una aproximación con el fin de reproducir su comportamiento hidrogeológico.

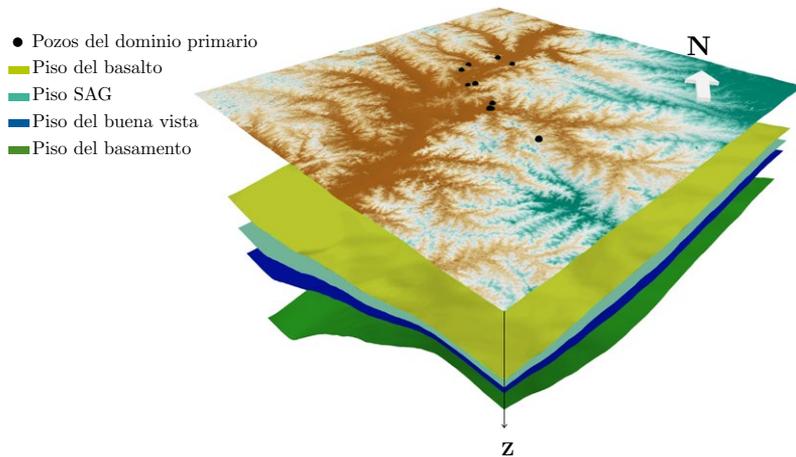


Figura 4. Modelo 3D de la geología utilizada en el dominio primario: estratos del Jurásico, entre verde claro y celeste; estratos de Triásico, entre celeste y azul; basamento, verde oscuro.

Discretización del modelo

Se definió una discretización gruesa para el dominio secundario (con tamaños de celda de 5.100 m de lado), una discretización media para el dominio primario (celdas de 240 m) refinando en las celdas con pozos (a un tamaño de 1 m). A diferencia del modelo anterior, el refinamiento de malla se realizó de forma automática definiendo como diferencia máxima en el tamaño de celdas un factor de 1,5 (Figura 5), permitiendo generar transiciones suaves entre las zonas con diferente densidad de mallado, lo cual mejora la precisión de los resultados.

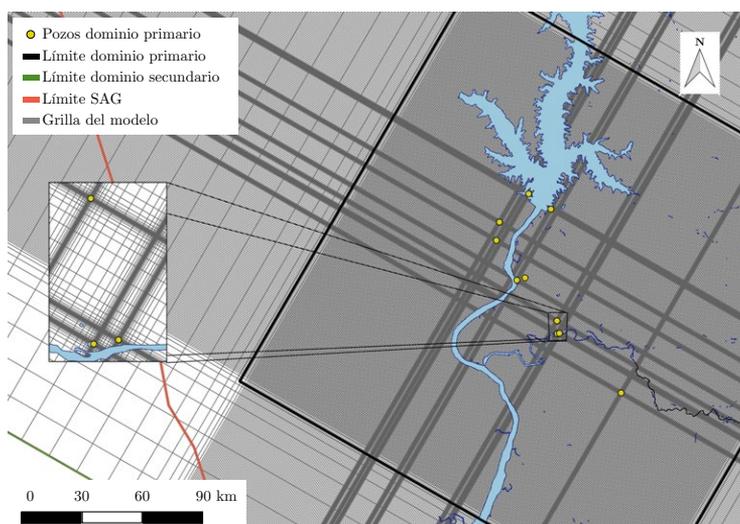


Figura 5. Malla utilizada en el modelo, con acercamiento a la zona de pozos.

Parámetros y calibración

El proceso de calibración tiene como principal objetivo la estimación de los parámetros efectivos del modelo, aquellos que no pueden medirse de forma directa o de los cuales no se tienen datos. Los parámetros del modelo, estimados en régimen transitorio, fueron la conductividad hidráulica del acuífero, el coeficiente de almacenamiento específico, y los niveles piezométricos de los contornos sureste y noroeste. Se consideró el mismo valor de conductividad hidráulica horizontal para cada capa del modelo (Jurásico y Triásico) y un valor de conductividad vertical igual al 10% del de la dirección horizontal, de acuerdo a las recomendaciones bibliográficas existentes (Todd, 1980).

Evaluación de nuevas perforaciones

Sobre el modelo calibrado, se realizó un estudio para evaluar el impacto de nuevas perforaciones sobre el conjunto de pozos operando en el dominio primario, que cubre las ciudades de Concordia y Salto. La metodología aplicada consistió en ubicar nuevas perforaciones a lo largo del dominio con un caudal de 2.101 m³/d (igual al valor medio de explotación del sistema), y evaluar el impacto en los pozos más cercanos.

Para el mapa se definieron tres zonas con distintos niveles de afectación: baja, media y alta. Se consideró como una afectación baja la que produce un descenso entre 3 y 4 m en el pozo más próximo, media cuando la afectación está entre 4 y 6 m, y alta cuando es mayor a 6 m. Los límites de las zonas se trazaron mediante la interpolación.

RESULTADOS

Durante el proceso de calibración se obtuvieron valores de nivel fijo de contorno compatibles con la piezometría regional propuesta (Proyecto SAG, 2008b) y valores de conductividad y de coeficiente de almacenamiento razonables (del orden de los obtenidos en ensayos de bombeo; Gamazo, et al., 2016), logrando reproducir la historia de la variación de piezometría. El valor de conductividad hidráulica horizontal obtenido fue 0,57 m/día, el coeficiente de almacenamiento específico fue 8,84E-8 m⁻¹ y los valores de nivel en los contornos sureste y noroeste fueron 135,6 m y 70,89 m, respectivamente. En la Figura 6 puede apreciarse la piezometría generada por el modelo para el año 2019.

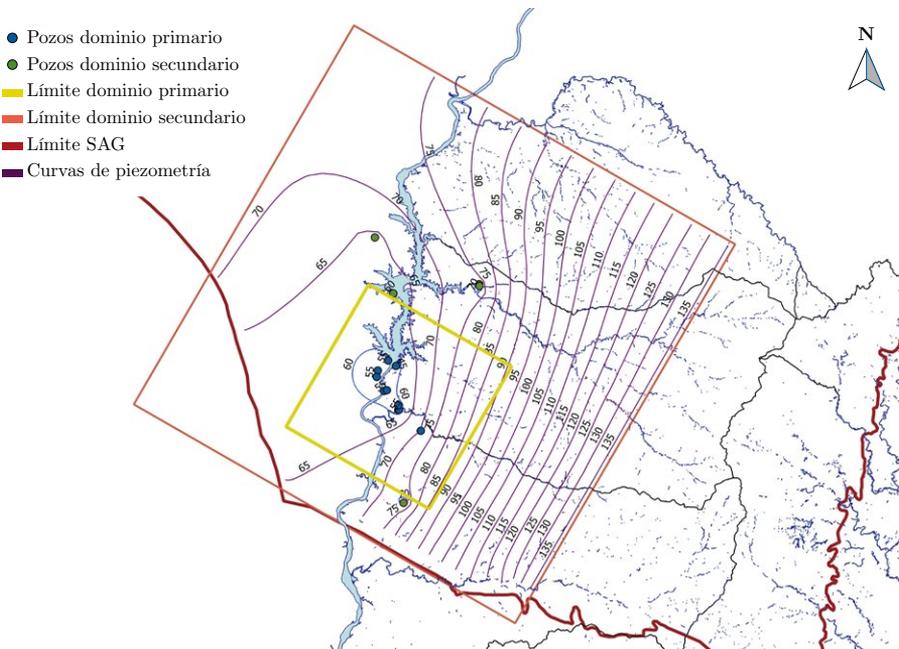


Figura 6. Piezometría resultante del modelo para el año 2019.

Como puede apreciarse en la Figura 7, el ajuste obtenido en el proceso de calibración presentó un valor de coeficiente de correlación R^2 de 0,98, ligeramente superior al obtenido en el modelo del 2015 (Gamazo, et al., 2016). El error en la predicción de los niveles es del orden del error de la cota del modelo digital del terreno, con lo cual el ajuste es aceptable.

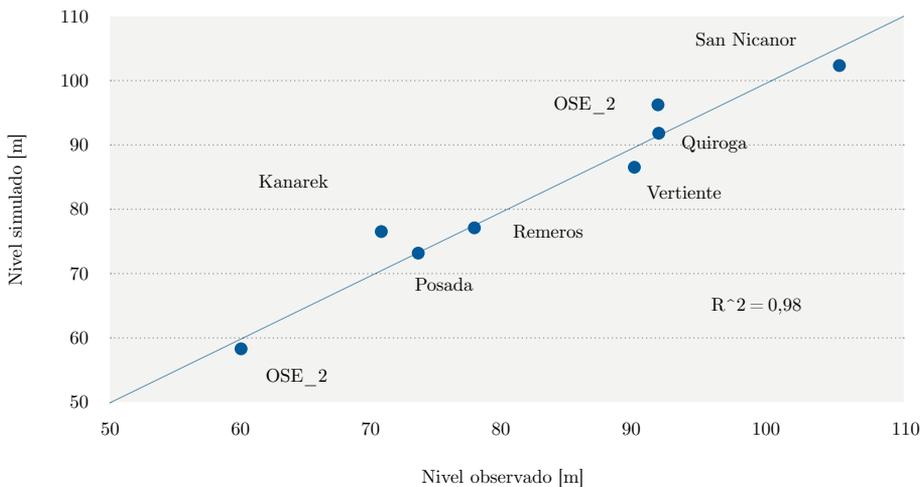


Figura 7. Ajuste del modelo.

Durante el proceso de calibración también se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros sobre cada pozo de observación, es decir, cuando afecta cada parámetro a la simulación de las observaciones en cada pozo. En la Tabla

2 se puede observar cómo los parámetros más influyentes son las condiciones de contorno, en especial la sureste. Por otro lado, el coeficiente de almacenamiento específico es el de menos sensibilidad, probablemente debido a que las observaciones se encuentran a una gran distancia temporal entre ellas y a los momentos en que se comenzaron a explotar las perforaciones, registrando una serie de estados cuasiestacionarios.

TABLA 2. Sensibilidad de los parámetros en los puntos de observación. En la tabla se reporta la derivada del valor simulado de la observación respecto a los parámetros, normalizada por el valor del parámetro (Poeter, et al., 2005).

Pozos de observación	Conductividad hidráulica horizontal	Coefficiente de almacenamiento específico	Nivel fijo noroeste	Nivel fijo sureste
Remeros	21,282	3,468	34,492	67,417
Kanarek	23,957	3,534	31,891	72,887
Posada	26,655	4,221	32,269	72,087
Quiroga	7,146	2,381	35,037	66,100
Vertiente	9,979	3,582	36,207	63,716
San Nicanor	5,698	0,179	28,019	80,543
OSE_1	6,162	0,000	34,165	67,571
OSE_2	43,101	0,892	34,298	67,813

En cuanto a la evaluación del impacto de nuevas perforaciones, se realizó un mapa donde se visualizan las zonas de afectación a los pozos actuales (Figura 8). Allí puede apreciarse que la zona de afectación media (descensos entre 4 y 6 m) conforma un área casi continua que encierra a todas las perforaciones del área de estudio. También puede visualizarse que en la zona de termas del Daymán (ubicada en el centro del mapa) la presencia de tres perforaciones muy próximas produce una zona de afectación alta que es común a los tres pozos. En el resto de las perforaciones las zonas de afectación alta asociadas a cada pozo no se superponen. Asimismo, en el mapa puede apreciarse que las distancias hacia los contornos de las distintas zonas son mayores en los pozos ubicados al suroeste que al noreste. Esto se debe principalmente a la proximidad con el límite del acuífero.

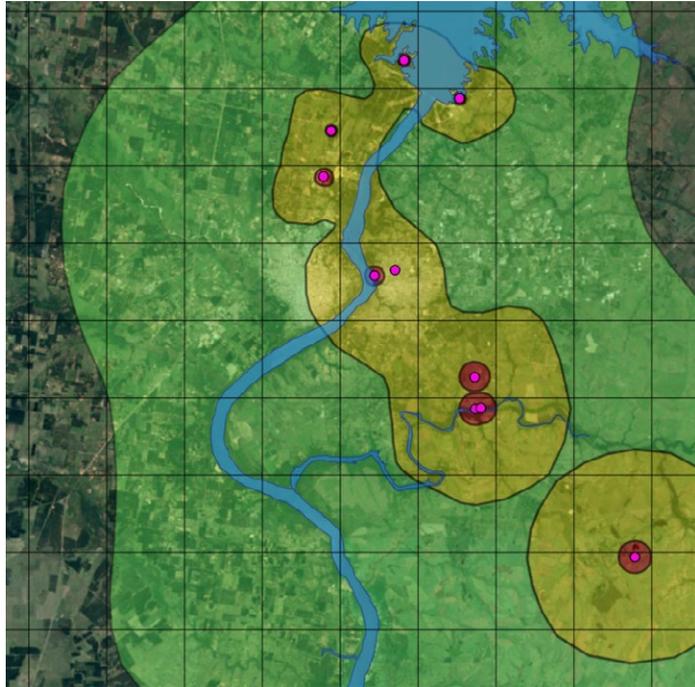


Figura 8. Mapa de afectación de nuevas perforaciones.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo matemático operativo y Disponible en: un software de libre distribución para la gestión de perforaciones infrabasálticas del SAG, que reproduce los niveles piezométricos reportados previo a la entrada en operación de nuevos pozos. En comparación con modelos anteriores, el desarrollado en este trabajo presenta un mejor ajuste a los niveles históricos y se compatibiliza de mejor manera con la piezometría regional propuesta por LEBAC y UNESP (Proyecto SAG, 2008b).

El generador de malla incluido en el preprocesador utilizado (ModelMuse) permitió crear una malla en la que las diferencias máximas en el tamaño de celdas presentan un factor de 1,5 (Figura 5). Esto permite obtener transiciones suaves entre las zonas con diferente densidad de mado, mejorando la precisión de los resultados.

El generador facilita también el remallado, lo cual es muchas veces necesario cuando se incorporan nuevos pozos al modelo. Esto, más otras facilidades a la hora de generar y visualizar resultados, hace que el modelo sea más accesible y aumenta la probabilidad de que sea utilizado por las administraciones tanto de Argentina como de Uruguay para dar soporte a las tomas de decisiones vinculadas a la gestión de las perforaciones.

El análisis de sensibilidad realizado indicó que el modelo presenta una mayor sensibilidad respecto a la condición de contorno sureste y menor afectación del coeficiente de almacenamiento específico. Esto puede deberse a que las observaciones se encuentran a una gran distancia temporal entre ellas y a los momentos en que se comenzaron a explotar las perforaciones, registrando una serie de estados cuasiestacionarios.

A partir del nuevo modelo se desarrolló un mapa de fácil lectura para evaluar el impacto de nuevas perforaciones en el SAG sobre el conjunto de pozos que operan en las ciudades de Concordia y Salto. Dicho mapa no sustituye al modelo a la hora de evaluar el impacto de nuevas perforaciones, pero brinda a los tomadores de decisión una herramienta rápida para evaluar la ubicación de nuevas perforaciones y sus efectos sobre las que ya están operando.

A pesar de que estas herramientas están disponibles, es necesario realizar más estudios sobre el sistema, en particular para mantener un monitoreo continuo de caudales y presiones en los pozos. También son necesarios estudios hidrogeológicos centrados en las formaciones subyacentes al SAG y su conexión hidráulica con él. Estos estudios permitirán ampliar y mejorar la capacidad predictiva del modelo, lo cual sin duda contribuirá a un mejor y sustentable aprovechamiento del recurso termal.

REFERENCIAS

- Gamazo, P., Ramos, J., Olivera, M., Sapriza, G., Batista, L., Lacués, X. y Manganelli, A., 2016. Modelo matemático del Acuífero Guaraní para la gestión de explotaciones termales en la zona de Concordia (Entre Ríos, Argentina) y Salto (Uruguay). En: *IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. San Fernando del Valle, Argentina (20-23 de setiembre de 2016). San Fernando del Valle: [s.n.]
- Poeter, E.P., Hill, M.C., Banta, E.R., Mehl, Steffen y Christensen, Steen, 2005. UCODE_2005 and six other computer codes for universal sensitivity analysis, calibration, and uncertainty evaluation constructed using the JUPITER API [En línea]. Washington: USGS. (Techniques and Methods, 6-A11). [Consulta: 21 de mayo de 2019]. Disponible en: <http://pubs.er.usgs.gov/usgspubs/tm/tm6A11>.
- Proyecto SAG, 2008a. *Avances en el conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní: tomo 1. Geología y geofísica (regional y áreas piloto) Volumen 1 y Tomo 5. Modelos numéricos hidrogeológicos* [En línea]. Montevideo: CeReGAS. [Consulta: 10 de abril de 2019] Disponible en: <http://www.ceregas.org/publicaciones/proteccion-ambiental-y-desarrollo-sostenible-del-sistema-acuifero-guarani-sag/>.
- Proyecto SAG, 2008b. *Avances en el conocimiento del sistema Acuífero Guaraní: Tomo 4. Climatología, hidrología e hidrogeología Volumen 4* [En línea]. Montevideo: CeReGAS. [Consulta: 10 de abril de 2019] Disponible en: <http://www.ceregas.org/publicaciones/proteccion-ambiental-y-desarrollo-sostenible-del-sistema-acuifero-guarani-sag/>.
- Ramos, J., Gamazo, P. y Saracho, A., 2015a. *Campaña de sondeos magnetotérmicos (AMT-MT) para el estudio geofísico profundo en Salto*. Informe inédito. Departamento del Agua, CenUR Litoral Norte, sede Salto.
- Ramos, J., Gamazo, P. y Saracho, A., 2015b. *Realización de sondeos audio-magnetotérmicos en la cuenca del río Cuareim y elaboración de mapa piezométrico en las ciudades de Artigas y Quaraí*. Informe inédito. Departamento

- del Agua, CenUR Litoral Norte, sede Salto.
- Ramos, J., de Souza, R., Blanco, C., Saravia, C., Betancur, O., Ferreira, Á. y de los Santos, J., 2015c. *Utilización de la energía geotérmica para calefacción de invernaderos*. Informe inédito. Departamento del Agua, CenUR Litoral Norte, sede Salto.
- Ramos, J., de Los Santos, J., Gamazo y P. Saracho, A., 2018. *Campaña sondeos magnetotéluricos Gobernador Mansilla, Entre Ríos, Argentina*. Informe inédito. Departamento del Agua, CenUR Litoral Norte, sede Salto.
- Todd, D.K., 1980. *Groundwater hydrology*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons. 535p.
- USGS, 2017. *ModelMuse: a graphical user interface for groundwater models* [En línea]. Versión 3.9. Washington: USGS. [Consulta: 10 de abril de 2019]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/software/modelmuse-a-graphical-user-interface-groundwater-models>.