

## **MODELO NUMÉRICO DE FLUJO SUBTERRÁNEO PARA UNA CUENCA ENDORRÉICA EN AMBIENTE ÁRIDO: SALAR DE PIPANACO (CATAMARCA, ARGENTINA)**

<sup>1</sup>Mira, Andrés; <sup>1,2</sup>Bea, Sergio; <sup>1</sup>Vives, Luis; <sup>3</sup>Tálamo, Esteban y <sup>3</sup>Rodríguez, Marcos N. N.

<sup>1</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff". Av. República de Italia 780 – 7300 Azul, Buenos Aires – Argentina – +54 2281 432666 – [andresmira@faa.unicen.edu.ar](mailto:andresmira@faa.unicen.edu.ar),

<sup>2</sup> CONICET, Av. Rivadavia 1917 - C1033AAJ Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

<sup>3</sup> CONHIDRO S.R.L., C/ Tomás Vergara, 1556, 4700, San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca - Argentina. Tel. +03834 454148

### **Resumen**

Se ha desarrollado un modelo regional de flujo de agua subterránea para la cuenca endorreica del Salar de Pipanaco (Catamarca, NOA Argentina). El modelo se realizó en condiciones estacionarias y transitorias para el periodo 1995-2015 bajo dos hipótesis de funcionamiento: a) con descarga del sistema por evapotranspiración, y b) adicionando al anterior una vía preferente de descarga por fracturas, consistente con el hecho de que se trata de una cuenca tectónica. En ambos casos se ha zonificado en 14 áreas de permeabilidad, 4 de vegetación con distinto poder evaporativo, y 8 de bombeo. Los resultados obtenidos muestran unas conductividades hidráulicas calibradas entre 1.7 y 55.9 m/d, coherentes con la litología y con resultados en ensayos de bombeo, con errores en las medidas de niveles inferiores a 5 m. El balance de masas muestra un sistema sobreexplotado incapaz de mantener sus reservas de aguas subterráneas. Las dos hipótesis simuladas son plausibles, siendo probable que se alternen los dos mecanismos de salida de agua del sistema.

**Palabras claves:** Modelo numérico de flujo, Salar Pipanaco, Cuenca endorreica, Catamarca.

### **Abstract**

A regional groundwater flow model has been developed for the Salar de Pipanaco (Catamarca, NE Argentina). The model was made under steady and transient states, the last one for the period 1995-2015, based on two hypotheses: a) the evapotranspiration as the main discharge mechanism in the system, and b) an additional preferential discharge through regional fault zones. In both cases, the aquifer has been divided into 14 permeability areas, 4 vegetation areas with different evaporative capacity, and 8 pumping areas. The results indicate that the calibrated hydraulic conductivities ranges from 1.7 to 55.9 m/d, and those ones are consistent with the lithology and local groundwater pumping tests. The differences between measured and calculated piezometric levels are less than 5 m. The water budget shows an overdrawn aquifer unable to retain its storage. The two previous hypothesis are likely, and probably both mechanisms occur in an alternately way.

**Keywords:** Groundwater flow model, Salar Pipanaco, Endorheic basin, Catamarca.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La cuenca endorreica del Salar de Pipanaco es de las más extensas de Sudamérica con 12200 km<sup>2</sup>, extendiéndose por las provincias de Catamarca y norte de La Rioja, Argentina (Figura 1). Contiene una llanura central donde las precipitaciones no superan los 100 mm/año, rodeada por elevados frentes montañosos que superan los 4000 m de altura. La cuenca soporta actualmente importantes proyectos olivícolas que utilizan el recurso hídrico subterráneo para el riego de las plantaciones, y con potencial a futuro de abastecer a otras actividades económicas como la minería a gran escala.

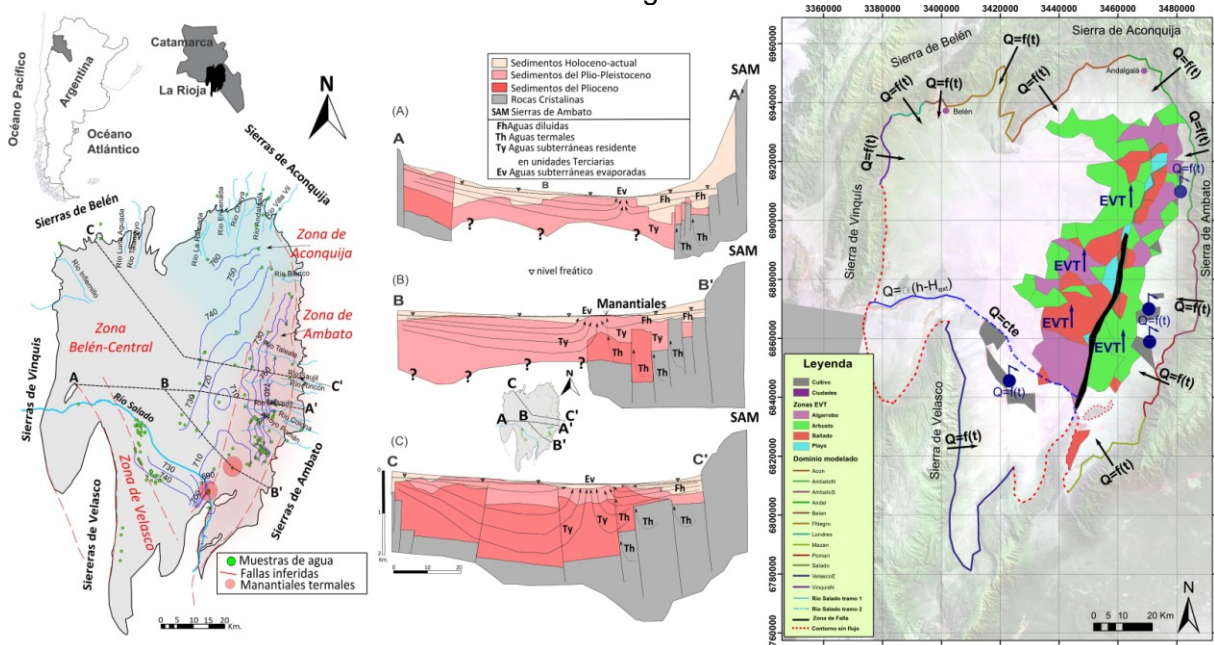


Figura 1. Izquierda: modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del Salar de Pipanaco (según CONHIDRO-IHLLA-DPhyERH, 2013 y 2015). Derecha: implementación del modelo numérico de funcionamiento del sistema hidrogeológico.

El conjunto de las actividades antrópicas, actuales y futuras, se encuentran condicionadas por la disponibilidad del agua, acentuándose la necesidad de conocer los ingresos, egresos y reservas existentes, para planificar un desarrollo armónico y sustentable de la cuenca. Hasta el momento solo existían dos modelos numéricos con limitado alcance regional (Zarantonello y Mamani, 1999 y BHP, 1999). El presente modelo supone un importante avance sobre los modelos previamente propuestos tanto por la extensión espacial y alcance del modelo numérico, como por el volumen de información utilizada para su implementación, y el tipo de calibración a la que ha sido sometido.

## METODOLOGIA

La metodología empleada para el análisis del sistema acuífero en el Salar de Pipanaco se basó en definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico e implementar un modelo numérico (Figura 1, derecha). La primera simulación del modelo se realizó en condiciones estacionarias considerando una situación del acuífero previa al aprovechamiento de sus recursos (sin explotación). En condiciones transitorias el modelo se evaluó para un periodo de 20 años (1995 a 2015), coincidiendo con la etapa de explotación intensiva de las aguas subterráneas en la zona sur del Salar de Pipanaco.

Para la simulación numérica del flujo del agua subterránea se empleó el código TRANSIN (Medina et al., 1996), utilizando la interfaz gráfica VISUALTRANSIN (GHS, 2003). Dicho modelo resuelve las ecuaciones de flujo y transporte utilizando el método numérico de elementos finitos. Este código contiene un poderoso algoritmo de calibración automática

para todos los parámetros basado en el método de máxima verosimilitud (Carrera y Neuman, 1986; Medina y Carrera, 1996).

## **MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO**

El acuífero está formado por materiales detríticos Plio-cuaternarios con espesores variables, incrementando sus potencias hacia las zonas de piedemonte. La recarga se produce preferentemente a través de los sectores laterales coincidente con los frentes montañosos, y la principal salida del agua del sistema sería por evapotranspiración en la zona de playa del salar y vegetación principalmente freatófita aledaña. En la zona de estudio existen grandes fracturas regionales que pueden suponer zonas de circulación preferente de agua, e incluso suponer una vía de egreso del agua del sistema.

La cuenca es atravesada de oeste a este por el río Salado, que al llegar a la localidad de Aimogasta pierde su caudal infiltrándose completamente, volviendo a manifestarse en superficie en las proximidades de Santa Teresita.

Los análisis químicos e isotópicos sugieren que la composición química del agua en el acuífero tendría cuatro orígenes: agua de recarga por los frentes montañosos, agua del río Salado, agua salina antigua, y agua termal de circulación rápida y profunda (CONHIDRO S.R.L.-IHLLA-DPhyERH, 2013 y 2015).

La influencia de los sistemas de fallas presentes en el Salar de Pipanaco sobre el flujo subterráneo es incierta. De ahí que se evalúan dos modelos conceptuales por la incertidumbre existente al definir la descarga de este sistema hidrogeológico. Una hipótesis establece que el sistema funciona como una cuenca endorreica, y todas las salidas se producen por evapotranspiración, habiendo sido denominado Modelo Cuenca Endorréica o MCE. Por otro lado, otra hipótesis plantea que una parte de los egresos de agua subterránea ocurriría a través de las fallas regionales; es el denominado Modelo Cuenca Endorreica y Fallas ó MCEF.

En la Figura 1 (izquierda) se muestran tres perfiles geológicos que reflejan parte de la geometría del Salar de Pipanaco así como un esquema de circulación de las aguas subterráneas.

## **IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO**

El área modelada consta de una malla bidimensional de 4838 elementos triangulares y 2556 nodos, con una media de superficie por elemento de 2.5 km<sup>2</sup>. No obstante la malla presenta un mayor refinamiento en aquellos sectores como el oriental en donde se disponía de mayor volumen de información, mientras que en la zona occidental el tamaño de los elementos es mayor. El acuífero fue simulado con una capa continua de material detrítico sin interacción con capas adyacentes, lo que simplifica la simulación en un flujo esencialmente bidimensional. El espesor de la capa modelada fue calculado por interpolación lineal a partir de los datos de 230 puntos procedentes de perforaciones y de ensayos geofísicos (CONHIDRO-IHLLA-DPhyERH, 2013).

El dominio modelado fue dividido en 14 zonas de conductividad hidráulica en función de la litología, piezometría o cambios en el gradiente hidráulico. La zona asociada a la falla regional se simuló como una zona de alta transmisividad en dirección vertical y orientación N-S, mientras que es mínima en dirección E-W. Su trazado coincide con el eje de la cuenca endorreica.

Como puede observarse en la Figura 1 (derecha), la recarga fue simulada como un caudal de entrada por 11 diferentes frentes montañosos, siendo ese caudal proporcional a la precipitación media anual calculada por el método de las isoyetas.

Las salidas por evapotranspiración se definieron de acuerdo a áreas con distinta vegetación. Se distinguieron cuatro zonas principales en función de su capacidad evaporativa: arbustos, algarrobos, bañados y playa. Se les asignó una mayor tasa de evaporación a aquellas situadas la mitad norte de la cuenca. Los caudales de salida por

evapotranspiración se simuló considerándolo proporcionales (factor  $\alpha$ , goteo) a la diferencia del nivel piezométrico respecto a otro externo de referencia, en este caso la cota del terreno extraída del MDT (STRM 90). De esta forma si la cota del nivel piezométrico calculado está por encima del terreno el agua es eliminada del sistema, debiendo verificarse que el nivel piezométrico nunca se sitúe por debajo del nivel externo.

La interacción del río Salado con el sistema acuífero se simuló considerando dos tramos con el objeto de capturar su carácter influente o efluente. Al ingresar al sistema, el río descarga hacia el acuífero donde el nivel piezométrico no es inferior a la cota del lecho del río (es decir, no se descuelga). Aguas abajo hasta alcanzar la ciudad de Aimogasta, el caudal del río Salado que se infiltra en el acuífero es repartido de manera uniforme a lo largo de su tramo.

La calibración del modelo en régimen transitorio arranca el 1 de enero de 1995 y finaliza el 31 de diciembre de 2014, con un paso de tiempo mensual, lo que supone un total de 7305 días, y 240 intervalos de tiempo.

Los volúmenes detraídos por bombeo corresponden a 9 zonas de riego. En ellas se cuantificó el área regada, la dotación media por planta, y se transformó el volumen de riego en lámina de agua equivalente. Para cada zona de riego se implementó una función temporal que tuvo en cuenta el inicio de cada explotación y el menor riego durante los tres primeros años de plantación.

## RESULTADOS, ANALISIS Y DISCUSION

### Caso 1: Modelo en condiciones estacionarias

Los parámetros tenidos en cuenta durante la simulación para el modelo de flujo ha sido: conductividad hidráulica, recarga, niveles y caudales fijos, y el coeficiente de goteo (conductancia). En el modelo que involucra fracturas además se estimó una salida de caudal por la zona de fallas de  $0.12 \text{ Hm}^3/\text{d}$ , similar al que podría acceder al sistema por todo el frente del Ambato. Se calibraron automáticamente los valores de conductividad hidráulica de cada zona empleando, para ello, 77 medidas de nivel con el objeto de obtener un buen ajuste entre los niveles medidos y simulados, con parámetros calculados coherentes con la información previa y con un balance de masa adecuado.

Los valores de conductividad hidráulica del acuífero obtenidos varían entre 3.3 y 44.4 m/d. Los más altos están en las zonas proximales de los frentes del Ambato o los abanicos aluviales de los ríos Belén y Andalgala. El modelo que tiene en cuenta la presencia de una fractura provoca que los valores de permeabilidad disminuyan excepto en las zonas de depósitos pedemontanos coluvionales distales adyacentes al trazado de la fractura. Es lógico pensar que una salida del agua a lo largo de una línea de fractura induce a una menor permeabilidad global del terreno para mantener los mismos niveles. En todo caso los valores obtenidos son totalmente coherentes con la estructura geológica.

El error medio (entendiendo como el valor medio de las diferencias absolutas entre los niveles medidos y calculados), es de 1.88 m y de 0.71 m si se tiene en cuenta la zona de falla, valores aceptables para un modelo de escala regional como el aquí simulado (Figura 2).

El balance de masa del sistema para el modelo que considera toda la salida por evapotranspiración (modelo cuenca endorreica o MCE) sugiere un ingreso diario, por los distintos frentes montañosos, de  $0.67 \text{ Hm}^3$  de los cuales un 40% proceden de los frentes del Belén y Velasco. La salida de agua por evaporación es de una magnitud equivalente y, para el área de evaporación ( $3041 \text{ km}^2$ ), supondría una lámina de agua de 80 mm/año, siendo este un valor inferior a la evaporación real. En el modelo que se adiciona la acción de una zona de falla muy conductiva (MCEF) se observa que por ahí sale un 18 % del total de agua que ingresa al sistema, y por evapotranspiración una lámina de agua equivalente a 57 mm/año, ligeramente inferior al obtenido en el MCE (Figura 3).

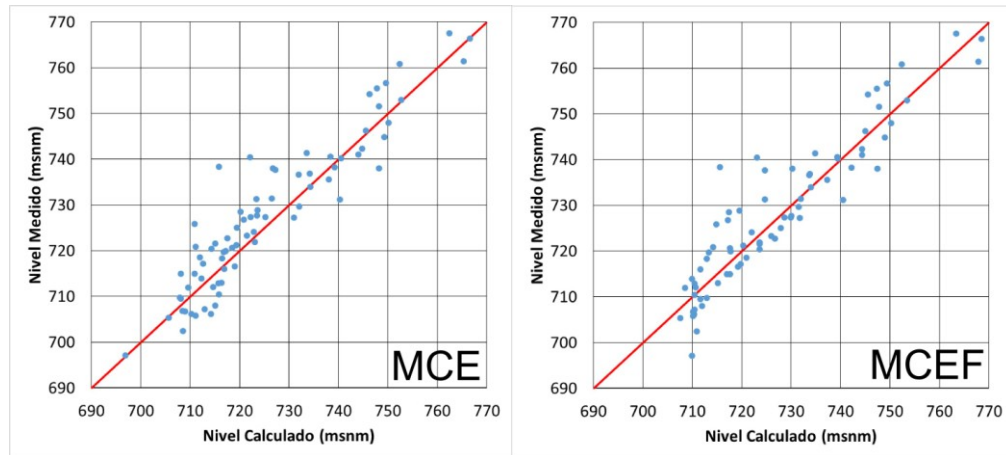


Figura 2. Comparación de niveles medidos y niveles calculados para los modelos MCE y MCEF en régimen estacionario.

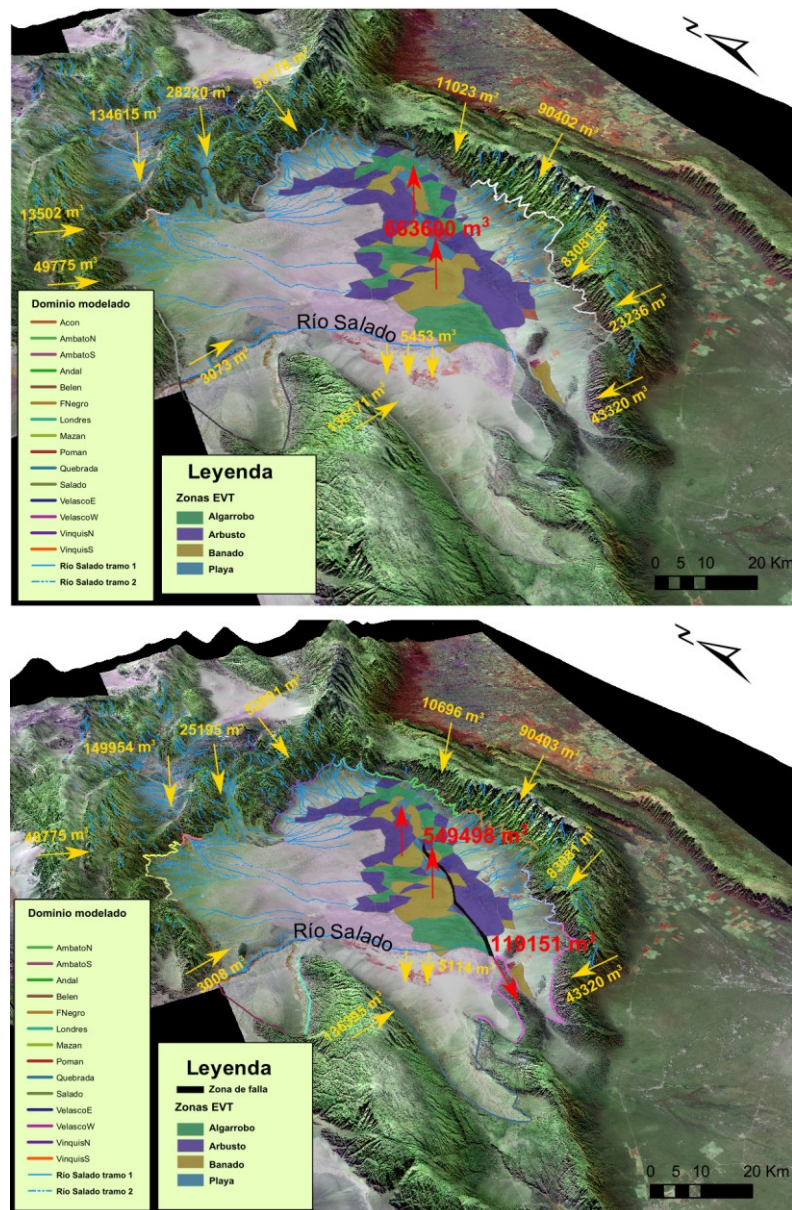


Figura 3. Esquema del balance de masas para el caso del modelo estacionario (arriba) y estacionario con presencia de falla (abajo).

## Caso 2: Modelo en condiciones transitorias

Los valores de conductividad hidráulica (K) obtenidos son similares al modelo estacionario y dentro de un rango homogéneo comprendido entre 2.4 y 55.6 m/d. El ajuste de niveles obtenido tiene un error medio de 5.0 m en el modelo sin fracturas (MCE), y 5.07 m en el modelo con fracturas (MCEF). Los niveles calculados respecto de los medidos se distribuyen homogéneamente en todas las cotas a lo largo de la recta ideal de correlación, no existiendo una tendencia a la subestimación o sobreestimación de niveles. En la mayoría de los hidrogramas utilizados para la calibración se logra reproducir las tendencias de ascensos y descensos a lo largo del periodo simulado (Figura 4)

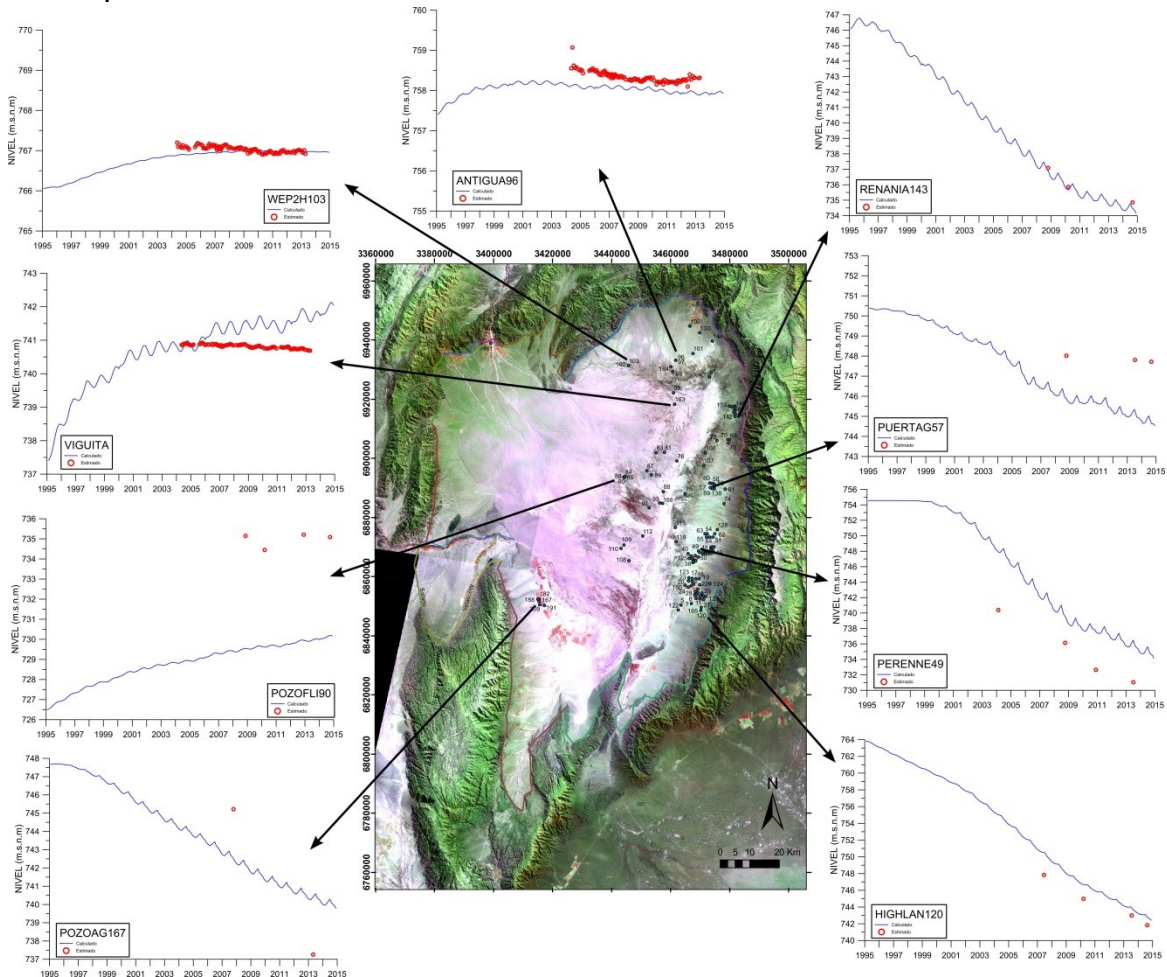


Figura 4. Mapa con algunos hidrogramas de niveles medidos (puntos) y calculados (línea continua) para el MCE, mostrando la variación de nivel (msnm) para los 20 años simulados.

En el balance de masas global para todo el período de simulación se observa que el almacenamiento en el acuífero disminuye con un valor de unos 4600 Hm<sup>3</sup>, lo que representa un valor promedio de ambos modelos de 230 Hm<sup>3</sup>/año o una lámina de agua equivalente de 19 mm/año.

La mayor parte del volumen de agua que sale del sistema se produce en la zona de bañados, que es donde el agua se encuentra en superficie (o subsuperficialmente), y es fácilmente evaporable. En la zona de playa es menor el volumen de agua que egresa, principalmente debido a que su área es sensiblemente inferior. En el MCEF, la zona de falla representa aproximadamente un 30% del volumen de agua que egresa del sistema.

De manera más descriptiva queda caracterizado el vaciamiento del acuífero en la Figura 5 donde claramente puede observarse que el sistema acuífero no es capaz de mantener su almacenamiento solamente con las entradas, y mucho menos si se introduce la

acción antrópica del bombeo. Aunque la recarga es superior a los bombeos, la evapotranspiración potencial juega un papel fundamental al superar con creces el volumen que entra al sistema ya que para todo el periodo modelado suma un total acumulado, en los modelos MCE y MCEF, de 6000 y 5000 Hm<sup>3</sup> respectivamente.

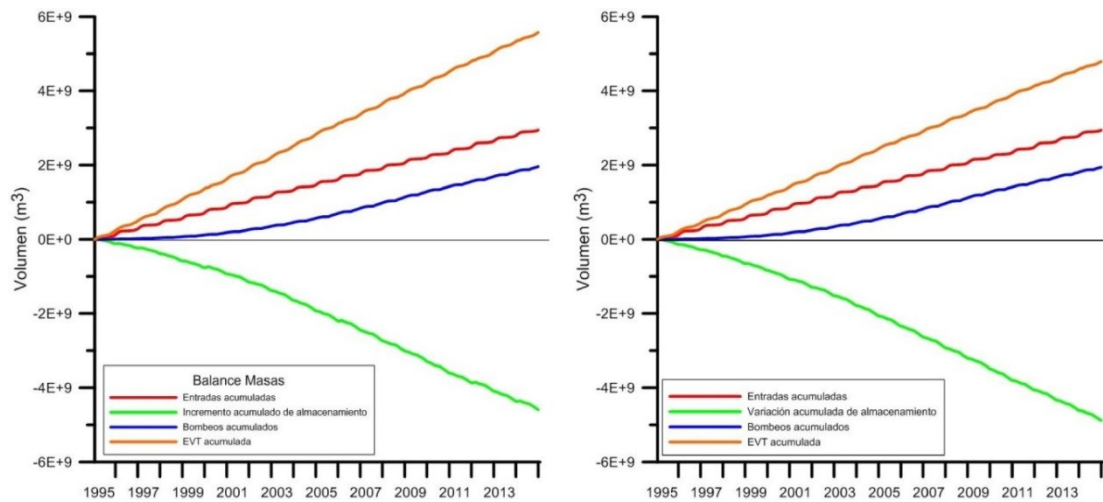


Figura 5. Resultado del balance de masas en régimen transitorio. Volumen total acumulado para el modelo MCE (izquierda) y MCEF (derecha).

Este modelo fue migrado al código numérico VISUAL MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2006) para su uso por parte de la administración provincial de Catamarca. Con VISUAL MODFLOW también se confirma como el descenso paulatino del almacenamiento del acuífero que se produce por el incremento de las extracciones en el sistema (Figura 6).

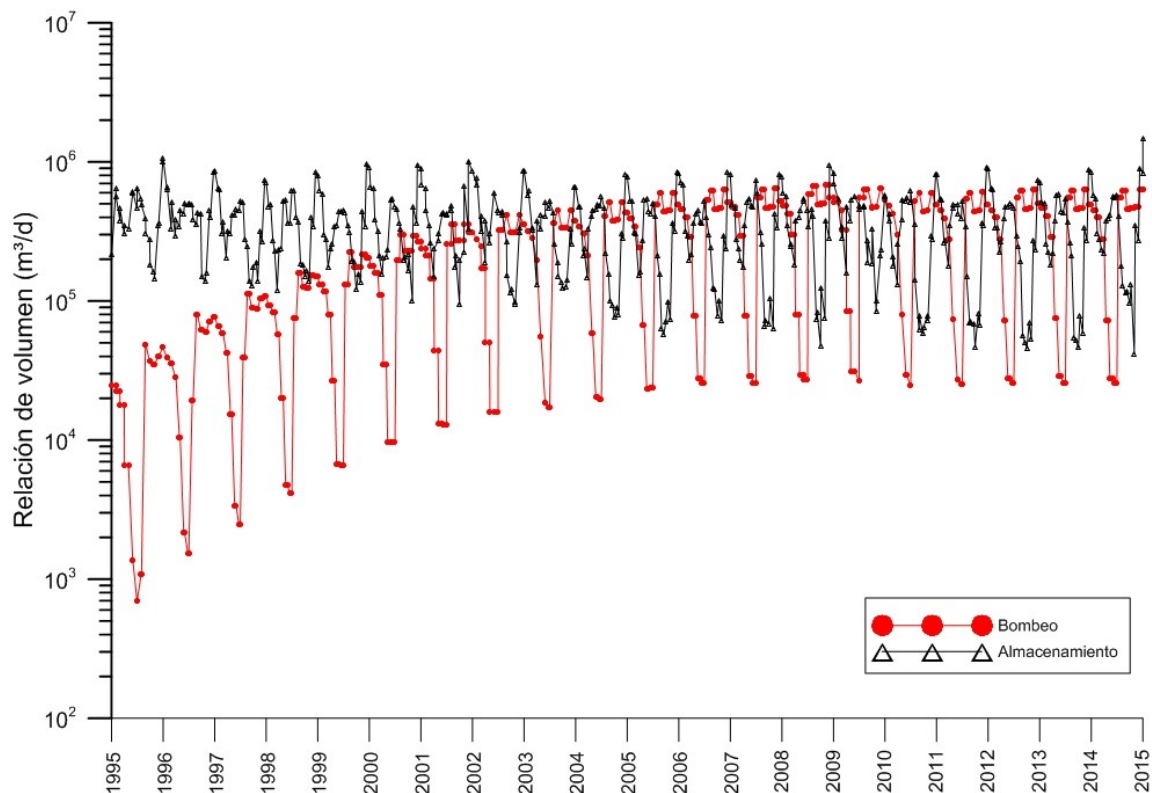


Figura 6. Curva de variación del almacenamiento y el caudal bombeado para el periodo simulado.

## CONCLUSIONES

Se han implementado sendos modelos numéricos del flujo subterráneo del Salar de Pipanaco, uno considerando que los egresos del sistema son por evapotranspiración, y otro adicionando una salida a través de un sistema de fallas. Ambos simulan satisfactoriamente el funcionamiento del sistema a escala regional y lo reproducen con verosimilitud tanto en condiciones estacionarias (caso 1) como en transitorias (caso 2). Ambos modelos numéricos son robustos, habiendo obtenido en ellos un excelente ajuste en los niveles y unos parámetros calibrados del sistema y balances de masas coherentes.

Se obtuvieron valores de conductividad hidráulica  $K$  entre 3.3 y 44.4 m/d para el análisis estacionario, con un error absoluto entre niveles medidos y calculados de 1.88 m para el MCE y 0.71 m en el MCEF. El balance de masas muestra que la principal entrada al sistema es a través de los frentes del Belén, Ambato y Velasco y que las salidas por evaporación equivalen a una lámina de agua de 80 mm/año.

En condiciones transitorias los valores de  $K$  oscilan entre 2.4 y 55.6 m/d y el error medio absoluto en ambos modelos se sitúa en torno a 5 m. El balance de masas para los 20 años simulados muestra un descenso del almacenamiento del acuífero equivalente a una lámina de agua de 19 mm/año. Se observa que el sistema acuífero no es capaz de mantener las reservas existentes con las entradas de agua, es decir se puede entender que existe una situación de sobreexplotación. La explotación continuada del acuífero desde 1995 no ha hecho más que acelerar ese proceso.

Cabe destacar que la comparación entre los modelos MCE y MCEF no resuelve la incertidumbre sobre la potencial implicancia de las fallas regionales en el funcionamiento del sistema acuífero. Sin embargo, cálculos de mezcla utilizando información hidroquímica, y el análisis de los isótopos estables, sugieren que existiría mezcla en profundidad de agua de recarga desde los frentes montañosos que circularían por los sistemas de fallas.

## REFERENCIAS

- BHP.** 1999. Programa: Exploración de Aguas Subterránea Proyecto Agua Rica, Catamarca, Argentina. BHP, Agua Rica
- Carrera, J., Neuman, S.** 1986. Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions, I, Maximum likelihood method incorporating prior information, *Water Resour. Res.*, 22, 199–210
- CONHIDRO S.R.L.-IHLLA-DPhyERH.** 2013. Modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Pipanaco (Catamarca, Argentina). Informe técnico. Gobierno Catamarca, 176 pp
- CONHIDRO S.R.L.-IHLLA-DPhyERH.** 2015. Modelo matemático del flujo subterráneo del Salar de Pipanaco (Catamarca, Argentina). Informe técnico. Gobierno Catamarca, 186 pp
- GHS.** 2003. Código Visual Transin 1.1 R65. Desarrollado en el Dep. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, UPC.
- Medina, A., Carrera, J.** 1996. Coupled estimation of flow and solute transport parameters, *Water Resour. Res.*, 32, 3063–3076
- Medina, A., Galarza, G., Carrera, J.** 1996. TRANSIN, versión II, Fortran code for solving the coupled flow and transport inverse problem in saturated conditions, El Berrocal Project, Characterization and validation of natural radionuclide migration processes under real conditions on the fissured granitic environment, European Commission Contract no. FI2W/CT91/0080, Technical Report 16, ENRESA, Spain
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC, Inc.** 2006. Visual MODFLOW versión 4.06. Canadá.
- Zarantonello, A., Mamani, M.** 1999. Balance hídrico en la cuenca del Salar de Pipanaco, provincias de Catamarca y La Rioja. *Hidrología Subterránea*, II Congreso Argentino de Hidrogeología, IV Seminario Argentino sobre temas actuales de la hidrología subterránea. Santa Fé, Argentina. Serie de Correlación Geológica N°13.