

SIMULACIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO REGIONAL DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

Leticia B. Rodríguez^a; Luis S. Vives^b; Andrea A. Gómez^{a,c}; Stela D. Santos Cota^d

^a *Centro de Estudios Hidro-ambientales, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, CC 217, 3000 Santa Fe, Argentina. leticia@fich1.unl.edu.ar*

^b *Instituto de Hidrología de Llanuras. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.*

^c *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, CONICET.*

^d *Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Brasil.*

Palabras claves: Sistema Acuífero Guaraní, modelación numérica, modelo regional.

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados del modelo numérico del flujo subterráneo regional del Sistema Acuífero Guaraní (SAG), desarrollado en el marco del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní financiado por el Banco Mundial. Se simuló el funcionamiento del denominado “SAG operativo”, acuífero que no incluye las formaciones geológicas que lo confinan en su parte superior e inferior, de menores permeabilidades. Además se lo consideró continuo en toda su extensión. El acuífero posee un funcionamiento hidráulico complejo, se comporta como medio transmisor de la recarga proveniente de las precipitaciones en regiones donde aflora, transfiriéndola a otras zonas de afloramiento donde descarga, sea a través de sus bordes, sea a través del contacto con escurrimientos superficiales. Otra fuente de salida la constituyen los pozos de bombeo que extraen en el orden de 1040 hm³ anuales.

El flujo subterráneo del SAG fue simulado mediante el código numérico TRANSIN, un modelo que resuelve las ecuaciones del flujo de agua subterránea y el transporte de solutos el método de elementos finitos (EF), y que cuenta con un potente algoritmo de estimación automática de parámetros para la resolución del Problema Inverso. El área modelada cubrió 1.200.098 km² abarcando toda la extensión del SAG operativo. El dominio computacional bidimensional se discretizó mediante 46862 elementos triangulares y 23890 nodos, en contraste con el modelo anterior del SAG que cubría sólo un 75 % del área, discretizada mediante 5423 elementos y 2846 nodos, es decir se realizó un refinamiento notable de la malla. El régimen temporal de las simulaciones fue estacionario. Se utilizó una combinación de condiciones de borde externas e internas de primer y segundo tipo y mixtas, además de representar la explotación subterránea y zonas de recarga/descarga.

Durante el proceso de la zonificación/calibración de la conductividad hidráulica K, uno de los principales parámetros, se emplearon varias distribuciones areales con el fin de conseguir un ajuste aceptable con las medidas disponibles de carga hidráulica en puntos de observación.

Los resultados de la modelación fueron razonables y coherentes con la información disponible, aunque evidenciaron una importante incertidumbre respecto de algunos procesos, por ejemplo la localización de las zonas de descarga del sistema regional a lo largo de tramos del río Uruguay y Paraná y, en general, la magnitud de los flujos de agua en el sistema. Las hipótesis de las posibles alternativas de descarga son variadas, aunque deben analizarse en mayor profundidad con metodologías alternativas para reducir las incertidumbres.

1. INTRODUCCION

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) ocupa una superficie de aproximadamente 1.200.000 km², de los cuales 840.000 km² se encuentran en Brasil, 225.500 km² en Argentina, 71.700 km² en Paraguay y 58.500 km² en Uruguay (Figura 1). Con una población, directa e indirecta, de más de 20 millones de habitantes, este recurso subterráneo sufre una explotación cada vez más intensa para satisfacer usos industriales, recreativos, de riego y agua potable.

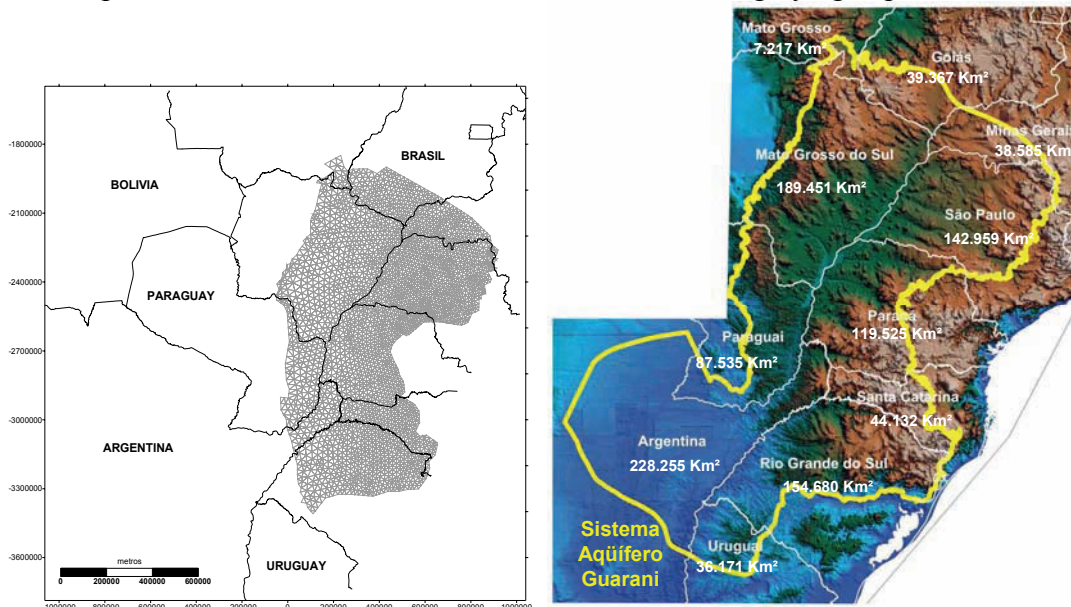


Figura 1: Límite premodelo (izq.) y modelo actual (der.).

En un 90% de su superficie, el SAG se encuentra confinado (o a presión), mientras que en el 10% restante tiene características de acuífero libre, es decir está en contacto con la atmósfera. Sobre esta última superficie recibe recarga directa proveniente de precipitaciones y además está en contacto directo con numerosos cursos de agua superficiales que la atraviesan. El acuífero está formado por areniscas rojas finas a medianas cuarzosas, con granos bien seleccionados y presenta un creciente contenido de arcillas a medida que aumenta la profundidad (Lavina, 1991). El espesor del acuífero varía desde unas decenas de metros hasta más de 800 m, aflora en superficie en la periferia y llega a más de 2.200 m de profundidad en el centro del área. Gran parte del SAG está cubierto por rocas basálticas que conforman la Formación Serra Geral. Esta formación posee cierta fracturación que, dependiendo de su grado de desarrollo, le confiere un comportamiento de acuífero o acuitardo, esto es formaciones que contienen agua pero que no la liberan o la transmiten muy lentamente, respectivamente. La base del acuífero está formada por unidades de mayor contenido arcilloso en el sector norte, el que va decreciendo hacia el sur.

Junto con el modelo conceptual, el modelo numérico constituye la síntesis del funcionamiento hidráulico del SAG condicionado por una compleja geología, la presencia de controles estructurales de diferentes escalas espaciales, la recarga directa proveniente de la precipitación e indirecta de los basaltos fracturados/alterados, la interacción con formaciones infrayacentes, la interacción del flujo subterráneo y superficial en zonas de afloramiento, las descargas a través de los bordes del acuífero, la potencial descarga hacia los ríos Paraguay y Uruguay y otros sumideros, y la explotación para diversos usos.

El modelo conceptual, sobre el cual se sustenta el modelo numérico, representa una hipótesis de funcionamiento del sistema de las varias posibles, y por ende es de carácter cualitativo. La gran extensión del acuífero así como también su accesibilidad conducen a un

escaso conocimiento de su comportamiento hidráulico en determinadas áreas. Para superar este problema se propusieron diferentes modelos conceptuales plausibles donde se analizaron procesos por separado, fundamentalmente referentes al modelo geológico (IHLLA-CENEHA, 2008). El modelo desarrollado cubre todo el SAG, extendiendo el área anteriormente modelada (Vives et al. 2001) y definiendo el denominado SAG operativo (LEBAC, 2008a) dejando fuera de la definición a ciertas unidades que en trabajos previos se asociaban al mismo. La Figura 1 muestra los límites de ambos modelos.

En este trabajo se presenta uno de los modelos conceptuales propuestos que trata al SAG como monocapa o bidimensional, y en régimen temporal estacionario, asumiendo que todas las medidas de carga hidráulica observadas durante los últimos 30 años corresponden a un nivel piezométrico estable y representativo de una situación permanente. Las regiones de afloramiento del SAG se trataron como de recarga directa regional y otras como de recarga local. Los ríos donde existe interacción con el SAG se simulon explícitamente mediante condiciones de borde internas de tipo mixta.

Los resultados de la modelación fueron razonables para la información disponible, sin embargo una de las mayores incertidumbres que aún persisten en el modelo conceptual, y por lo tanto en el numérico, es la zona de descarga del sistema regional y en general la magnitud de los flujos de agua en el sistema.

El modelo numérico empleado es el TRANSIN de Medina et al. (1996), que resuelve la ecuación de flujo mediante el método de los elementos finitos y que dispone de un potente algoritmo para resolver el problema inverso o calibración automática de parámetros (Carrera y Neuman, 1986).

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del modelo regional fue validar el modelo conceptual propuesto y además, sobre la base de una calibración adecuada cuyos criterios se definieron *a priori*, desarrollar una herramienta valiosa de gestión y manejo del recurso. Sin embargo, otro de los objetivos que persiguen los modelos numéricos es poner de manifiesto aquellas zonas del dominio de modelación que presentan las mayores deficiencias de información e incertidumbre, y de ser posible, valorar su influencia en la capacidad de predicción del modelo. Asimismo pueden señalar aquellas características del modelo conceptual que deben revisarse de tal manera de incrementar la confiabilidad de los resultados de las simulaciones.

3. METODOLOGÍA

La construcción del modelo siguió la secuencia de pasos clásica para este tipo de aplicaciones, resumida en la Figura 2 (Carrera y Sánchez Vila, 1994). El primero de ellos es la construcción del modelo conceptual del funcionamiento del acuífero, desarrollado a partir de datos disponibles y estudios antecedentes, y que sirve de base para la posterior modelación numérica. La estructura del modelo se refiere a las ecuaciones que gobiernan el flujo, las capas a ser simuladas, el régimen de explotación, las condiciones de borde, etc.

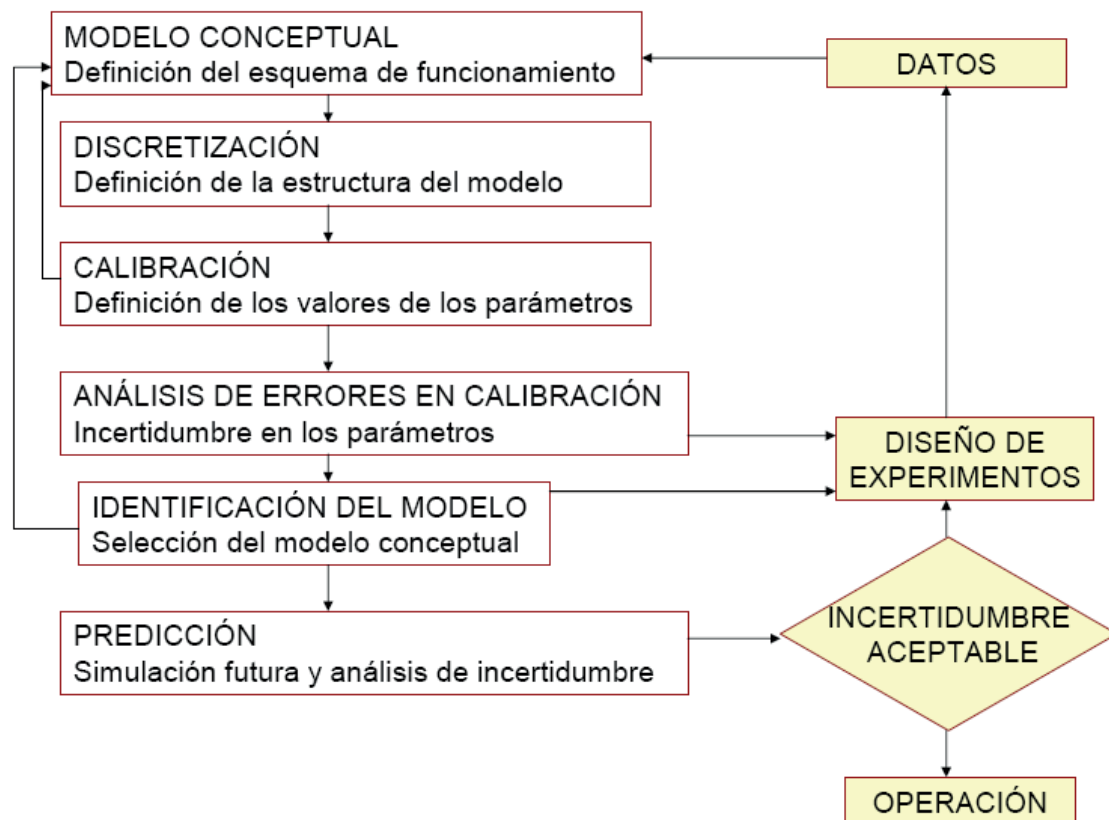


Figura 2. Esquema del proceso de modelación (Carrera y Sánchez Vila, 1994).

Durante el proceso de calibración, sea ésta manual o automática, se ajustan los valores de los parámetros de tal manera de encontrar el mejor ajuste entre los valores observados y calculados de niveles piezométricos. A medida que el proceso de calibración avanza, el modelo conceptual inicial puede sufrir modificaciones que surgen del análisis de los resultados que se van obteniendo del modelo numérico, en un proceso de retroalimentación. Como resultado de la calibración se obtiene el modelo conceptual y numérico que resulta más coherente con los datos disponibles. Aún así este modelo está sujeto a incertidumbres debidas a la falta de datos completos de ciertos parámetros. Un análisis de errores, consistente en un análisis de sensibilidad, permite cuantificar estas incertidumbres. En algunos casos puede ser necesario realizar nuevos ensayos o experimentos, así como obtener datos adicionales para mejorar el modelo conceptual.

Una vez seleccionado un modelo conceptual y numérico se procede a realizar la simulación o predicción de la evolución futura para las distintas hipótesis que se contemplan. Los resultados de la simulación se deben complementar con el correspondiente análisis de incertidumbre. Si los resultados de este análisis conducen a incertidumbres aceptables se procede a la operación.

El modelo conceptual actual del SAG no integra toda la información de campo recientemente generada, por lo tanto constituye una de las muchas interpretaciones posibles acerca del funcionamiento hidráulico del SAG.

4. EL CÓDIGO NUMÉRICO TRANSIN

La modelación se realizó con el código TRANSIN (Medina et al., 1996), que permite simular el flujo del agua subterránea y el transporte de solutos. El preproceso y postproceso

de datos se realizó con el INTRANSIN-III (Vives, 1994).

Desafortunadamente, la calibración manual de todos los parámetros de flujo y/o transporte a partir de valores medidos de niveles piezométricos y/o concentraciones suele ser larga, tediosa y, sobre todo, incompleta. Para limitar estas dificultades, el programa permite realizar la calibración de forma automática, minimizando una función objetivo que tiene en cuenta no sólo el ajuste entre valores medidos y calculados de niveles piezométricos y concentraciones, sino también la plausibilidad de los parámetros calculados. La calibración automática, conocida como Problema Inverso, se obtiene por métodos estadísticos basados en maximizar la verosimilitud de los errores de la estimación, cuyos detalles se pueden ver en Carrera y Neuman (1986).

4.1. Ecuación de flujo

El flujo en los acuíferos está gobernado por la conocida ecuación:

$$\nabla \cdot (\mathbf{T} \cdot \nabla h) + q + q_L = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{en } \Omega \quad (1)$$

donde h es el nivel piezométrico (L), \mathbf{T} es el tensor de transmisividad (L^2/t), S es el coeficiente de almacenamiento (adim.), Ω es el dominio bidimensional, ∇ es el operador gradiente (1/L), q es el término fuente y/o sumidero distribuido superficialmente (recarga o extracción) ($L^3/L^2.t$), y q_L representa las entradas/salidas de los acuíferos situados por encima y/o por debajo del acuífero ($L^3/L^2.t$).

La ecuación (1) se resuelve con las condiciones iniciales:

$$h(x, y, 0) = h_0(x, y) \quad (2)$$

donde h_0 puede ser cualquier función arbitraria, o la solución de la ecuación (1) para una simulación anterior, frecuentemente en régimen estacionario. Si se analizan ensayos de bombeo, h_0 puede asumirse igual a cero en todo el acuífero, en cuyo caso h representa las variaciones del nivel o descensos.

Las condiciones de contorno son de la forma:

$$(\mathbf{T} \cdot \nabla h) \cdot \mathbf{n} = \alpha(H - h) + Q \quad \text{en } \Gamma \quad (3)$$

donde Γ es el contorno de Ω ; \mathbf{n} es el vector unitario normal a Γ y dirigido hacia el exterior; H es el nivel prescrito; Q es un caudal prescrito ($L^3/L.t$); y α es un coeficiente que controla el tipo de condición de contorno ($\alpha=0$ para caudal fijo, $\alpha=\infty$ para nivel fijo, y $\alpha \neq 0, \infty$ para condición mixta, en cuyo caso α es un coeficiente de goteo) (L/t).

5. MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual representa la hipótesis de funcionamiento del sistema, y por ende es de carácter cualitativo; se construye integrando la información geológica, estructural, geofísica, hidrológica/hidrogeológica, hidroquímica e isotópica. Como se explicó, el modelo conceptual actual del SAG no integra toda la información de campo recientemente generada, por lo tanto constituye una de las muchas interpretaciones posibles acerca del funcionamiento hidráulico del SAG.

El SAG se desarrolló dentro de una extensa cuenca sedimentaria, en un complejo contexto geotectónico. Dentro del proyecto se adoptó un criterio de separación operativa de las formaciones fundamentado en la estratigrafía. Bajo esta definición el SAG se apoya sobre unidades geológicas poco permeables (arcillosas) en el norte en territorio brasilero, más permeables en el centro (limo-arcillosas) y permeables (limo-arenosas) en el sector sur. Esto tiene implicancias sobre el sistema de flujos verticales que no fueron tenidas en cuenta y deberían abordarse en nuevas interpretaciones del modelo conceptual.

Rocas volcánicas (basaltos) cubren el SAG en aproximadamente un 90 % de su superficie, lo que le confiere características de confinamiento y/o surgencia, siendo el 10 % restante de su superficie identificada como de afloramiento sujeta a recarga directa por precipitación y marcada interacción con el sistema de agua superficial. Si bien se desconoce el grado de fracturamiento y/o alteración de los basaltos, es poco probable asumir que una cubierta de cerca de un millón de kilómetros cuadrados sea completamente impermeable y homogénea. Numerosos antecedentes a nivel mundial referidos a este tipo de unidades (Custodio y Llamas, 1976; El-Kadi and Moncur, 1996) evidencian la posibilidad de una conexión hidráulica con las unidades infrayacentes. Es posible que esta conexión se produzca en zonas alteradas y/o meteorizadas de menores espesores a través de unas pocas fracturas de tamaño finito, como por un conjunto de pocas fracturas muy conductoras ubicadas dentro de una matriz de baja permeabilidad de espesores considerables. Al igual que con los sedimentos pre-SAG, esta conexión podría afectar los flujos possibilitando tanto recarga desde los basaltos (flujos descendentes) como vías preferentes de flujo ascendente.

Los mayores espesores del SAG se encontrarían en territorio brasilero al oeste de la denominada "calha" central (aprox. 600 m), mientras que los mínimos se encontrarían a lo largo de un eje paralelo al límite entre las provincias de Corrientes y Misiones y a la dorsal Asunción/Río Grande hacia el norte (LEBAC, 2008b). En relación con las profundidades a las que se encuentra el acuífero, existen marcados gradientes de temperatura, presentando los mayores valores en un eje de dirección noreste-suroeste localizado en territorio brasilero. Esta información resulta esencial para la corrección de los valores de conductividad hidráulica utilizados en el modelo numérico (Custodio y Llamas, 1976).

El comportamiento hidráulico en los bordes propuesto para el SAG, insumo esencial para la modelación numérica, se presenta en la Figura 3, donde se observan las zonas de flujo nulo, las de descarga o salida y las de recarga o ingreso.

La recarga en general ocurre en las áreas de afloramiento. Existen además dos regiones internas de recarga, en tanto que el modelo conceptual actual no contempla recarga indirecta al SAG provenientes de los basaltos ni recarga/descarga de la formación infrayacente.

El mapa de niveles piezométricos (Figura 3) fue construido 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. La superficie piezométrica resultante no sería representativa de niveles actuales, en particular en zonas de grandes explotaciones como el noreste. La dirección predominante de flujo a nivel regional es de norte y este hacia el centro de la cuenca, influenciada por las características tectónicas/estructurales de la cuenca sedimentaria.

Una de las mayores incertidumbres que aún persisten en el modelo conceptual es la zona de descarga del sistema regional. Si bien se identifican sistemas locales de recarga/descarga en las zonas de afloramiento en la periferia oeste del sistema, las hipótesis acerca de las posibles alternativas de descarga son variadas, por ejemplo tramos de los ríos Uruguay y Paraná, formaciones infrayacentes, zonas de fracturamiento de los basaltos, etc. Es necesario abordar este aspecto en futuras investigaciones para incrementar la confiabilidad del modelo

conceptual y por ende la del modelo numérico desarrollado a posteriori para su validación.

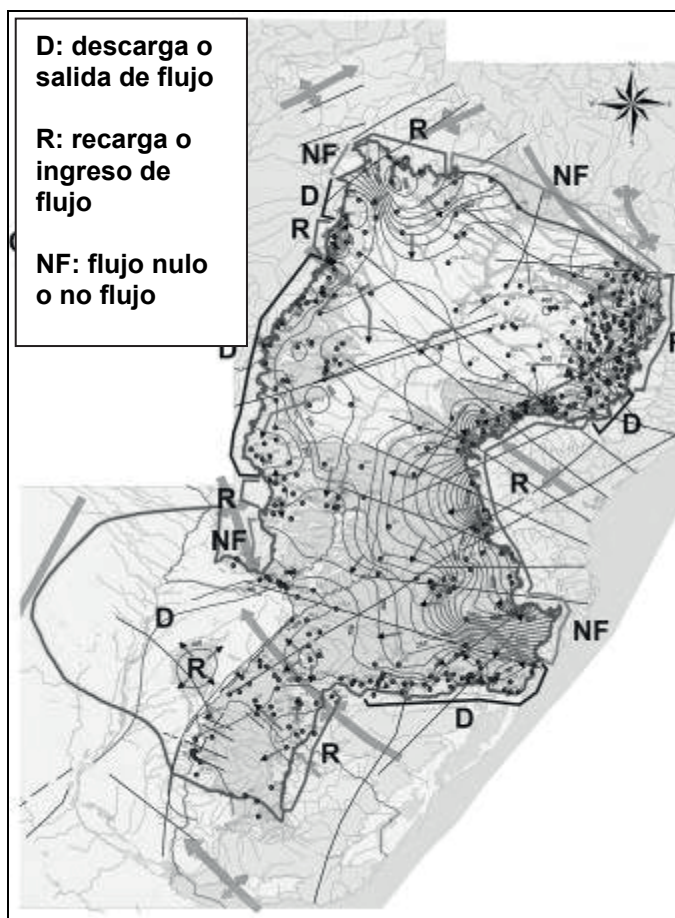


Figura 3. Mapa piezométrico del SAG con las condiciones de contorno (LEBAC, 2008b).

La Figura 4 muestra un perfil longitudinal NE-SO y otro transversal O-E donde se aprecia la hipótesis de continuidad geológica e hidráulica del SAG. Sin embargo autores como Ferreira, 1982; Campos, 2000; Rosa Filho et al., 2003; Machado y Faccini et al., 2004; Soares et al., 2007; Soares, 2008 postulan la presencia de una compartimentación tectónica definida por la presencia de los lineamientos más expresivos. Las discontinuidades geológicas no necesariamente implican discontinuidades hidráulicas dado que las formaciones infra/suprayacentes pueden ser buenas conductoras de agua en diferentes sectores.

6. MODELO NUMÉRICO

El modelo de flujo sólo simula el comportamiento del SAG sin incluir las formaciones que lo confinan tanto en su techo como en su base. El régimen temporal fue estacionario.

6.1 Discretización espacial

El dominio de modelación de 1.200.098 km² fue discretizado por un conjunto de 46862 elementos triangulares y 23890 nudos (Figura 5a). La construcción de la malla bidimensional de elementos finitos triangulares se realizó mediante el código de generación de mallas 2DUMG (Bugada, 1990). La malla presenta un mayor refinamiento en las áreas de elevados gradientes hidráulicos (generalmente en las zonas de afloramiento del SAG, Figura 5b) con un

promedio de 25 km^2 por elemento. En la zona central del dominio de estudio, coincidentemente con la traza del río Paraná, los elementos tienen los tamaños mayores.

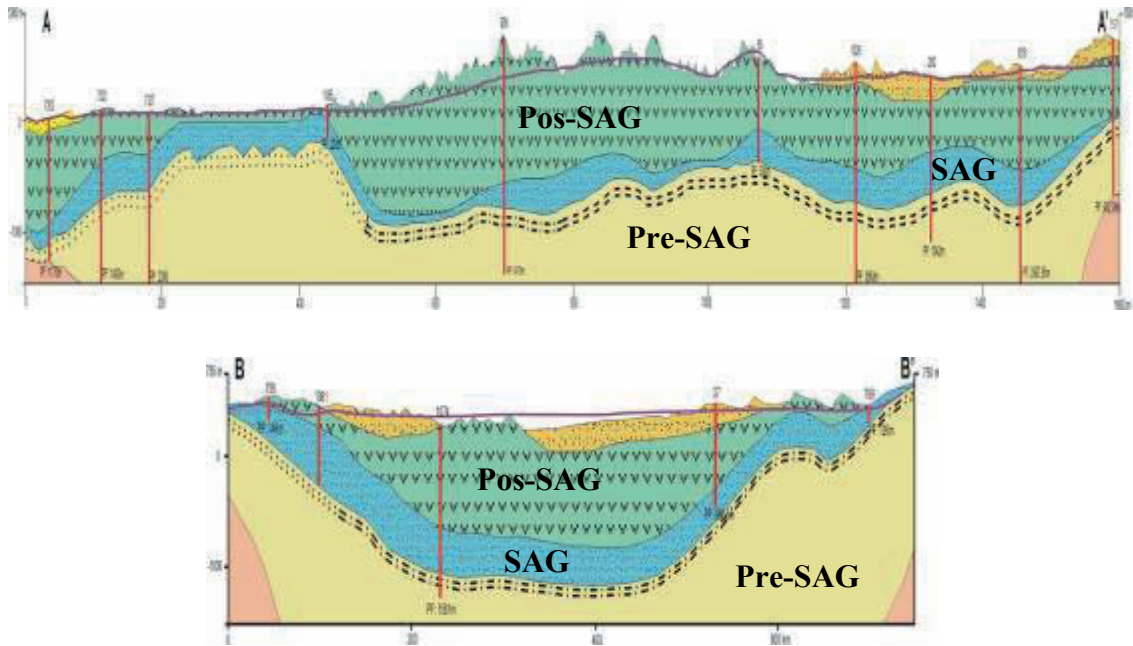


Figura 4. Perfiles geológicos longitudinal (norte- sur) y transversal (oeste-este en el sector del Estado de São Paulo), tomados de LEBAC (2008b).

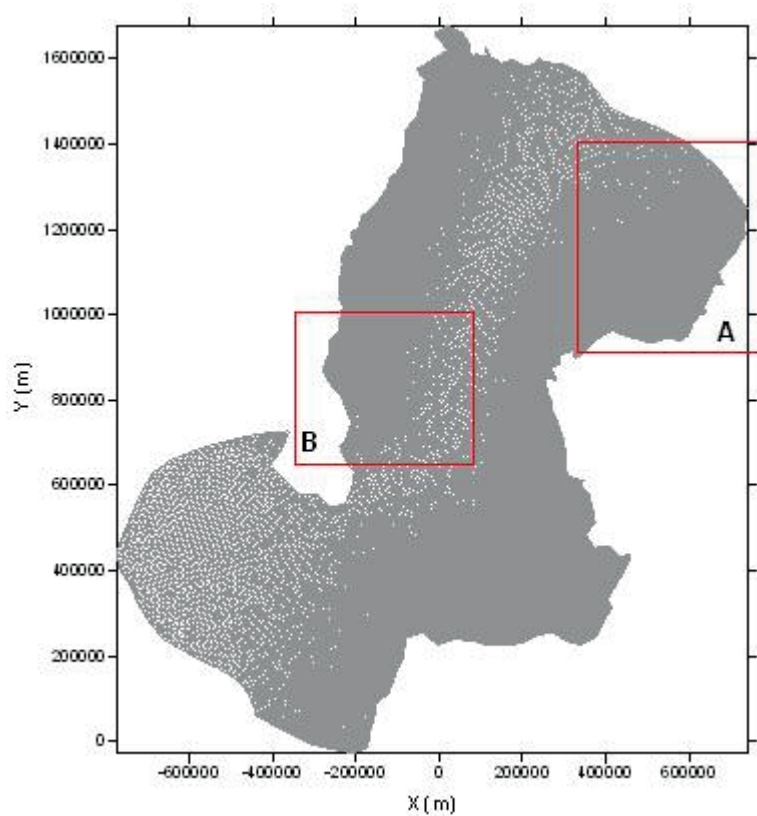


Figura 5a. Malla de elementos finitos. Localización de las zonas A y B de mayor detalle.

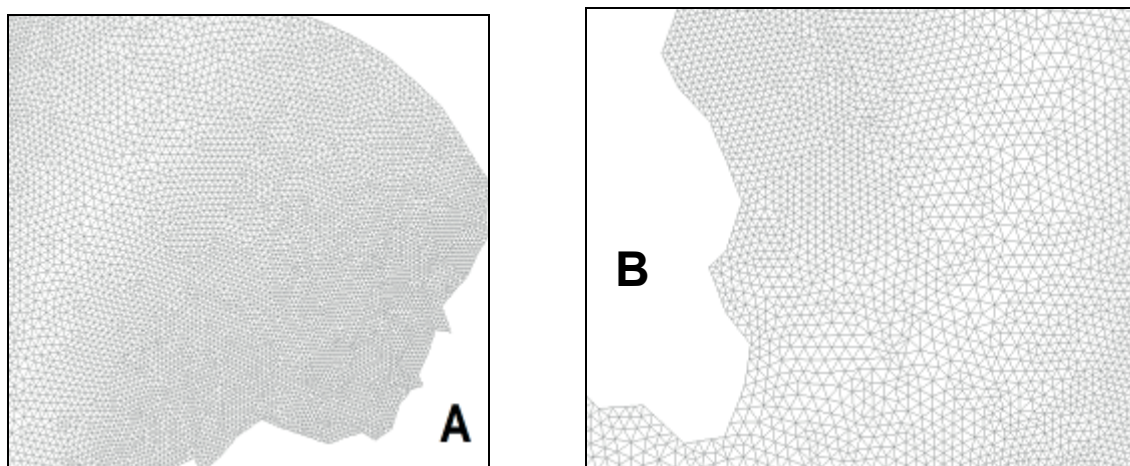


Figura 5b. Detalle de la malla de elementos finitos en las zonas A y B.

6.2 Estructura del modelo

TRANSIN permite asignar propiedades similares a un conjunto de elementos o nudos de la malla, zonificando de esta manera los valores constantes de los parámetros del sistema, por ejemplo pueden agruparse todos los elementos que componen una parte del dominio que poseen una misma litología o una misma permeabilidad. El parámetro asociado a cada elemento (o nudo) es el resultado de multiplicar un coeficiente que depende del elemento (o nudo) por el parámetro característico de la zona a la que pertenece el elemento (o nudo). El programa estima automáticamente los parámetros de zonas a partir de una estimación previa.

En ausencia de un mapa de conductividad hidráulica, se utilizaron valores de diferentes fuentes, como se muestra en la Tabla 1.

<i>Fuente Región</i>	<i>K (m/d)</i>
Freeze y Cherry (1979)	1-2
SAG-PY (2007)	Paraguay 3,8
Gómez (2007)	Uruguay 0,12 – 5,76

Tabla 1. Rango de conductividad hidráulica

Los valores de conductividad hidráulica utilizados en el modelo fueron corregidos por la temperatura para cada elemento de la malla mediante la formulación de Schneebeli (1966), extraída de Custodio y Llamas (1976).

La Figura 6 muestra las zonas de afloramiento en la periferia del dominio donde se aplicó una tasa de recarga/ingreso de agua estimado como un porcentaje fijo de la precipitación media anual.

El tratamiento numérico de la interacción acuífero-río se realizó mediante una condición de tipo mixta o goteo, cuya expresión matemática es,

$$Q = \frac{AK}{L}(h - H_{ext}) = \alpha(h - H_{ext}) \quad (4)$$

donde α es el coeficiente de goteo, h la altura piezométrica y H_{ext} es un nivel externo de

referencia. Tanto el coeficiente de goteo como el nivel externo pueden zonificarse para adaptarse a las condiciones de río. Los tramos de ríos simulados son 28 (Figura 6). Los números 20 y 21 representan tramos de los ríos Uruguay y Paraná, respectivamente.

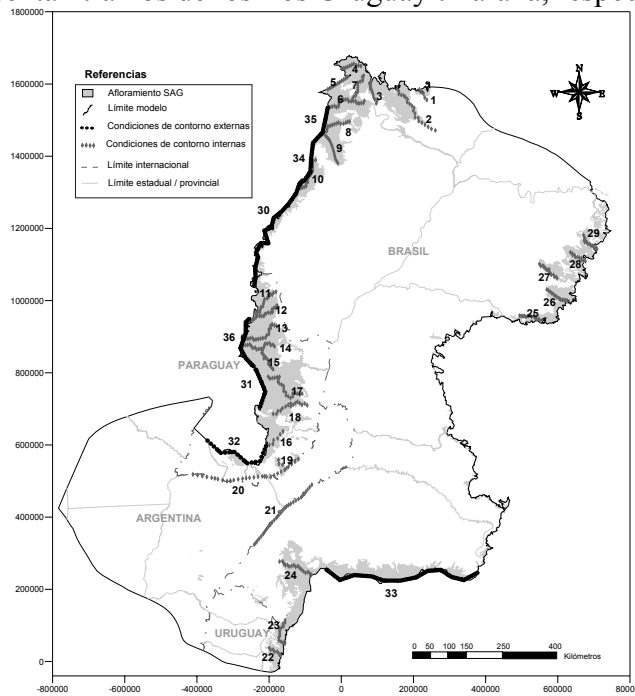


Figura 6. Áreas de recarga coincidentes con las zonas de afloramientos y ríos simulados.

Se emplearon varias zonificaciones de conductividad desarrolladas a partir de diferentes criterios. En este trabajo se presenta la basada en la piezometría y en el análisis de cambios de gradientes hidráulicos, donde se definieron 31 zonas en total (Figura 7).

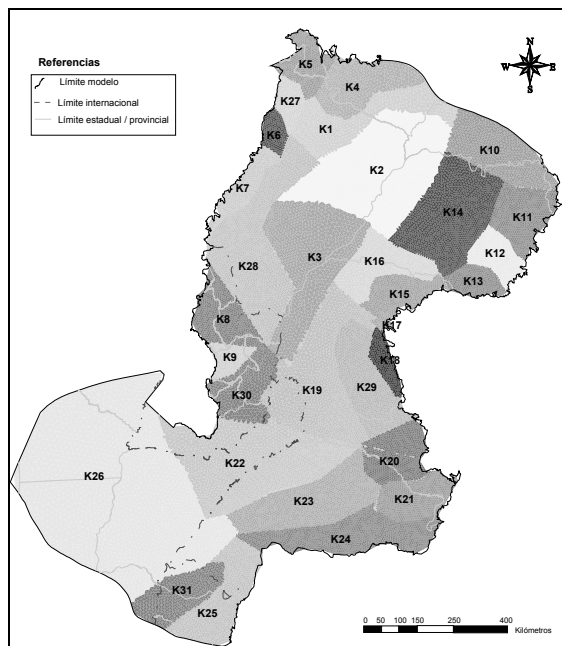


Figura 7. Zonificación de la conductividad hidráulica

El volumen explotado actualmente y su distribución geográfica constituyen componentes fundamentales del modelo numérico. Los valores volumétricos encontrados brindan la mejor

determinación posible dada la información hoy disponible, y pueden tanto subestimar como sobreestimar la explotación. Se simuló volumen de extracción de 1040 hm³/año.

De acuerdo al modelo conceptual (LEBAC, 2008a), el límite del SAG presenta una combinación tanto de flujos entrantes/salientes como de flujo nulo. La Figura 8 presenta las condiciones de borde implementadas en el modelo, resultantes del análisis de la propuesta del modelo conceptual, la piezometría y la calibración.

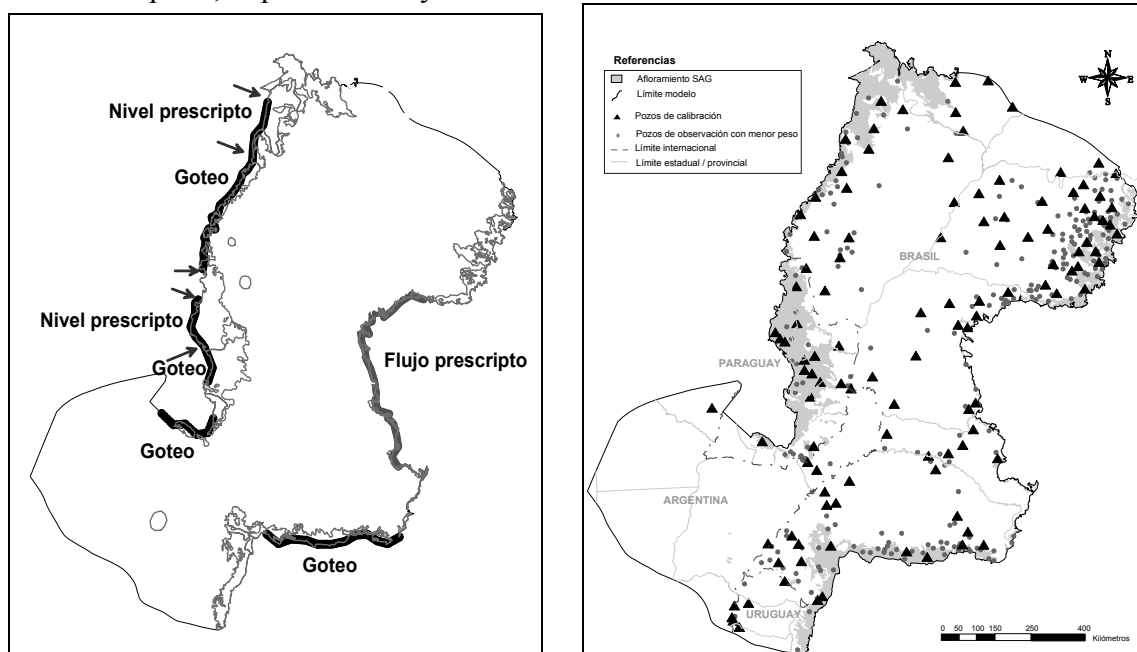


Figura 8. Condiciones de borde externas del modelo numérico (izq.) y Puntos de observación seleccionados para el proceso de calibración del modelo (der.).

En la resolución del problema de flujo subterráneo, los niveles piezométricos observados constituyen la información más importante para la estimación de parámetros debido a que son utilizados en el cómputo de la función objetivo al resolver el problema inverso. Se seleccionaron 114 niveles observados del universo inicial de 371 empleados para el trazado de la piezometría (Figura 3) de tal manera de contar con una distribución homogénea de medidas (Figura 8). El resto de los puntos de observación no se descartan del proceso de calibración sino que intervienen con un peso menor debido a que son considerados a priori menos ciertos.

7. RESULTADOS

Para la calibración del modelo numérico se empleó la estrategia de calibrar manualmente los valores de las tasas de recarga areal y posteriormente de forma automática los valores de conductividad hidráulica de cada zona.

El rango de conductividades hidráulicas calibradas en las 31 zonas definidas fue de 0,9 m/d a 35 m/d, con valores más elevados en las zonas 3 y 27 (ver Figura 7). Las conductividades de las zonas 9 y 16 no se calibraron, fijándose su valor en 75 m/d y 100 m/d, respectivamente. En las zonas K3 y K30 se obtuvieron conductividades superiores al resto, indicando la presencia de algún tipo de control sea estructural sea geológico que no fue del todo considerado en el modelo conceptual a validar.

Cualitativamente las curvas piezométricas simuladas (Figura 9) muestran patrones similares a los observados, fundamentalmente se esboza correctamente en la curva de 400 m.

El error medio de los niveles fue de 44,4 m , sólo 3 puntos presentan errores mayores a +/- 100 m (situados en zona de afloramiento y de elevados gradientes topográficos), mientras que 51 presentan errores mayores a +/- 30 m . El contraste entre niveles medidos y calculados (Figura 10) muestra el buen ajuste obtenido, estando el error medio definido como:

$$EM = \sum_{N_{obs}} |nivel\ medido - nivel\ calculado| / N_{obs} \tag{5}$$

donde N_{obs} es el total de puntos de observación utilizados en la calibración.

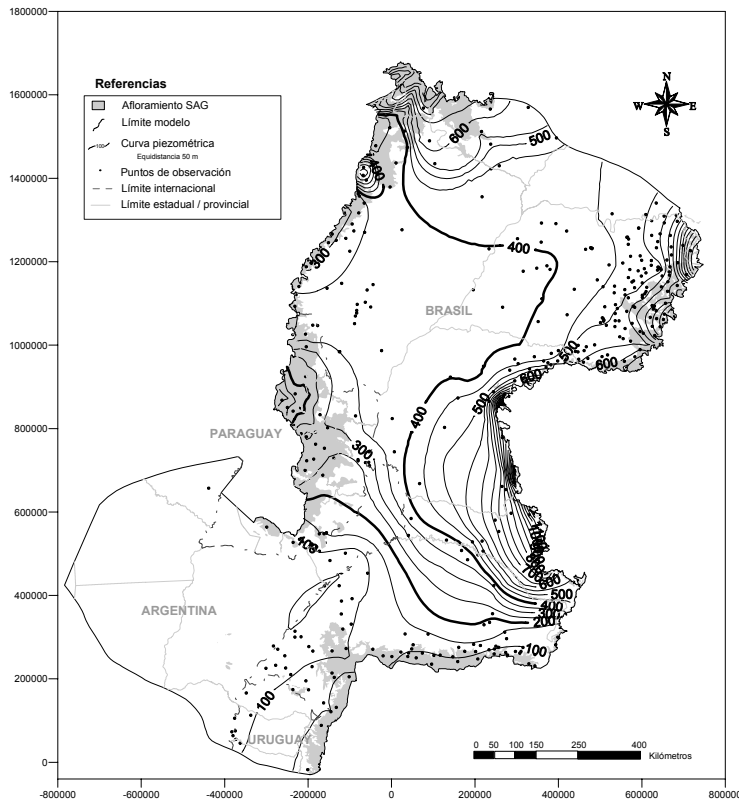


Figura 9. Piezometría simulada.

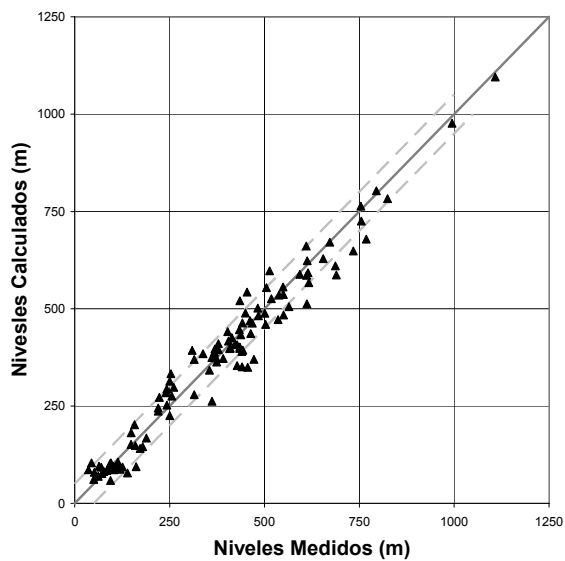


Figura 10. Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración.

El balance de masa global muestra que los flujos involucrados en el sistema son muy pequeños en comparación con los caudales mínimos de los principales ríos del sistema superficial: Uruguay, Paraguay y Paraná. La recarga y el flujo que descarga el acuífero en los ríos constituyen las componentes dominantes. El flujo que entra y sale a través de los bordes donde se fijó el nivel piezométrico es despreciable. En conjunto los 28 tramos de ríos, simulados como condiciones de goteo, descargan unos $110 \text{ m}^3/\text{s}$, aproximadamente la mitad del caudal mínimo histórico registrado en el río Uruguay.

En el caso de los tramos simulados de los ríos Uruguay y Paraná, los flujos involucrados son extremadamente pequeños, y no podrían identificarse o cuantificarse mediante registros de caudales convencionales, debiendo recurrirse a técnicas hidroquímicas. El caudal módulo de los ríos Paraná (Estación Itatí) y Uruguay (Estación El Soberbio) es 12.259 y $2.672 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente (MPF, 2004). Es importante resaltar que en las simulaciones realizadas del SAG, el flujo de descarga calculado al río Paraná ($0,9\text{-}1,8 \text{ m}^3/\text{s}$) es aproximadamente un 10% del que recibiría el Uruguay ($7,4$ a $9,8 \text{ m}^3/\text{s}$).

Si bien no se presentan todas ellas, progresivamente las diferentes zonificaciones condujeron a una disminución de los errores en los puntos de observación. La comparación de las curvas piezométricas simuladas con las trazadas por LEBAC (LEBAC, 2008b) guarda similitudes en zonas de grandes gradientes, sistemas de recarga/descarga locales, sector argentino, no así en el centro del área modelada, en particular el trazado de la curva de 350 m.

En todos los casos las conductividades calculadas fueron superiores en la zona central con respecto al resto del área modelada y de las conductividades esperables para areniscas (el material del acuífero), aún considerando un efecto de escala. Esto refleja la necesidad del modelo de conducir flujos. En orden a reducir esos valores de K a valores coherentes, una alternativa posible (entre otras) es incluir una conexión hidráulica entre el SAG y los basaltos que constituya una zona de descarga o flujo ascendente.

Sobre la zonificación de la Figura 7 (31 zonas de K), se incluyó un área de descarga (simulada como goteo) ubicada aproximadamente paralela al río Paraná al norte de la cola del embalse de la represa de Itaipú. En la Figura 11 se la identifica con un área punteada. En la misma figura se aprecia el cambio notable resultante en la piezometría de la zona, que se asemeja al modelo conceptual. Esto indica que la hipótesis de impermeabilidad de los basaltos y el trazado de la curva de 350 m deben revisarse en estudios futuros.

La conductividad calibrada de la zona 3 se redujo de 144 m/d en el caso anterior a $4,7 \text{ m/d}$, valor mucho más coherente. Lo mismo ocurrió con la zona 30, inmediatamente aguas debajo de la anterior, que disminuyó de $34,6 \text{ m/d}$ a $4,6 \text{ m/d}$. Es decir que se logró el objetivo buscado. Para estimar el coeficiente de goteo de la nueva zona de descarga se probaron varias conductividades de basalto. Finalmente, se adoptó el valor de $1 \times 10^{-2} \text{ m/d}$ por resultar en el conjunto de parámetros más coherentes y el menor error medio ($44,11 \text{ m}$).

La Figura 11 muestra además la comparación entre valores medidos y calculados. Solo un punto posee un error superior a 100 m y 51 puntos tienen errores por arriba de $\pm 30 \text{ m}$.

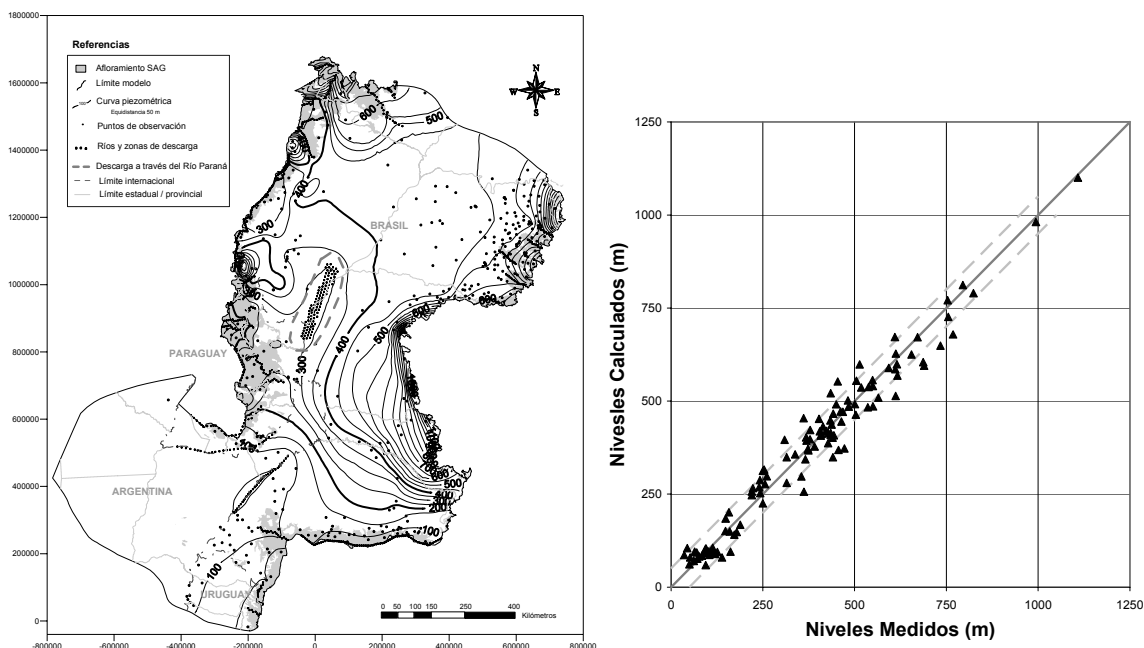


Figura 11. Mapa de isopiezas calculadas (en metros) y niveles medidos versus calculados.

8. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista exclusivo del modelo regional se ha percibido una importante mejora respecto al prem modelo de Vives et al (2001), fundamentalmente en: dominio de simulación, mayor información de puntos de medidas confiables, un amplio análisis geológico estratigráfico, y un profundo tratamiento de las extracciones. Sin embargo se necesita continuar y profundizar el análisis de la geología y las estructuras, además de la información isotópica e hidrogeoquímica que no fue integrada al modelo conceptual para así revisar la hipótesis de que el SAG operativo es una unidad geológica continua sin conexión hidráulica con formaciones infra y suprayacentes.

Los modelos conceptuales y numéricos son capaces de reproducir el patrón regional de flujo, con dirección predominante norte-este hacia el centro del dominio y numerosos sistemas locales de recarga/descarga en las zonas de afloramiento en la periferia del sistema fuertemente influenciados por el bombeo, la recarga de las precipitaciones y la interacción acuífero/río.

Los resultados de la modelación fueron razonables para la información disponible, sin embargo, una de las mayores incertidumbres que aún persisten en el modelo conceptual, y por lo tanto en el numérico, es la zona de descarga del sistema regional y en general la magnitud de los flujos que conforman el balance de masa. Las hipótesis acerca de las posibles alternativas de descarga son variadas, y van desde tramos de los ríos Uruguay y Paraná, formaciones infrayacentes de variada permeabilidad, zonas de fracturamiento de los basaltos, y seguramente otras por explorar.

9. REFERENCIAS

Bugeda, G. Utilización de técnicas de estimación de error y generación automática de mallas en procesos de optimización estructural. *Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Tesis Doctoral, 1990.*
 Campos H.C.N.S, 2000. Modelación Conceptual y Matemática del Acuífero Guarani, Cono Sur. *Acta Geológica Leopoldinense, São Leopoldo, v.23, nº4, 3-50.*

- Carrera J. y Sánchez Vila X., 1994. La influencia de la variabilidad espacial en la incertidumbre de los modelos de transporte de solutos. En: Análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas. T. 1. 169-184.
- Carrera J. and Neuman S. Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions, I, Maximum likelihood method incorporating prior information. *Water Resources Research*, 22 (2), 199-210, 1986.
- Custodio E. y Llamas J.R., 1976, 1983. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona. pp. 2450.
- El-Kadi A.I. and Moncur J.E.T, 1996. The History of Groundwater Management and Research in Hawaii. Water Resources Research Center, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA. 23 pp.
- Ferreira, F. J. F. Alinhamentos estruturais-magnéticos da região Centro-Oriental da Bacia do Paraná e seu significado tectônico. Geologia da Bacia do Paraná, Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos. Sao Paulo, PAULIPETRO, p.143-166, 1982.
- Freeze R. A. and Cherry J. A., 1979. Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 604 pp.
- Gómez A. (2007). Análisis del comportamiento hidráulico subterráneo de las Formaciones “Tacuarembó – Arapey” del Sistema Acuífero Guaraní en el norte de Uruguay. Tesis de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, Universidad Nacional del Litoral, Argentina. 170 pp.
- IHLA-CENEHA, 2008. Modelación Numérica Regional del Sistema Acuífero Guaraní. Informe Final. Serviço de Hidrogeologia Geral, Terminalismo e Modelo Regional do Aquífero Guarani - Ref.: SBCC/01/04 – 1/1018.1. 134 pp.
- Lavina, E.L., Geología sedimentar e paleogeografía do Neopermiano e do Eotriássico (Intervalo Kazaniano – Scythiano) da Bacia do Paraná. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS, Tese de Doutorado, 2v. 1991.
- LEBAC, 2008a. Informe Final Hidrogeologia Regional do SAG. Coordenação: Gastmans, D & Chang, H.K. Equipe Técnica: Paula e Silva, F.; Correa, S.F. Serviço de Hidrogeologia Geral, Terminalismo e Modelo Regional do Aquífero Guarani - Ref.: SBCC/01/04 – 1/1018.1. Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 144p.
- LEBAC, 2008b. Mapa Hidrogeológico do Sistema Aquífero Guarani. Coordenação: Sinelli, O. Equipe Técnica: Chang, H.K.; Gastmans, D.; Paula e Silva, F.; Correa, S.F.; Pressinotti, M.M.N. Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 54p. e 8 mapas.
- Machado J.L.F. y Faccini U., 2004. Influência dos Falhamentos Regionais na Estruturação do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, Cuiabá. Anais. Cuiabá: ABAS. CD-ROOM.
- Medina, A.; Galarza, G.; Carrera, J. 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. Topical Report 16. ENRESA, 1996.
- MPF, 2004. Estadísticas Hidrológicas de la República Argentina. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas, Subsecretaría de Recursos Hídricos. 900 pp.
- Rosa filho E.F., Hindi E.C., Rostirolla S.P., Ferreira F J.F. y Bittencourt AV.L., 2003. Sistema Aquífero Guarani. Considerações preliminares sobre a influência do Arc de Ponta

- Grossa no fluxo das águas subterrâneas. Revista Águas Subterrâneas, n. 17, 91-112.
- SAG-PY, 2007. Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la Región Oriental del Paraguay. Informe Técnico de Avance de la Cooperación Técnica entre la Secretaría del Ambiente (SEAM) y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR), financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).
- Schneebeli, G. *Hidraulique souterraine*. Editors Eyrolles, París. 362 pp, 1966
- Soares A.P., Soares P.C., Bettú D. F. y Holz M., 2007. O papel dos lineamentos na compartimentação estrutural da bacia do Paraná. Revista Geociências, UNESP.
- Soares A.P., 2008. Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guaraní: controles estratigráficos e estruturais. Tesis Doctoral del Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Brasil.
- Vives, L. Manual del código INTRANSIN III Versión 2.0. Barcelona, Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Informe interno, 1994.
- Vives, L., Campos, H., Candela, L. y Guarracino, L. Modelación del acuífero Guaraní. *Boletín Geológico y Minero*, v. 112, Núm. Especial, pp. 51-64. ISSN:0366-0176, 2001.