

**PRIMER CONGRESO IBEROAMERICANO DE PROTECCIÓN, GESTIÓN,
EFICIENCIA, RECICLADO Y REÚSO DEL AGUA**

**PRIMER SEMINARIO DE UNIVERSALIZACIÓN DEL ACCESO AL AGUA APTA
PARA EL CONSUMO HUMANO**

**MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DE LA LAGUNA MAR
CHIQUITA PARA LA GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO**

Fabián Fulginiti, Teresa Reyna, Santiago Reyna, María Lábaque

*Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina,
fabianfulginiti@gmail.com, teresamaria.reyna@gmail.com*

RESUMEN:

En el siglo pasado la demanda mundial de agua se multiplicó por más de seis mientras que la población del planeta se triplicó. Esta creciente preocupación por el agua a nivel mundial, justifica el estudio y planificación de su uso. El estudio del agua subterránea en la cuenca endorreica de la laguna Mar Chiquita reviste importancia ya que es una región de relevancia del país debido a la abundante biodiversidad que existe en sus humedales por el cual fue declarado sitio RAMSAR. Los programas para simular el flujo de las aguas subterráneas constituyen una herramienta de gran utilidad en la gestión del recurso, dando herramientas útiles para la planificación y administración de los elementos intervinientes. En este trabajo se presenta la modelación del acuífero freático de la cuenca de Mar Chiquita; comenzando con la conceptualización del dominio del modelo; luego se realizó la selección de las condiciones de borde, la asignación de los parámetros y por último la calibración del mismo. Las situaciones modeladas permitieron inferir, las líneas de flujo para el acuífero libre y mostrar la importancia de estudios de este tipo a nivel regional y local para poder interpretar el funcionamiento de la cuenca. Como objetivo complementario se pretende sentar bases para la elaboración de propuestas sobre alternativas de manejo de los recursos hídricos y macroambientales de manera de minimizar los potenciales efectos nocivos sobre el recurso.

PALABRAS CLAVES: Cuencas endorreicas, aguas subterráneas; modelación numérica

ABSTRACT:

During the past century, global water demand increased six times while the world's population tripled, justifying the study and planning of this vital resource.

Studying Mar Chiquita's groundwater resource is essential because of the importance of this RAMSAR site due to the biodiversity existing in its wetlands. Regarding the software used in order to simulate groundwater flow, they constituted an important tool for planning and management of the variables involved.

In this paper, it is presented Mar Chiquita's groundwater flow modeling, beginning with the conceptualization of the model. After this, the boundary conditions were selected, parameters were assigned and finally the model was calibrated. Among the results obtained, during the modeling of different situations, the determination of the flow lines for the unconfined aquifer shows the importance of these studies in order to interpret the functioning of the basin.

As a complementary objective it is pretended to set the bases for the development of alternative proposals on water and macro-environmental resources, in order to minimize potential adverse effects.

Key words: groundwater; numerical modeling

INTRODUCCIÓN

La laguna Mar Chiquita es un lago salado endorreico que se encuentra al noreste de la Provincia de Córdoba (Figura 1), en el centro de Argentina. Es también conocida como Mar de Ansenusa, y hasta mediados del siglo XIX como Laguna de los Porongos. Es la mayor superficie lacustre de la Argentina y el quinto lago salado endorreico más grande del planeta. Está ubicada al nordeste de la provincia de Córdoba, próxima a los confines con las provincias de Santa Fe y Santiago del Estero. Según los ciclos seculares de hem Ciclos húmedo y seco (inundación/sequía) su superficie ronda los 6.000 km², con una mínima registrada históricamente de 1.984 km², y un volumen de 14.483 km³.

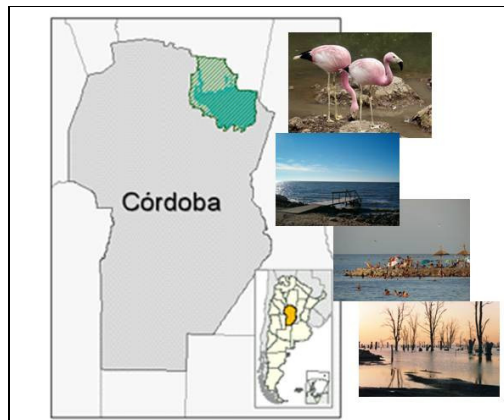


Figura 1: ubicación de la zona de la laguna de Mar Chiquita

El sistema hidrográfico regional está formado por la cuenca endorreica de la Laguna Mar Chiquita (Laguna o mar de Ansenusa), epicentro de la cuenca, sus ríos tributarios Primero (Suquía), Segundo (Xanaes) y Dulce (Petri), bañados y saladillos. Antes de alcanzar la laguna, sus afluentes forman "bañados" (humedales) sobre una superficie de casi 10.000 km². Los humedales más importantes se ubican en la zona norte de la laguna, llamada Bañados del Petri. Las aguas de la laguna son fuertemente salinas, con concentraciones que varían de acuerdo a sus ciclos, que van entre un máximo superior a 250 mg/l hasta mínimas inferiores a los 30 mg/l.

La gran variabilidad espacio – temporal que caracteriza a la laguna y la zona de bañados tiene efectos muy importantes sobre la diversidad biológica, la que debe desarrollar adaptaciones para sobrevivir a estos cambios que pueden llegar a ser muy extremos por esto la zona fue reconocida como sitio RAMSAR, Reserva Natural Provincial y Sitio Hemisférico por la Red Hemisférica de Aves Playeras.

Las aguas subterráneas representan en la Provincia de Córdoba un recurso natural inapreciable, pues la notable escasez de las aguas superficiales y las condiciones climáticas desfavorables de una extensa área. En este marco es de gran interés el estudio del movimiento del agua subterránea dentro de la cuenca endorreica de la laguna Mar Chiquita con el objetivo de contar con una herramienta útil en la gestión, planificación, protección y conservación de este recurso.

Son numerosos los estudios y modelos realizados sobre la cuenca, limitados sólo al cuerpo lagunar y a los bañados, independizándose de otros procesos que ocurren en el resto de la cuenca. Una propuesta para extender los límites de estas modelaciones es incorporar, tanto a escala local como regional, el componente hidrogeológico. En este trabajo se emplea software MODFLOW que permite plantear hipótesis sobre comportamiento hidrogeológico, interpretar el movimiento del agua y aproximarse a la dinámica del lugar.

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Existen numerosos estudios y publicaciones sobre esta área; entre los más importantes se pueden citar:

- “Estudio Hidrológico – Ambiental del Sistema Mar Chiquita - Bañados y Tramo Inferior del Río Dulce”. Informe Final UNC-UNSE a SSRH (Rodríguez, A. y equipo, 2007).
- Recursos de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento en la Llanura Pampeana y en el Valle del Conlara (C.A.A.A.S., 1975).
- Datos obtenidos del frentómetro ubicado en las proximidades de la laguna.
- Datos de perforaciones registradas en DIPAS.
- Evaluación Hidrogeológica - Diagnóstico Ambiental de Las Aguas Subterráneas de la Ciudad de Córdoba (Ferral y otros, 2007).
- Tesis de maestría en Ciencias de la Ingeniería Plencovich, 2010. “Simulación Hidrológica de los humedales de Mar Chiquita con apoyo satelital”.
- Informe para el ENOHS “El agua potable en la República Argentina - Diagnóstico de fuentes de agua en algunas localidades” (Pflüger, 2007).

Suelos:

La magnitud de la infiltración y escorrentía producto de las precipitaciones está directamente relacionada con las características del suelo. Superficialmente gran parte del suelo que cubre los depósitos aluviales de los ríos que desembocan en la laguna Mar Chiquita se corresponden con depósitos de tipo loessico. Los suelos loésicos presentan singularidades en cuanto a la anisotropía de la conductividad hidráulica, la conductividad hidráulica vertical (K_v) es mayor que la horizontal (K_h). Los niveles superiores de limos arcillosos presentan estructuralmente una red de fisuras y microfisuras visibles. Esta red incrementa el valor de la conductividad hidráulica (Rocca et al, 2005).

A menor escala y específicamente para el horizonte superficial no consolidado (aproximadamente 0.5m), se dispone de la clasificación de suelos según el sistema "Soil Taxonomy" (SSS- USDA, 1975) representado en el "Atlas de Suelos de la República Argentina" elaborado por el INTA. En la provincia de Córdoba como en Santiago del Estero, la mayor parte de la superficie correspondiente a la cuenca en estudio se encuentra cubierta de suelos del grupo de los molisoles y subgrupos ustoles y haplusoles surcados por depósitos fluviales donde los ríos dejaron su impronta.

El suelo de la región de bañados y costas de la Laguna Mar Chiquita es francamente salino, particularmente en áreas bajas, exhibiendo eflorescencias de sales, a veces de gran extensión, sobre todo en periodos secos. Son suelos pobremente drenados y de constitución en general areno - arcilloso con elevada cantidad de sodio intercambiable distribuido en el perfil.

El suelo en general es limo - arenoso con mayor permeabilidad cuando hay mayor pendiente, mientras que en las depresiones predomina la arcilla aunque no son raros aquí los lugares completamente arenosos. La parte oriental es algo salina y más húmeda que la occidental, con mayor salinidad en las cercanías del escalón (Bordo de Los Altos) (Rodríguez y otros, 2007).

Cobertura del Suelo

La cobertura del suelo influye de forma directa en la evapotranspiración como en la capacidad de infiltración del terreno por lo que es considerada en la determinación de la recarga. Los principales tipos de cobertura en la cuenca han sido obtenidos a partir del SIG (sistema de información geográfica) del IGN (www.ign.gob.ar). La variación mensual del follaje ha sido estimada a partir de imágenes satelitales y consideraciones agronómicas en los sectores productivos de la cuenca.

Consideraciones Hidrográficas

Con relación a las consideraciones hidrográficas se dispuso de la batimetría realizada en el año 1977 por el Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida, CIHRSA (1990),

mejorada y actualizada por Hillman (1999) y más recientemente por Plencovich (Plencovich et al., 2004).

La serie de niveles en la laguna se obtuvo compatibilizando las distintas fuentes de información tomadas en su mayoría del informe de la UNC-UNSE (2010). Los niveles fueron tomados sobre la costa Sur frente a la localidad de Miramar y provienen de diversas fuentes: Di.P.A.S, Centro de Zoología Aplicada, Destacamento de Guardaparques de la Reserva Natural de Mar Chiquita. Para los principales cauces de la cuenca se recopilieron las características hidrográficas necesarias en la determinación de su relación con el acuífero freático.

El aporte de cada río al sistema subterráneo modelado es considerado a través de su relación con la tasa de infiltración que se puede alcanzar, en virtud de las características de los materiales del lecho fluvial y de la carga hidráulica en el cauce. La carga hidráulica se encuentra directamente relacionada con la sección de cada cauce, sus pendientes y los caudales de escurrimiento. Estos valores fueron obtenidos a partir de datos mensuales registrados por distintos organismos en diversos puntos de interés.

Consistentemente con el resto de las variables previamente definidas se incorporaron los valores de los caudales medios mensuales (**Tabla 1**).

Tabla 1.- Parámetros para el cálculo de la infiltración desde ríos (Fuente: Elaboración propia)

MES/AÑO	RIO DULCE		RIO PRIMERO				RIO SEGUNDO	
	Los Quiroga	Ancho Medio (m)	Emb. San Roque	Ancho Medio (m)	Río Primero	Ancho Medio (m)	Río Segundo	Ancho Medio (m)
	salida (m ³ /s)	80 Tirante Medio (m)	erogados (m ³ /s)	25 Tirante Medio (m)	(m ³ /s)	30 Tirante Medio (m)	(m ³ /s)	25 Tirante Medio (m)
Oct-02	63.42	0.79	6.93	0.28	8	0.27	16.56	0.66
Nov-02	53.06	0.66	5.88	0.24	7	0.23	11.07	0.44
Dec-02	236.4	2.96	9.84	0.39	10.77	0.36	11.42	0.46
Jan-03	276.28	3.45	19.1	0.76	19.58	0.65	14.9	0.6
Feb-03	70.13	0.88	9.22	0.37	10.18	0.34	15.4	0.62
Mar-03	51.96	0.65	14.33	0.57	15.04	0.5	14.31	0.57
Apr-03	56.75	0.71	20.14	0.81	20.57	0.69	14.52	0.58
May-03	42.57	0.53	10.71	0.43	11.6	0.39	14.53	0.58
Jun-03	26.5	0.33	6.94	0.28	8.01	0.27	15.32	0.61
Jul-03	52.01	0.65	5.78	0.23	6.91	0.23	15.64	0.63
Aug-03	56.19	0.7	6.76	0.27	7.84	0.26	14.78	0.59
Sep-03	68.29	0.85	6.84	0.27	7.92	0.26	14.22	0.57

Balance Hidrológico

La cuantificación del ciclo hidrológico, puede ser representada por una ecuación de balance de masa a través de un volumen de control. Las simulaciones desarrolladas por distintos equipos de investigación, entre las que se destacan los modelos generados por la UNC a partir de 1998, consideran o sólo la laguna (LAMBDA y LAMBDA 2), o el sistema bañados - laguna y la interacción entre ambos elementos (LAMBDA 3) o se centran en la dinámica del cuerpo lagunar (RMA2, COHERENS). La inclusión de la variable hidrogeológica a escala regional, al ampliar las fronteras del modelo, dificulta los procesos de calibración y validación al incrementarse el número de datos hidrometeorológicos necesarios para este fin.

Las distintas versiones del modelo LAMBDA resultaron siempre mejoradoras de la versión anterior. En su estado actual, el modelo contempla los procesos de infiltración en un porcentaje definido pero no considera el flujo subterráneo.

Consideraciones Geológicas

Dado que el elemento geológico y el geomorfológico se encuentran entre los factores que ejercen mayor influencia en el comportamiento del agua subterránea, las características geológicas,

hidrogeológicas y el marco tectónico de la cuenca en consideración fueron analizadas exhaustivamente de forma regional y local. Esto permitió delimitar la extensión de los cuerpos de agua subterránea que integran el sistema, reconocer sus propiedades hidráulicas y así definir el modelo conceptual para su simulación numérica. Los afloramientos superficiales de las estribaciones de las sierras de Córdoba en la zona sur de Santiago del Estero y de las sierras de Guasayan en la zona norte, dividen de forma natural el universo de estudio en tres ambientes.

Dentro de la provincia de Tucumán el cuerpo de agua subterráneo ha sido denominado Subcuenca III (ver **Figura 4**). Ricardo Stappenbeck (1965) interpretó que la descarga del acuífero superior, ya sea a través de cursos efluentes o directamente en forma subterránea, desemboca al sistema del Salí-Dulce, por medio del embalse del río Hondo que sirve como nivel de base de casi todo el sistema.

Dentro de la provincia de Santiago del Estero diversos cuerpos de agua podrían presentar vinculaciones entre ellos, dependiendo del año hidrológico. En el tramo central (Subcuenca II- ver **Figura 4**) el acuífero aluvial del Río Dulce, se caracteriza por su elevado rendimiento y baja salinidad. Al Este sobre el Río Salado no se han alumbrado acuíferos profundos aptos, quedando los aprovechables restringidos al agua freática asociada a los paleocauces. En el límite Oeste, la cuenca abarca parte de la región denominada “Llanos Riojanos y Salinas”. Hacia el Sur, el Río Dulce se anastomosa evidenciando la resistencia de las unidades que atraviesa y los afloramientos relicíticos en el extremo Norte de las sierras pampeanas. Coincidentemente con la delimitación de Martín et al., 1997 para las cuencas hidrogeológicas de la provincia de Santiago del Estero, el límite que fijan los afloramientos de las sierras pampeanas coincide con las sierras de Sumampa y Ambargasta extendiéndose con dirección SO-NE. Al norte de este límite predominan los acuíferos en los paleocauces de los Ríos Dulce y Salado y hacia el Sur toma preponderancia la planicie loésica.

Por otro lado los altos contenidos de arsénico en esta zona no se corresponden con los observados en perforaciones más al sur. Esto prueba la baja dinámica hidrogeológica entre los cuerpos de agua en la zona central de Santiago del Estero y los del sector Sur de la misma provincia y norte de Córdoba.

La subcuenca inferior (Subcuenca I ver **Figura 4**), cubriría la zona centro y norte dentro de la provincia de Córdoba y la porción sur de Santiago del Estero. La cuenca subterránea dentro de la provincia de Córdoba se correspondería con los límites de la cuenca superficial. Consistentemente con lo expuesto por el C.A.A.A.S., el límite norte, impreciso aun, estaría dentro de la provincia de Santiago del Estero (C.A.A.A.S., 1975). Se tomará como frontera la línea con dirección SO-NE que parte de las sierras de Sumampa y Ambargasta, las que constituyen los afloramientos de las sierras pampeanas orientales. En profundidad se corresponde con el denominado alto Pampeano-Chaqueño. Al oeste se evidencian controles estructurales que han definido el aspecto geomorfológico regional, en que la falla Tostado- Selva marca el límite interprovincial Córdoba-Santa Fe y se extiende hasta el río Carcarañá y otra fractura que controla el curso del río Paraná (Iriondo, 1989). Este límite es conocido como Bordo de Los Altos.

El perfil geológico generalizado dentro de esta región es el siguiente: Basamento Cristalino, Paleozoico (Pérmico), Cretácico, Terciario y Cuartario (Schlagintweit, 1946).

Las formaciones predominantes y claramente diferenciadas son la formación Paraná, formación Puelches y formación Pampeana. El gráfico de la **Figura 1** resume las propiedades de las distintas formaciones y la **Figura 2** esquematiza sus materiales y su potencial hidrogeológico en un perfil general.

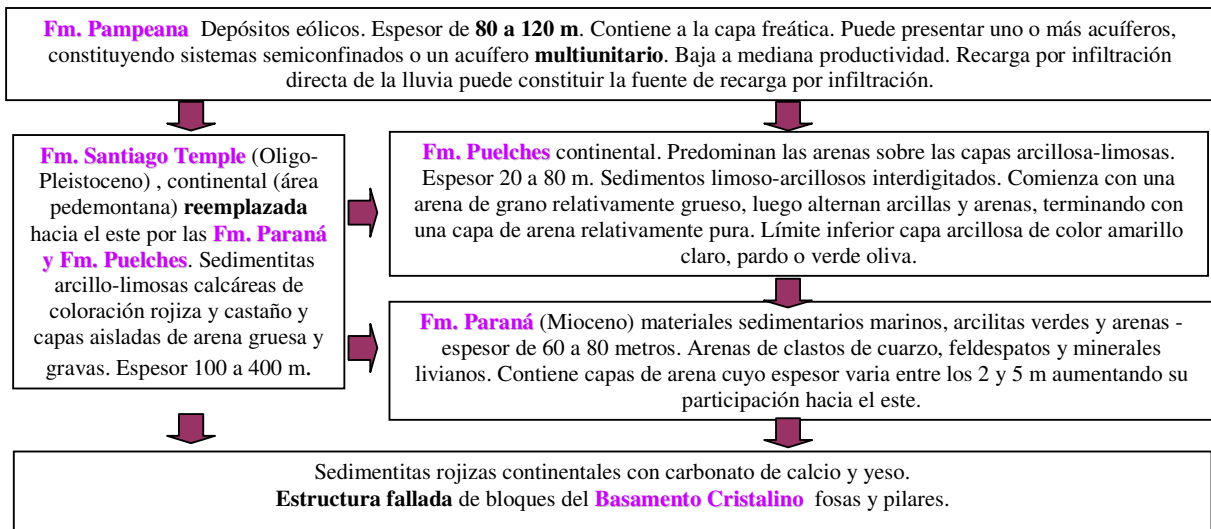


Figura 1.- Formaciones geológicas regionales (Fuente: Elaboración propia)

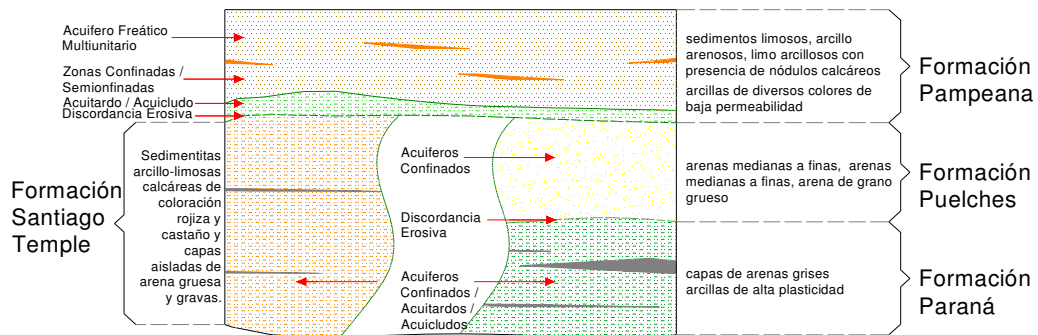


Figura 2.- Perfil hidrogeológico regional esquemático (Fuente: Elaboración propia)

Dada la importante significación que reviste la definición del tipo de frontera para el modelo hidrogeológico, la evolución de los dominios geomorfológicos en la zona de la laguna ayuda de forma contundente en esta definición. Las Redes potamográficas descritas por Castellanos (1959) permiten conocer la evolución de los movimientos morfogenéticos que dieron origen al endorreicismo de la cuenca en consideración (**Figura 3**).

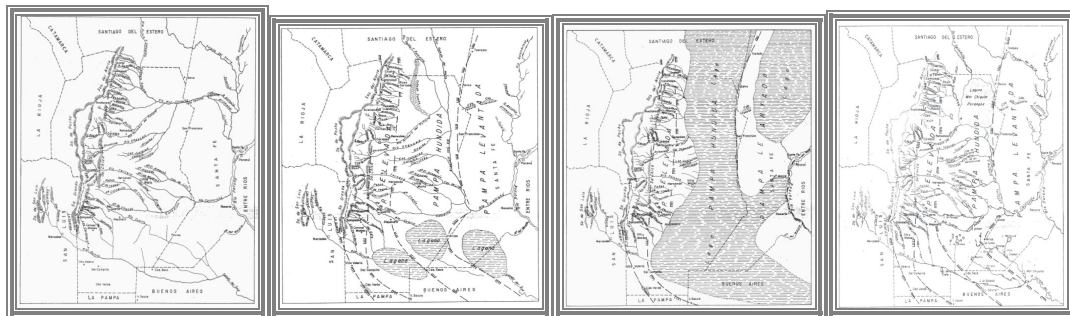


Figura 3.- Redes potamográficas. Etapa I (Belgranense). Etapa II (Bonaerense). Etapa III (Lujanense). Etapa IV (Platense). (Fuente: Castellanos, 1959)

Consideraciones Hidrogeológicas

En el límite oeste de la cuenca aflora el Basamento Cristalino, constituido principalmente por metamorfitas (gneis, anfibolitas, micacitas) y rocas graníticas. La alteración del basamento permite la acumulación de caudales generalmente de buena calidad, que pueden abastecer las

necesidades de viviendas y pequeños poblados. Sobre el mismo se asientan los distintos sedimentos que rellenan la cuenca y en muchas ocasiones sirve de reservorio para la acumulación de las aguas que se infiltran en los materiales permeables. Este complejo, con buzamiento suave al este, sirve de base impermeable para las aguas que circulan dentro de los sedimentos más recientes, que los cubren, al hundirse en la llanura (Vázquez y otros, 1979).

Es necesario tener en cuenta en el basamento de las sierras, la existencia de pequeñas cuencas, formadas por la acumulación de sedimentos modernos que rellenan depresiones y a veces forman importantes reservorios, alimentados por los ríos y arroyos locales (C.A.A.A.S., 1975).

En la mayor parte de la zona la profundidad del nivel de agua (freática) es uniforme, aproximadamente 10 m; sólo en el borde oriental y en las cercanías de la Laguna Mar Chiquita hay una zona con una profundidad menor a 5 m. Además, esta profundidad se mantiene en franjas angostas a lo largo de los ríos y paleocauces. A una distancia de aproximadamente 50 km del pie de la sierra, la profundidad del nivel de agua aumenta rápidamente en dirección al oeste, hasta un máximo de 100 m.

El gradiente de la superficie potencial en las cercanías de la sierra es alrededor de 0,5 % y en la mayor parte del área de 0,1 hasta el 0,25 %. Acercándose a la Laguna Mar Chiquita, el gradiente desciende a un 0,1 % hasta un valor de 0,05 %. En la zona más cercana a la sierra, coincidiendo aproximadamente con la unidad estructural de pie de monte, aún no está aclarada la situación hidráulica del agua subterránea en las capas de arena más profundas de la Formación Pampeana.

Según los estudios existentes realizados en la zona no existirían mantos completamente impermeables. El agua subterránea, que se encuentra muy cerca de la superficie en la formación Pampeana, es altamente salada con excepción de algunos puntos pequeños, y no es apropiada ni para el consumo humano ni para el ganado mayor. El sentido general del escurrimiento es O-E. Y a medida que el agua avanza hacia el Este, se va cargando de sales, aportadas por los terrenos que va atravesando.

Existen yacimientos limitados de agua subterránea dulce debajo de las depresiones a las cuales fluye el agua de precipitaciones. Esta condición se da especialmente en Aguadas y en los Bajos Rectos. Estos yacimientos resultaron ser lentes chatas, alargadas, con agua subterránea ligeramente mineralizada, que yacen sobre aguas subterráneas altamente salinizadas y que lateralmente también estaban rodeadas por aguas saladas. Se localizan exactamente por debajo de la parte más profunda de los Bajos Rectos. El ancho máximo de estas lentes alcanzó 200 m y su espesor máximo se estableció en 20m. Hacia el oeste, donde la pendiente del terreno en el Bajo se torna paulatinamente más pronunciada al acercarse al borde occidental de la Planicie Central, el espesor generalmente disminuye.

Las 39 perforaciones exploratorias de hasta 50 m máximo de profundidad, realizadas por el C.A.A.A.S. durante 1975, atravesaron una secuencia estratigráfica compuesta solamente de loess y loess aluvial, con muchos horizontes de paleosuelos superpuestos regularmente. En dicho estudio se encontró que en las estructuras diferentes en los sedimentos hallados, son de esperar permeabilidades distintas: el loess reciente es relativamente el más permeable, el loess aluvial es menos permeable y las formaciones de los paleosuelos arcillosos son muy poco permeables.

En mayor profundidad existe un acuífero, la formación Puelches, que es conocido en vastas regiones de Argentina Central como portador de agua aprovechable. La formación Puelches es un depósito de la zona de desembocadura de un río (depósito de delta), que aunque de espesor bastante regular se compone con capas de arena y limo. La intercomunicación hidráulica con otros acuíferos con agua más saladas puede provocar estratificaciones en la calidad del agua, difíciles de determinar en conjunto, pero que pueden ser perturbadas fácilmente por intervenciones artificiales (PICTOR, 2004).

La cota absoluta de estos acuíferos en la región próxima a la Laguna y bañados es menor que la cota de fondo de la Laguna. Si bien sobre esto tampoco existen estudios regionales que lo confirmen, hay observaciones puntuales que así lo indican.

En el cuerpo de agua inferior, el agua subterránea que fluye de occidente hacia la laguna Mar Chiquita se infiltra cerca de la sierra y ofrece posibilidades de aprovechamiento a causa de su buena calidad, en regiones donde el agua subterránea del cuerpo superior no es aprovechable.

Este sistema de acuíferos confinados tiene niveles estáticos altos, que generalmente están próximos a los niveles medios de la capa freática. Es decir que las perforaciones que ponen en explotación estos acuíferos son pozos semi-surgentes.

No existe ningún hecho que indique que el sistema de acuíferos profundos pueda interactuar con los bañados del Río Dulce y la Laguna de Mar Chiquita. En este sentido, lo único observado son unas pocas perforaciones abandonadas que pusieron en explotación acuíferos con surgencia espontánea, y que actualmente aportan caudales muy pequeños a nullos a la Laguna (PICTOR, 2004).

MODELO CONCEPTUAL

Como paso previo a la generación del modelo computacional en Visual Modflow fue necesario aunar y homogeneizar la información recabada. Seguidamente se detallan los ítems más significativos en la generación del modelo conceptual. Como parte del mismo se definieron los límites de simulación, el paso de tiempo, las condiciones iniciales y de contorno, se identificaron las posibles zonas de recarga, el perfil estratigráfico simplificado y los parámetros que caracterizan a cada zona.

Límites de Simulación:

El modelo cubre en profundidad (eje z) el comportamiento del Acuífero libre que integra un basto número de unidades interconectadas (multiunitario). La definición de la extensión territorial que alcanza el acuífero libre a lo largo de los ejes X e Y cubre la denominada Subcuenca I según los condicionantes geomorfológicos previamente descriptos.

Escala:

El tamaño de la zona que integra el modelo conceptual implica tratar con una macroescala (mayor a 1000 Km², según Segerer, 2006). En esta escala se pierden los detalles de las variaciones del terreno y de buena parte de los restantes parámetros intervinientes. El objetivo fundamental de los modelos a esta escala es el de servir de nexo entre las mediciones locales, representativas para superficies relativamente pequeñas con las escalas de las cuencas de los grandes ríos y cuerpos de agua (Segerer, 2006). Se agrupan en zonas de relativa homogeneidad los parámetros referentes al relieve, al suelo, al uso de la tierra, la vegetación, las secciones y pendientes de los cauces, los fenómenos meteorológicos de incidencia, etc.

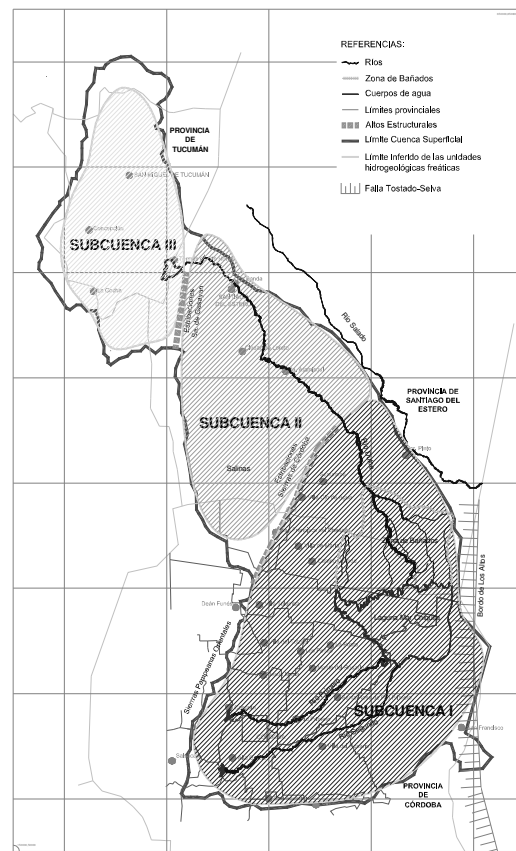


Figura 4.- Subcuencas subterráneas (freáticas) inferidas bajo la cuenca superficial a la Laguna Mar Chiquita

Recarga:

La valoración del proceso de recarga requiere identificar los mecanismos a través de los cuales la misma tiene lugar, así como el tipo y distribución espacial de las diferentes fuentes de agua que intervienen en cada evento de recarga (Custodio, 1997-a).

La recarga por precipitación se estimó mediante la metodología de Schosinsky, discretizando el sector de estudio en zonas de características homologas (**Figura 5**). Esta metodología considera las siguientes variables: precipitación mensual, retención en follaje, capacidad de infiltración de los suelos y sus características, cobertura vegetal, profundidad de raíces, evapotranspiración real, uso del suelo y pendiente del terreno.

En las zonas no incluidas en estas regiones se considera que:

- La precipitación aporta mayormente a los cursos superficiales desde los cuales se produce el proceso de recarga en su recorrido hacia la laguna.
- La precipitación en la zona serrana (oeste) recargará los acuíferos de la formación Santiago Temple y Puelches. Hacia el este se manifiesta la presencia de la capa de arcilla que limita la formación pampeana de sus inferiores.

La **Figura 5** presentan los valores obtenidos para dos de estos sectores.

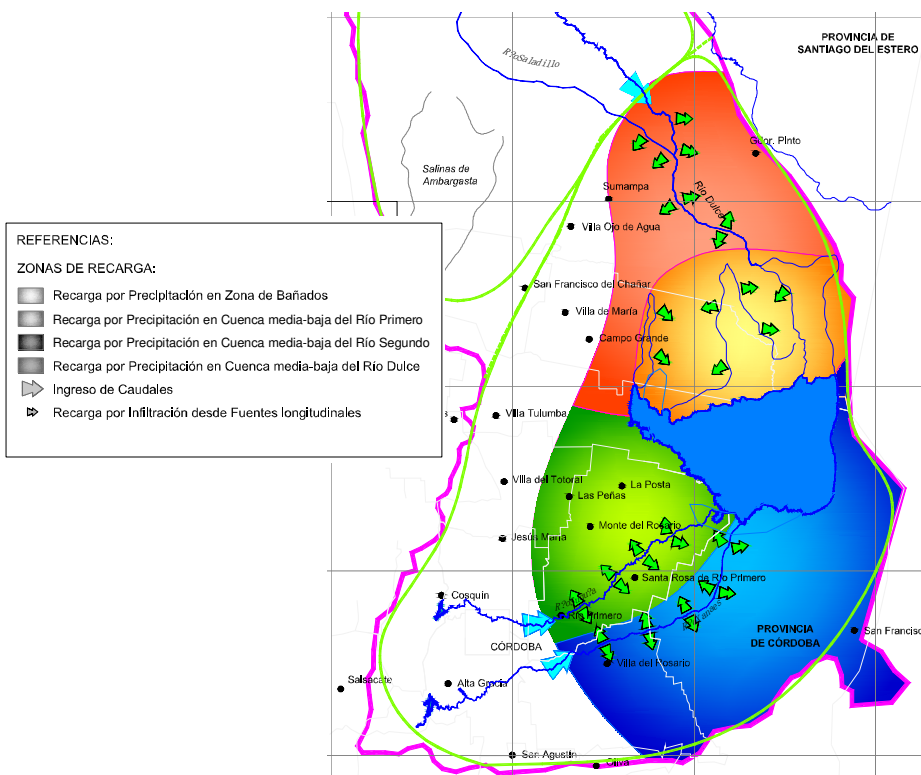
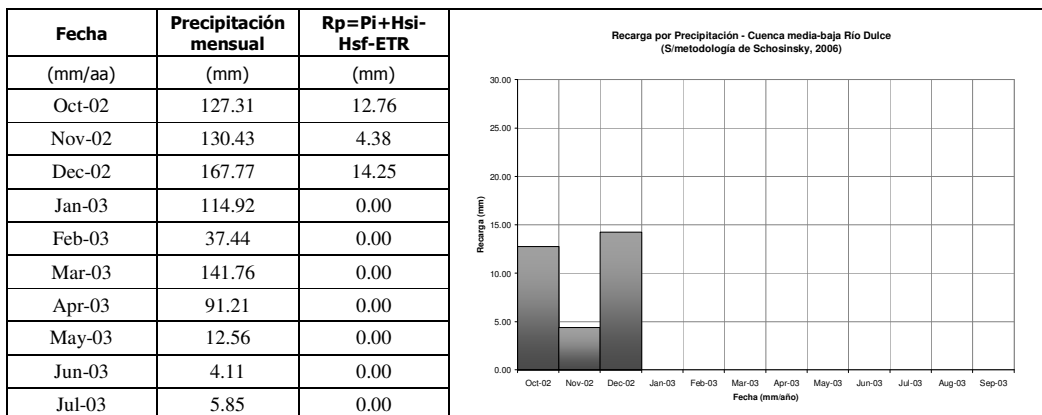


Figura 5.- Zonas de recarga propuestas



Aug-03	13.81	0.00
Sep-03	8.20	0.00

Figura 6.- Valores de Recarga potencial sector de la Cuenca media-baja del Río Dulce Según Cálculo.

El modelo en desarrollo considera como elementos de infiltración longitudinales los ríos Primero, Segundo, Dulce y la propia laguna. Los demás cursos presentes en la zona de estudio poseen cauces y caudales menores por lo que sus posibles infiltraciones son despreciadas y se consideran de forma distribuida en la infiltración por precipitación.

La cuantificación de la tasa de infiltración para los ríos en consideración no es simple y los parámetros que se emplearán en su cálculo son estimaciones de valores sugeridos para ríos y arroyos de características similares.

Parámetros:

Los valores de cada parámetro para las distintas zonas en que se divide el acuífero a modelar son estimados en función de las recomendaciones de diversos autores, estudios previos o inferidos a partir de las perforaciones existentes donde se realiza bombeo. El rango de valores para cada parámetro se presenta en la **Tabla 2**.

Tabla 2.- Formaciones hidrogeológicas regionales (Fuente: Síntesis de autores varios)

Materiales	Porcentaje de Porosidad (%)	Rendimiento específico (%)	Conductividad Saturada (m/d)
Depósitos fluviales en paleocauces y depósitos granulares	20 - 30	15 - 32	1 a 10
Sedimentos Continentales (Mayormente suelo loésico)	50 - 60	3 - 19	0.1 a 1
Depósitos fluviales en zona de Bañados	35 - 45	10 - 28	0.4 a 4
Materiales fracturados	2 - 10		7
Arcillas del acuícludo base de la Fm. Pampeana	50 - 60	2 - 5	10^{-8} - 10^{-2}

Niveles Hidráulicos

Para una representación espacial de los niveles estáticos se debe contar con observaciones bien distribuidas a lo largo de la superficie de estudio. La ausencia en la cuenca de una red de observación impide llevar un seguimiento del comportamiento del acuífero.

Se cuenta entre los antecedentes recopilados, con la información de un freatómetro instalado en el año 2005 por la UNC en el instituto IPEM 44 en la localidad de Miramar (Hillman, 2003), los datos transcritos del informe de Pflüger, (2007), las perforaciones empadronadas en la ExDIPAS y los registros de la Secretaría de Minería de la Nación.

Haciendo uso del MDE se determinó el rango de variación del nivel estático en cota IGM, con lo que se determinaron las fluctuaciones de la capa freática entre los años 1971-1998, como así también la dirección del flujo subterráneo.

Estrategia de Calibración – Balance:

El objetivo de las primeras simulaciones es lograr el balance entre los ingresos (precipitación e infiltración desde ríos, principalmente), el volumen almacenado y los egresos (percolación, evapotranspiración) considerados en el modelo para un periodo de tiempo para el cual se dispone de suficiente información, a la vez que el nivel freático varía entre los valores medidos o estimados en cada perforación.

El modelo de balance propuesto se presenta en la **referencia.7** donde se incluyeron factores que deben ser nulos o indeterminados en virtud de las consideraciones hechas en la formulación del presente modelo conceptual.

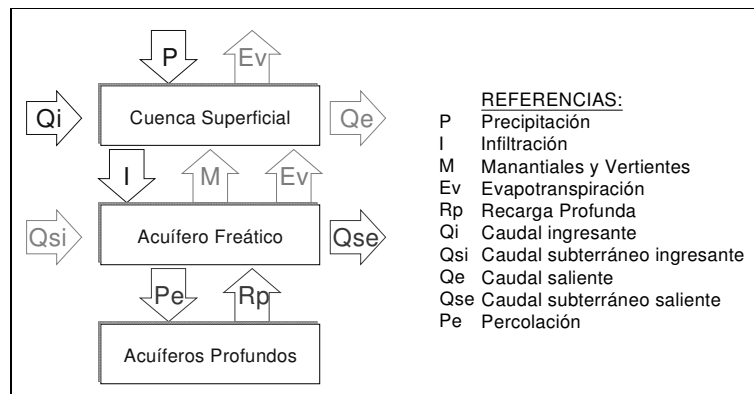


Figura 7.- Zonas de recarga propuestas

Selección del Modelo Computacional

El modelo computacional que se utiliza para idealizar el sistema físico debe cubrir entre otras las siguientes exigencias las dimensiones a ser simuladas para este caso 3-D, el régimen debe ser transitorio debe poder simular el flujo en un acuífero libre y permitir suficiente versatilidad para el manejo de grandes bases de datos y su post procesamiento.

En base a estos puntos junto a consideraciones particulares del sistema se optó por la utilización del software MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) en su versión comercial VISUAL-MODFLOW 2010 (Schlumberger Water Services). Este modelo para aguas subterráneas se encuadra dentro de los estándares para modelaciones hidrogeológicas por su amplia difusión, reconocida aceptación y versatilidad en la representación de diversos escenarios.

MODELO NUMÉRICO

En base a la idealización planteada en el modelo conceptual, se procedió a la generación del modelo computacional propiamente dicho. Las dimensiones de la cuadrícula fueron definidas en cada una en función de la precisión requerida, de la extensión total del modelo y de las restricciones computacionales que impone el mismo.

Para delimitar el acuífero, como así también los cauces, zonas inactivas, perforaciones y condiciones de frontera entre otros puntos de interés se emplearon mapas de la zona generados a partir de los MDE elaborados. De esta forma cada hito se encuentra perfectamente referenciado geoespacialmente. Para incorporar la tercera dimensión al modelo se definió la elevación de cada capa en base al MDE, a los datos obtenidos de las perforaciones y a las inferencias geológicas y geomorfológicas. El régimen temporal es transitorio. El sistema de coordenadas empleado es UTM y las unidades en que se trabaja son homogéneas, metros y días.

Seguidamente se procedió a definir los siguientes ítems: Espacio de simulación - Celdas inactivas - Propiedades de cada estrato en cada celda (Conductividad Hidráulica y Coeficiente de Almacenamiento) - Niveles hidráulicos iniciales - Condiciones de frontera (Ríos, arroyos, Zonas de carga determinada, Zonas de flujo determinado).

En primer lugar se indican las unidades a usar en el modelo de simulación para luego definir el dominio del sistema de acuíferos que integran la cuenca y la discretización espacial tanto en planta como a lo largo del eje vertical.

El modelo de flujo sólo simula el comportamiento del Acuífero libre como fue descrito en el desarrollo del modelo conceptual. El paquete sedimentario simulado se ubica dentro de la formación Pampeana, donde se definieron cuatro estratos con el solo fin de representar las variaciones de permeabilidad de los depósitos fluviales, lacustres y determinadas particularidades geológicas, sin que esto implique un funcionamiento hidrogeológico disociado.

Se generó un plano base (en formato *.dxf) con la delimitación de las distintas unidades propuestas, zonas de recarga, ríos y condiciones de contorno para su posterior asignación a cada celda. La **Tabla 3** indica la geometría y límites de simulación propuestos para el modelo.

Tabla 3.- Geometría y límites de simulación (Fuente: Elaboración propia)

GRILLA	(Coordenadas UTM-Zona20-WGS84)	
(X ₁ ,Y ₁) Límite inferior izquierdo	X ₁	300000
	Y ₁	6440000
(X ₂ ,Y ₂) Límite superior derecho	X ₂	615000
	Y ₂	6830000
Delta X (Ancho, m)	315000	
Delta Y (Largo, m)	390000	
Delta Z (Máxima diferencia, m)	2670	
Ancho de Celdas (m)	630	
Largo de Celdas (m)	780	
N° de Columnas:	500	
N° de Filas:	500	
Total de celdas por capa	250000	

Con fines ilustrativos la **Figura 8** presenta la zonificación empleada en la asignación de las propiedades hidrogeológicas (K y S) para el primer y segundo estrato y las condiciones iniciales para el nivel del acuífero freático discretizado en franjas de igual diferencia piezométrica..

Para fijar las condiciones iniciales se generó una superficie tridimensional del nivel freático en base a la información disponible. Esta superficie fue importada en el modelo como condición inicial y ajustada tras sucesivas corridas para obtener una mejor aproximación de la situación inicial.

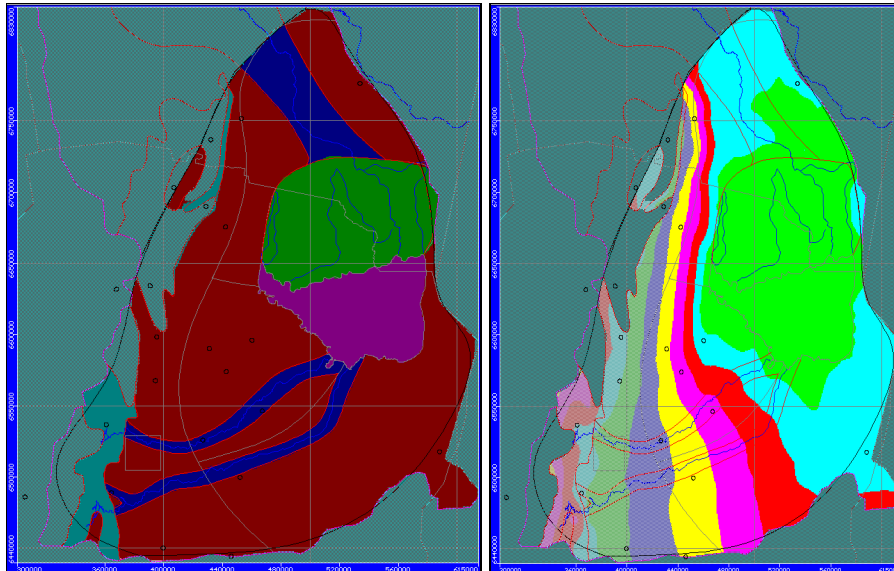


Figura 8.- Zonificación de las propiedades hidrogeológicas (K y S) en el primer y segundo estrato – Condiciones Iniciales

Las condiciones de contorno en los límites de la zona de estudio fueron uno de los factores cuya incidencia se valoró mediante distintas hipótesis.

Hipótesis A: Se consideró que no existe flujo a través del perímetro de la cuenca.

Hipótesis B: Consistió en imponer una frontera del tipo GHB en la zona noreste que separa la cuenca del cauce del río Salado. La morfología de esta frontera se adapta de forma precisa a

dicha idealización, en la que un cauce ubicado a una distancia constante del límite modelado interactúa aportando o insumiendo caudal al acuífero freático.

Hipótesis C: Se liberó la restricción de la ausencia de flujo en el sector sureste de la laguna. Por no disponerse de registros del nivel freático en una extensión significativa fuera del límite de la cuenca, se utilizó un valor de profundidad promedio con una frontera del mismo tipo que la empleada al noreste.

El nivel en el cuerpo de la laguna por encontrarse medido en el período de simulación, se consideró como una frontera de carga fija de variación mensual. De esta forma, el programa, integra el caudal que aporta o insume la laguna a lo largo de todo su perímetro.

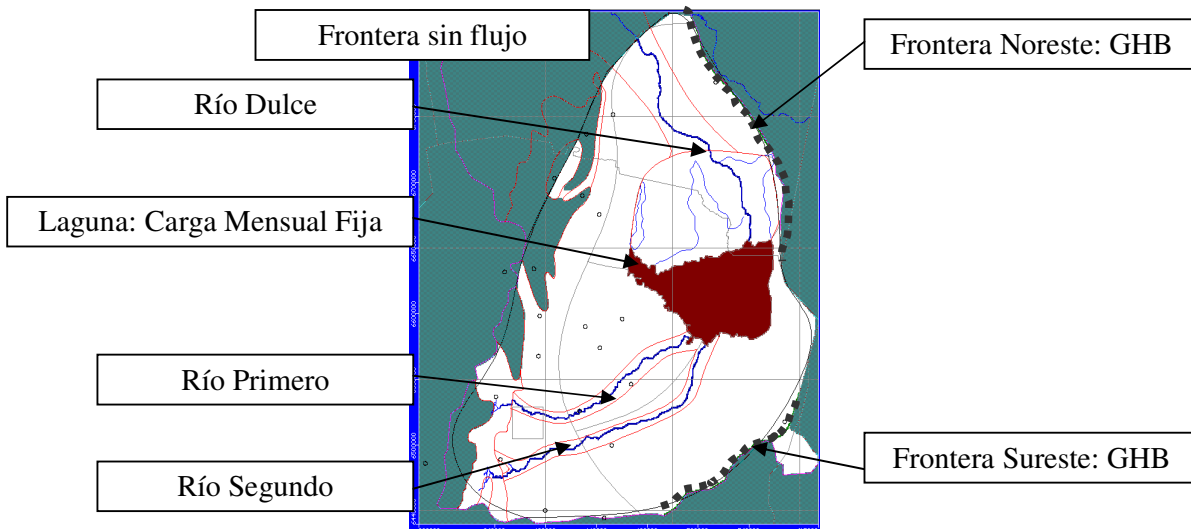


Figura 9.- Condiciones de frontera simuladas

Calibración

El proceso de calibración fue iterativo y consistió en lograr el balance entre los ingresos, la variación del almacenamiento en el suelo que se manifiesta en los cambios que sufre la freática y los egresos para cada hipótesis. Los parámetros de calibración utilizados para alcanzar el ajuste entre los valores de carga hidráulica observados (o considerados de acuerdo a las condiciones superficiales del flujo) y simulados fueron la conductividad hidráulica y el almacenamiento específico en las distintas zonas representadas.

Los parámetros calculados son coherentes con el modelo conceptual propuesto y con las estimaciones previas. Los valores de conductividad hidráulica estimados inicialmente no difieren de forma sustancial de los que surgen de la calibración; están dentro del mismo orden de magnitud y mantienen la misma relación de anisotropía.

En base a la historia geológica de la cuenca se puede considerar que la discordancia en la frontera este, constituida por el Bordo de los Altos puede presentar diferencias significativas de nivel en profundidad. En virtud de este supuesto el nivel del acuífero freático dentro de la cuenca presentará en periodos ricos la suficiente carga hidráulica para movilizar el flujo a través de esta frontera mientras que en momentos de déficit podrá ocurrir la situación inversa. Por este motivo se adopta el modelo con las fronteras de tipo C.

Resultados

Seguidamente se presentan los resultados obtenidos del modelo tras la calibración, cuyo ajuste puede ser considerado como aceptable y responde satisfactoriamente a los objetivos propuestos. A continuación se presentan los parámetros y métodos con que se alcanzó la convergencia

Tabla 4.- Parámetros ajustados y métodos empleados (Fuente: Elaboración propia)

<i>Conductividad</i>	Kx	Ky	Kz
	(m/s)	(m/s)	(m/s)
Cauces	0.0001	0.0001	0.0001
Bañados	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-06
Materiales fracturados	8.00E-05	8.00E-05	8.00E-05
Loess	1.50E-05	1.50E-05	1.84E-05
Laguna	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
<i>Condiciones de Contorno</i>	Frontera noreste GHB (con el Río Salado)		
	Frontera sureste GHB (Con la freática)		
	Laguna CH (Oct-2002-Set-2003)		
<i>Rehumedecimiento de celdas secas</i>	Activo		
Umbral de humedecimiento	0.5		
Intervalo de humedecimiento (IWETIT)	6		
Método de humedecimiento	Desde los lados y desde abajo		WETDRY>0
Carga de humedecimiento	A partir del umbral		IHDWET > 0
Factor de humedecimiento (WETFCT)	1		
Carga en celdas secas	-1E+30		
LAYER N°1 TYPE	No confinado		1
LAYER N°2 TYPE	Confinado / No confinado var S y T		3
LAYER N°3 TYPE	Confinado / No confinado var S y T		3
LAYER N°4 TYPE	Confinado / No confinado var S y T		3
<i>Property Package</i>	LPF		
<i>Tipo de Corrida</i>	Transitoria		
<i>Solver</i>	MODFLOW2000		
	WHS (BiCGSTAB-P Matrix Solver)		
Max. outer iterations (MXITER)	500		
Max. inner iterations (ITER1)	200		
Head change criterio (HCLOSE)	0.025		
Redisdual criterion (RCLOSE)	0.025		
Damping factor (DAMP)	1		
Realtive residual criterion (RSCRIT)	0		
Factorization level	level 0		

En relación al balance de entradas y salidas del modelo, se observa bajo esta hipótesis, que el mayor intercambio de caudales ocurre principalmente a través de los cauces que desembocan en la laguna o pasan a engrosar el volumen de almacenamiento del acuífero. El caudal que se intercambia a través de las fronteras es mínimo y la laguna actúa devolviendo al freático un caudal aproximado de 3 m³/s. Valor que se constató bajo distintas hipótesis. Los modelos Lambda (UNC) ratifican que los valores de caudales subterráneos que interactúan con la laguna son pequeños encontrándose dentro del orden de magnitud de los valores hallados.

La figura siguiente contiene las equipotenciales calculadas por el programa para la instancia final de la simulación (t=365 días). Se puede observar que el flujo subterráneo está influenciado por los lineamientos estructurales y por las recargas. Asimismo, las líneas de corriente en el sector este de la cuenca muestra comportamientos poco definidos.

Las distintas tonalidades en los vectores sobre las líneas de flujo indican si las mismas lo hacen dentro de un mismo estrato, de un estrato superior a uno inferior o viceversa.

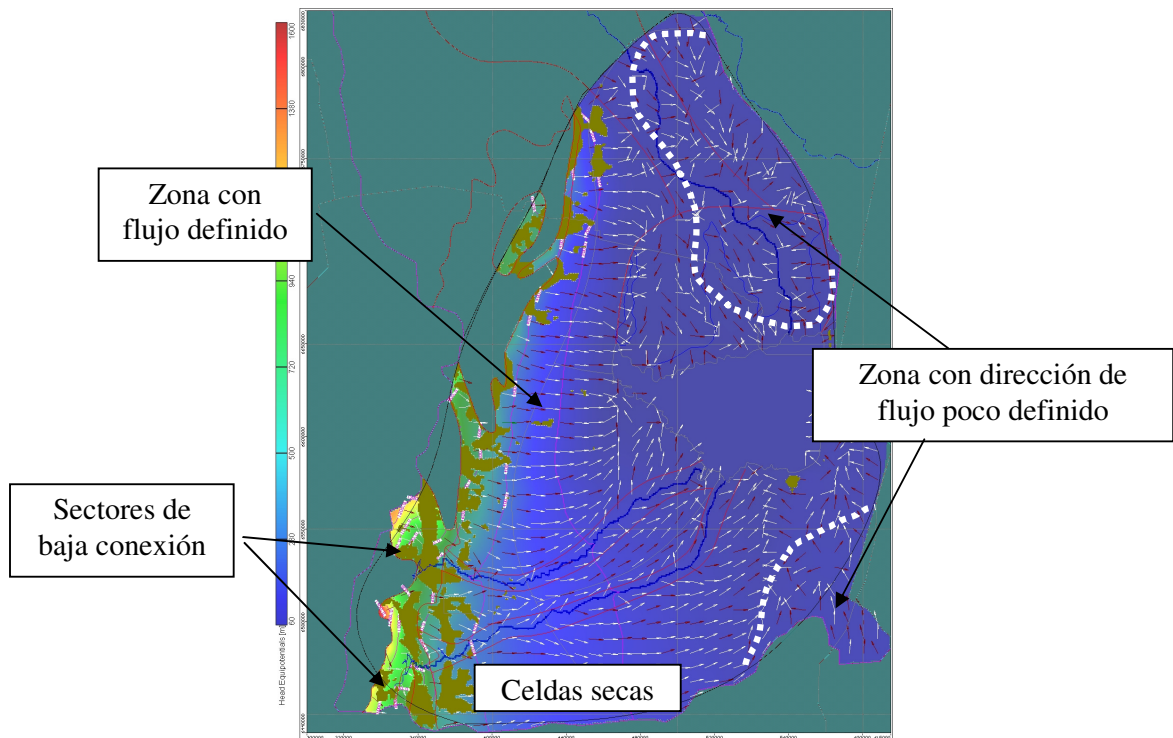


Figura 10.- Condiciones de frontera simuladas

CONCLUSIONES

En función de los resultados del modelo se extrajeron conclusiones que seguidamente se transcriben:

- Los resultados del modelo numérico, que representa la conceptualización dada al sistema son cualitativamente aceptables en virtud de la información de base disponible.
- La laguna aporta mayormente a la freática (al menos para el periodo simulado), representando las aguas infiltradas una pérdida en el modelo de balance superficial. Los modelos Lambda ratifican el hecho de que el aporte subterráneo es pequeño encontrándose dentro de los límites de la precisión de los métodos de cálculo. En términos generales la laguna recibe los caudales de aporte de forma superficial e infiltra hacia el freático. La interacción con el acuífero freático (aporte desde el mismo) solo se da ante variaciones significativas de nivel en cortos períodos de tiempo.
- La baja dinámica, hace que pueda analizarse el funcionamiento acuífero de forma cuasiestacionaria. El sistema no es sensible a los eventos climáticos extremos y las variaciones estacionales anuales ven amortiguada y diferida su respuesta.
- El aporte por recarga de precipitación es mas significativo pero su efecto es mas localizado evidenciándose la existencia de zonas de baja dinámica compatibles con las descritas por el C.A.A.A.S. (1975) como cuerpos lenticulares de agua dulce que se desarrollan entre los principales cauces.
- Se comprobó la baja incidencia en el balance del flujo a través de las fronteras, lo que a pesar de ser de baja incidencia en términos relativos puede significar un importante factor para localidades vecinas.
- Esta modelación no incorpora los acuíferos confinados y semiconfinados que se encuentran dentro de la formación Puelches.
- El flujo subterráneo errante y lento en la zona norte de la laguna es consistente con la dinámica subterránea esperada en sectores de bañados y esteros

- Las numerosas corridas mostraron gran sensibilidad a la condición inicial empleada en la modelación lo que implica una imperiosa necesidad de incrementar el número de registros en perforaciones dentro del universo simulado.

Recomendaciones:

- Construcción y operación de una **red de monitoreo hidrogeológico**. Con este fin deberán distribuirse los elementos de medición de forma racional en la superficie de la cuenca, de tal modo que sus mediciones ayuden a determinar de forma inequívoca y representativa de vastos sectores, las direcciones del flujo, la variación del gradiente y sirvan al discernimiento de las condiciones de contorno supuestas.
- En lo referente a información hidrogeológica se considera conveniente la creación de un **banco** con datos de: perforaciones (coordenadas geográficas, perfiles, caudales, uso, niveles, composición del agua, rendimientos, etc.); clima (precipitación, temperatura, humedad, viento, insolación, radiación, etc.); geología (informes, mapas, perfiles); geomorfología (geoformas); hidrología superficial (caudales y derrames de los ríos y arroyos y alturas de las lagunas); edafología (tipos y distribución de los suelos); riego (volúmenes aplicados, origen del agua, pérdidas); piezometría (niveles de agua subterránea referidos al sistemas georreferenciados y su evolución en el espacio y en el tiempo); uso del agua (consumo humano, riego, ganadero, industrial).
- Avanzar sobre **políticas y estrategias** para el manejo del agua subterránea fijando pautas sobre la protección natural de los acuíferos y los criterios más adecuados para el manejo sustentable del recurso.
- Valorar en ambos sistemas la vulnerabilidad del acuífero estudiado mediante las metodologías existentes (DRASTIC, GODS, AVI, etc...). Es necesario evitar el manejo incorrecto de las aguas subterráneas y el conocimiento de los sectores con mayor vulnerabilidad ayuda a fijar normas y medidas de conservación.

Posteriores procesos de ajuste y calibración sobre el modelo desarrollado, permitirán su utilización por parte de las autoridades de aplicación en materia de recursos hídricos, para simular planes de acción propuestos, permitiendo mejorar su gestión.

REFERENCIAS

C.A.A.A.S. (Convenio Argentino Alemán de Agua Subterránea) (1975). “Recursos de Agua Subterránea y su Aprovechamiento en la Llanura Pampeana y en el Valle del Conlara”. *Tomos I y II*. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (Bs. As., Argentina) e Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (Hannover, R. F. de Alemania).

CIHRSA (1990). “Estudio del régimen Hidrológico del río Dulce y Laguna de Mar Chiquita”. *Centro de Inv. Hídricas de la Región Semiárida*, INCYTH CONICET.

Custodio G. E. (1997-a). “Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre”. En: Custodio, E; Llamas, M.R. y Samper, J. (ed). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica. Asociación Internacional de Hidrogeólogos*. Grupo Español. Las Palmas de Gran Canaria.

Ferral A.; Zappino R.; Alaniz E. y Chesniuk S. (2007). “Evaluación Hidrogeológica - Diagnóstico Ambiental de Las Aguas Subterráneas de la Ciudad de Córdoba”. *V Congreso Argentino de Hidrogeología*. 16 al 19 de octubre de 2007 Paraná, Argentina.

Hillman, G. (1999). “Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Laguna de Mar Chiquita”, *Tesis de Grado Carrera de Ingeniería Civil*. FCEFyN, UNC. Córdoba, Argentina.

Hillman, G. (2003). “Análisis y simulación hidrológica del sistema de Mar Chiquita”. *Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería*. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

- Iriondo, M.** (1983). “Geomorfología de la cuenca inferior del río Salado como base para la Investigación hidrológica”. *Coloquio Internac. Hidrol. Grandes Llanuras*. CONAPHI, Olavarría.
- Martin, A. P.; Storniolo, A.; Castellano, J. A.; Bejarano, R.; Schejtman, W.** (1997). “Carta Hidrológica de la Provincia de Santiago del Estero”. *I Congreso Nacional de Hidrogeología, III Seminario Hispano Argentino sobre temas actuales de hidrología subterránea*. Pp. 117-131.
- Mc Donald, M.G., y Harbaugh, A.W.** (1988). “A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model”. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, Book 6.
- Pflüger J. C.** (2007). “El agua potable en la República Argentina - Diagnóstico de fuentes de agua en algunas localidades”. *Informe para el ENOHS*. Derecho de Autor 551104. Hecha la reserva que marca la Ley 11723. jcp/22/03/07.
- PICTOR** (2004). Programa: "Bases para la gestión de los recursos hídricos del NE de la Pcia de Cba. - tema 4 de la convocatoria PICTOR2 2004". Grupo compuesto por UNC, UCC, CEPROCOR e IUA.
- Plencovich, G.** (2010). “Simulación Hidrológica de los humedales de Mar Chiquita con apoyo satelital”. *Tesis de Maestría en ciencias de la Ingeniería – Mención en Recursos Hídricos*. UNC. Córdoba.
- Rocca R. J., Redolfi E. R. y Terzariol R. E.** (2005). “Características Geotécnicas de los Loess de Argentina”. *Rev. Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2). Artículo recibido el 29 de agosto de 2005, y aceptado el 6 de febrero de 2006.
- Rodríguez, A. y otros** (2007). “Estudio Hidrológico – Ambiental Del Sistema Mar Chiquita - Bañados y Tramo Inferior Del Río Dulce”. *Informe Final UNC-UNSE a SSRH*.
- Schlagintweit, O.** (1946). “El Subsuelo de la Llanura Cordobesa en Base a la Perforación S.T.1, con Referencia al Gondwana”. *Dirección Prov. de Minería de Córdoba*. Pub. N° 10. Argentina.
- Segeer C. D. y Villodas R.** (2006). "Unidad 2: El Ciclo Hidrológico. Sistemas y Modelos" . *HIDROLOGIA I, Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo*
- SSS- USDA** (1975). *Soil Taxonomy*
- Stappenbeck, R.** (1965). “Geología y Aguas subterráneas de la Pampa. Argentina”.
- Thorntwaite, C. W.** (1948). "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical Review* 38 (1): 55–94. doi:10.2307/210739