

Modelación del flujo subterráneo en la cuenca Matanza-Riachuelo, Provincia de Buenos Aires.

3. Modelo numérico de flujo.

Luis Vives¹, Carlos Sciolí², Christian Mancino¹ y Sandra Martínez³

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul), República de Italia 780, (B7300) Azul, Buenos Aires, Argentina.

² Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

³ Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR). Buenos Aires, Argentina.

Mail de contacto: lives@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN

En el marco de las acciones del Plan Integral de Saneamiento de la cuenca Matanza Riachuelo, se desarrolló una primera versión del modelo numérico de flujo de agua subterránea. En una serie de tres artículos se presentan los trabajos realizados; en este artículo se presentan los modelos conceptual y numérico. El modelo numérico obtenido reproduce satisfactoriamente los niveles piezométricos observados y los gradientes hidráulicos simulados resultan en general similares a los medidos. Los valores de conductividad hidráulica calibradas o calculadas están en el orden de magnitud de los estimados, con excepción de zonas donde los valores resultan mayores aparentemente debido a una pobre definición de la geología local. El balance de masas es adecuado y los caudales calculados en los cursos superficiales son coherentes con los valores observados. Se concluye presentando las incertidumbres del modelo conceptual y numérico, y los logros alcanzados.

Palabras clave: Matanza-Riachuelo, modelo conceptual, modelación numérica de flujo, transitorio.

ABSTRACT

As part of the actions of the Integrated Sanitation Plan for the Matanza Riachuelo basin, a first version of the numerical model of groundwater flow was developed. A series of three articles presents the work undertaken; in this article the conceptual and numerical models are presented. The numerical model successfully reproduces the observed levels; in general, simulated hydraulic gradients match measured ones. Calibrated/calculated hydraulic conductivities are within the same order of magnitude as those measured, except at some areas that are seemingly greater probably due to a poor definition of the local geology. The mass balance is sounded and flow rates calculated in streams are consistent with observed measurements. The article ends with the presentation of the conceptual and numerical model uncertainties.

Keywords: Matanza-Riachuelo, conceptual model, numerical flow modeling, transient.

Introducción

El agua subterránea en el área de la Cuenca Matanza Riachuelo (CMR), ha sido uno de los sistemas más afectados por el crecimiento. En el marco del Plan Integral de Saneamiento Ambiental de la cuenca, el programa para agua subterránea involucra entre otras acciones, el desarrollo de un modelo de flujo como herramienta para evaluar las medidas implementadas, determinar el impacto en los sistemas y asistir en la modelación integrada del área de la cuenca.

Un modelo hidrológico previo utilizando el software MIKE SHE fue realizado por INA (2010), integrando el flujo subterráneo a otros aspectos de la hidrología de la cuenca. A partir

de la información antecedente, información generada por la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) e información obtenida de nuevos procesamientos, parte de las cuales se presentan en esta serie de trabajos: Geometría del subsuelo (Mancino et al., en este volumen) y Cálculo de la recarga natural y antrópica (Sciolí et al., en este volumen), se desarrolló este modelo de simulación de flujo subterráneo como base para futuros desarrollos (Vives et al., 2012).

La CMR se localiza al este de Argentina y al NE de la provincia de Buenos Aires, abarcando varios partidos de la misma y parte de Capital Federal (Figura 1). La cuenca presenta una superficie de 2.065 km² con un desnivel máximo

del relieve del terreno de 30 m y una longitud y ancho máximo de 72 y 42 km, respectivamente. La zona presenta pendientes muy bajas, conformando un paisaje de llanura típico.

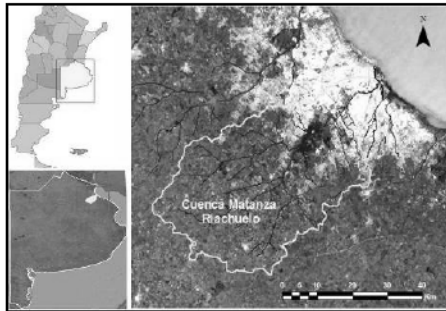


Figura 1. Cuenca Matanza Riachuelo (CMR).

Metodología

Para la modelación de la CMR se siguieron los clásicos pasos de cualquier ejercicio de modelación de flujo de agua subterránea comenzando con la definición del modelo conceptual de funcionamiento del sistema. Para obtener este modelo se construyó la geometría del subsuelo mediante la recopilación y análisis de datos básicos de perforaciones (Mancino et al., en este volumen) y se identificaron los elementos que condicionan el movimiento del flujo (recargas y descargas).

En el cálculo de la recarga se tuvo en cuenta la evolución espacio – temporal de la transformación de la zona rural en urbana, adaptando una formulación matemática de Bocanegra (2010) para evaluar la recarga urbana teniendo en cuenta componentes de origen natural y antrópico (Scioli et al., en este volumen). Esta formulación incluye las pérdidas de las redes de agua, saneamiento y conductos pluviales, la recarga por excesos, escurrimiento superficial y acumulación, y las filtraciones de pozos sépticos. La variabilidad espacial de la cobertura sanitaria se implementó en función de la cobertura de servicios de agua y cloacas.

Posteriormente se definió la estructura del modelo numérico y se estableció la estrategia de calibración de los parámetros para obtener el mejor ajuste de los niveles observados.

Modelo numérico empleado

La modelación se realizó con el código TRANSIN (Medina and Carrera, 1996), que permite simular el flujo del agua subterránea y el

transporte de solutos a través de la interfaz gráfica VISUAL TRANSIN. El programa resuelve las ecuaciones diferenciales por el Método de Elementos Finitos. El código permite realizar la calibración de los parámetros de forma automática, minimizando una función objetivo que tiene en cuenta no sólo el ajuste entre valores medidos y calculados de niveles piezométricos, 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 (Carrera y Neuman, 1986). Estas herramientas han sido desarrolladas por el Grupo de Hidrogeología e Hidrogeoquímica de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Modelo Conceptual

El modelo conceptual de la CMR se definió en base a la información geológica e hidrogeológica disponible en instituciones y empresas públicas y privadas, e información generada por la red de monitoreo de ACUMAR (Figura 2).



Figura 2. Pozos de la red de monitoreo de ACUMAR (extraído UNLP, 2009). En triángulos los sitios que monitorean freático y Puelche, en círculos donde solo monitorean el freático

El sistema acuífero esta compuesto por el acuífero freático, mayormente presente en la Formación Pampeano y el acuífero Puelche, ambos presentan continuidad hidráulica (Mancino et al., en este volumen). Existen diferencias de nivel entre ambos acuíferos por sectores, producto de un acuitarado de condición hidráulica variada (Figura 3).

El flujo subterráneo regional presenta una dirección predominante sudoeste – noreste,

mientras el acuífero freático esta fuertemente condicionado por los cuerpos de agua superficial. Localmente la existencia de fuertes explotaciones provoca importantes conos de abatimiento.

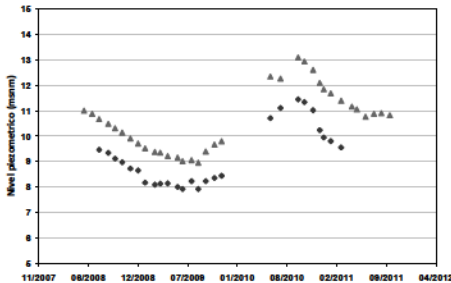


Figura 3. Hidrogramas de los piezómetros 13F (freático, triángulo) y 13P (Fm. Puelche, rombo).

El acuífero freático recibe la recarga natural por infiltración de la precipitación y la recarga por componentes de origen antrópico tal como las pérdidas de las redes de agua, saneamiento y conductos pluviales y filtración de pozos sépticos, entre otros. Una importante proporción de la recarga antrópica proviene de las fugas en las redes de agua que se importa desde el Río de La Plata. Las arenas de la formación Puelche no presentan afloramiento en la zona de estudio y recibe indirectamente la recarga a través del acuífero freático.

Las descargas del agua subterránea, en condiciones naturales, se localizan en los cuerpos de agua superficial de la cuenca (arroyos y ríos) y en el Río de La Plata. Otras descargas del flujo subterráneo la componen las extracciones al acuífero freático y Puelche.

Las fluctuaciones de niveles en el acuífero freático medidas en la red de monitoreo de ACUMAR, están relacionadas con las variaciones climáticas en la zona alta y con las actividades antrópicas en la zona baja, con una zona de transición en la cuenca media. Las fluctuaciones en el acuífero Puelche son semejantes a las registradas en el freático, fundamentalmente en lo que se refiere a la variabilidad, la magnitud está controlada por aspecto geológicos locales o antrópicos de fuerte impacto (campo de bombeo de la empresa AySA o de grandes industrias).

Una de las mayores incertidumbres que aún persisten en el modelo conceptual es la interacción entre el acuífero freático y Puelche. Si bien en la actualidad, en la mayor parte de la zona de estudio los niveles del freático son superiores a los niveles en el acuífero Puelche

lo que indicaría un flujo descendente y la recarga del acuífero freático al acuífero Puelche, esta condición no se observa en el pasado donde el flujo en la cuenca baja era ascendente.

Modelo Numérico

El dominio del modelo numérico esta definido al NE por el Río de La Plata; al NW por el río Reconquista; al SE lo delimita el arroyo Conchita continuando en una línea perpendicular a la costa, y al SW se toma como límite una línea de isopieza paralela a la costa (Figura 4). La superficie total modelada es de 4498 km².

El modelo numérico desarrollado es bicapa o multicapa, compuesto por 17262 elementos triangulares, 3416 elementos unidimensionales y 7115 nudos (figuras 4 y 5). La capa superior simula al acuífero freático y la capa inferior al acuífero Puelche, el acuitardo se reproduce con los elementos unidimensionales.

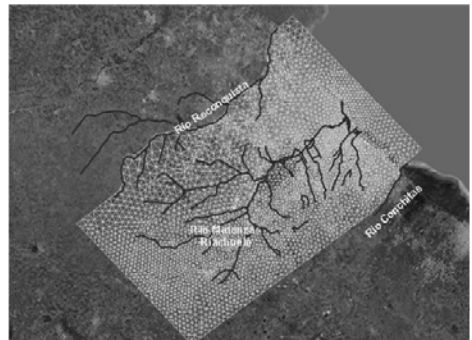


Figura 4. Área modelada y discretización del dominio correspondiente al acuífero Puelche.

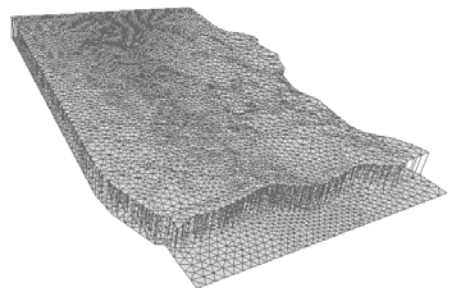


Figura 5. Malla multicapa o bicapa.

Temporalmente el flujo está resuelto para el período enero 1906 a diciembre 2011, con paso de tiempo anual hasta el año 1990 y luego

mensual hasta el final de tiempo de modelación. De esta forma, el periodo de modelación fue de 106 años o 38715 días, discretizado en 85 intervalos de un año y 264 intervalos de un mes, totalizando 349 intervalos de tiempo. El inicio de la modelación lo suficientemente lejos del periodo reciente fue realizado para no alterar o condicionar las simulaciones más actuales que es cuando se dispone de información.

La estructura del modelo numérico está compuesta por 8 zonas de conductividad hidráulica. Cuatro zonas en la capa superior definidas como Pampeano 7 m/d, Postpampeano 10 m/d, Fm. Buenos Aires y Ensenada 20 m/d y Depósito de playa 30 m/d. La capa inferior corresponde a la Fm. Puelche de 50 m/d. Al acuitardo se asignó una conductancia entre 10^{-4} y 10^{-5} m²/d. El coeficiente de almacenamiento se zonificó en tres valores, uno para cada capa.

Las 76 zonas de recarga del sistema, impuestas en los elementos triangulares de la capa superior, fueron definidas en Scioli et al. (en este volumen). Cada zona tiene asociada una función de tiempo para reproducir la variabilidad temporal.

Asociado a los nudos, el modelo presenta 60 zonas de caudal fijo, 44 zonas de nivel fijo y 43 zonas de goteo o mixtas.

Las zonas de caudal fijo simulan las extracciones por bombeo en pozos perteneciente a las grandes industrias y a la empresa AySA, y se adopta que todas ellas explotan la Fm Puelche (capa inferior de la malla). Los bombeos en la For. Pampeano se incluyen en las funciones de recarga. Las zonas de caudal fijo corresponden a 11 puntos de extracciones de grandes industrias y 254 puntos de bombeo correspondientes a los pozos de la empresa AySA (Figura 6).



Figura 6. Pozos de AySA y grandes industrias.

Los pozos de las industrias y de las baterías de AySA se agruparon por proximidad en unos pocos nudos, de esta forma quedaron 8 nudos que simulan grandes industrias y 49 zonas de bombeo de AySA distribuidas en 96 nudos. Respecto a las funciones de tiempo que reproducen la variabilidad temporal asociada a cada zona, se asignó una diferente por zona.

La conexión río-acuífero se simuló con la condición de contorno mixta que se impuso en los nudos de la malla. Para ello se requirió determinar en cada nudo el nivel prescrito o externo (cota del agua superficial) y el coeficiente de goteo o conductancia que controla la movilidad del agua y que depende de parámetros morfológicos de los cauces. Esta información se obtuvo de relevamientos batimétricos (IATASA, 2008), informes de secciones de aforo (EVARSA, 2011 a,b,c), modelos digitales de elevación e imágenes satelitales de alta resolución. La Figura 7 muestra los nudos de la malla en los 49 tramos de interacción río-acuífero simulados.

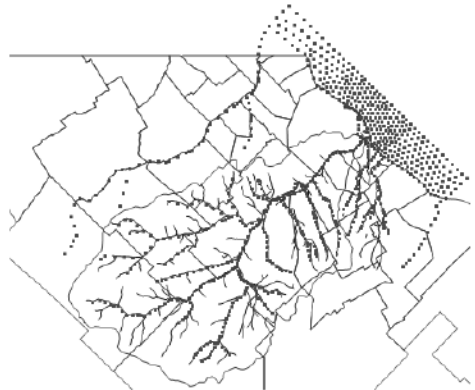


Figura 7. Nudos de la malla que simulan la interacción río – acuífero y las descargas al Río de La Plata en el borde NE.

La descarga de los acuíferos al Río de La Plata se simuló mediante nudos de nivel fijo en la capa superior o freática y condición de contorno mixta en la capa inferior o Puelche. La Figura 7 muestra los nudos situados en el Río de La Plata empleados para simular la descarga del acuífero Puelche al alejarse de la línea de costa.

En el borde SW se asumió que las líneas piezométricas son paralelas a la línea de costa y se impuso un caudal de ingreso externo para cada una de las capas. El valor del caudal se estimó adoptando valores de conductividad

hidráulica y espesores medios para cada formación y gradientes hidráulicos de ambos acuíferos. Estos caudales se asumieron constantes con valores de 0.65 y 1.25 m²/d por unidad de longitud para el acuífero Pampeano y Puelche, respectivamente.

Niveles medidos

Los niveles piezométricos empleados en la etapa de calibración corresponden a 30 pozos en el acuífero Pampeano y 16 pozos en el acuífero Puelche, pertenecientes a la red de monitoreo de ACUMAR (Figura 2). Para el proceso de calibración se utilizaron 1409 datos de niveles correspondientes al periodo mayo 2008 -septiembre 2011.

Resultados

El modelo numérico fue calibrado ajustando los valores de un conjunto de parámetros para reproducir los niveles observados en los pozos de monitoreo de ACUMAR, obteniendo valores coherentes de parámetros y caudales de entrada/salida que se ajusten a los medidos (por ejemplo el caudal base del río Matanza-Riachuelo). La calibración emplea un algoritmo numérico que busca minimizar una función objetivo que mide la diferencia de los niveles observados y los calculados por el programa.

Los parámetros utilizados en el proceso de calibración fueron: la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, la recarga y el goteo. La calibración se realizó en régimen transitorio desde 1906 hasta 2011, con paso de tiempo anual hasta el año 1990 y luego mensual hasta el final del período de modelación. Para el inicio de la simulación se asumió un estado estacionario sin bombeo y con una recarga media de todo el período simulado.

En este trabajo, se seleccionaron tres escenarios de funcionamiento del sistema, con tres grupos de parámetros que permiten reproducir el comportamiento del sistema de manera satisfactoria y que instalan la necesidad de nuevos estudios para reducir las incertidumbres existentes.

Escenario A: el sistema admite que gran parte del agua que se recarga, descarga a los ríos, arroyos y hacia el Río de la Plata a través del acuífero Puelche, para lo cual simula una baja capacidad de aislamiento del acuitardo.

Escenario B: el acuitardo es menos conductivo que el escenario anterior, la descarga se realiza fundamentalmente por los ríos y arroyos, y en menor proporción hacia el Río de la Plata a través del acuífero freático.

Escenario C: Simula una situación intermedia de los dos escenarios anteriores, donde el acuífero freático y el Puelche descargan un volumen similar al Río de La Plata. La descarga hacia los ríos y arroyos es muy importante.

Los resultados obtenidos para los tres escenarios propuestos se consideran satisfactorios, ya que reproducen adecuadamente los niveles observados (Figura 8), los parámetros estimados y el balance de masas.

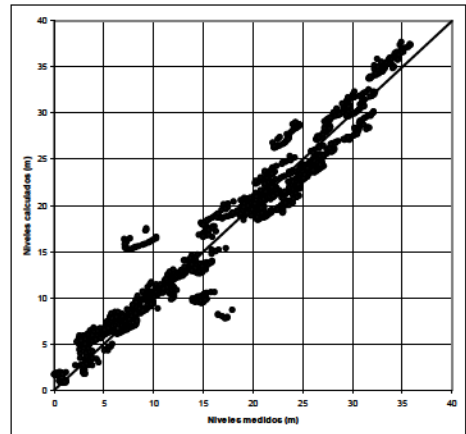


Figura 8. Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario C.

Las simulaciones permitieron validar en términos generales el modelo conceptual propuesto, probar hipótesis alternativas de controles del flujo, identificar zonas del dominio de modelación que presentan deficiencias de información e incertidumbres.

Las simulaciones reprodujeron las piezometrías observadas (Figura 9), validando la hipótesis que los cursos superficiales son vías de descarga de los acuíferos. Asimismo, los flujos descendentes observados durante el período 1980 hasta la actualidad han sido reproducidos (figuras 10 y 11). El término dominante del balance de masas es la recarga. La descarga hacia los ríos y arroyos se estimó entre el 68 y el 87 % de la recarga, en cambio las descargas al Río de La Plata están en el orden del 18 al 20 %.

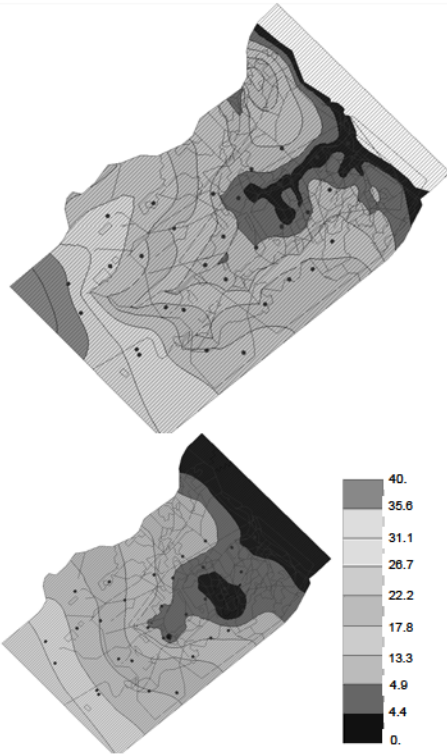


Figura 9. Mapa de isopiezas calculadas (en metros) para el acuífero freático (sup.) y el Puelche (inf.), ambos para diciembre 2011, Escenario C. Equidistancia 4.44 m

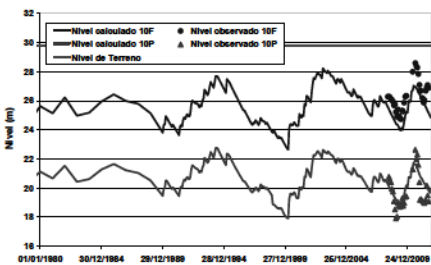


Figura 10. Hidrograma de los piezómetros 10F y 10P. La F es freática y P es Puelche. Escenario C

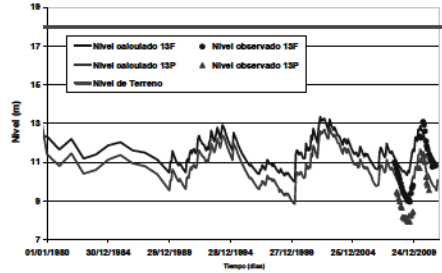


Figura 11. Hidrogramas de los piezómetros 13F y 13P. La F es freática y P es Puelche. Escenario C.

Discusión

Varias son las acciones emprendidas para la componente agua subterránea en el marco de la recuperación de la Cuenca Matanza Riachuelo; desde la construcción de una red de monitoreo, la generación de información base, la accesibilidad y estandarización de datos, hasta el análisis del estado del sistema y el desarrollo de modelos matemáticos. El modelo de flujo de agua subterránea tiene un importante rol en la evaluación de las medidas implementadas, la determinación del impacto en los sistemas y para asistir en la modelación integrada del área de la cuenca.

El modelo de flujo presentado es un paso importante en el desarrollo de herramientas de evaluación y gestión de la cuenca; una gran cantidad de datos generados por ACUMAR y colectados de diversas fuentes han sido incorporados al modelo, sin embargo es necesario realizar algunas observaciones generales acerca de las incertidumbres que deberían ser abordadas en futuras etapas.

- La heterogeneidad de los sedimentos en sentido vertical y horizontal condiciona la respuesta de los niveles piezométricos. Incorporar mayor detalle de la geología del área y de los valores de conductividad permitiría alcanzar mejores ajustes del modelo. Esto es particularmente importante en el área de la cuenca alta, dentro y fuera de los límites de la cuenca superficial, donde la información disponible es escasa.
- Variaciones en las propiedades del acuitardo lleva a dos diferentes respuestas de funcionamiento del sistema. Un mayor conocimiento de la extensión y las propiedades del

acuitado permitiría mejorar la representación de los procesos que condicionan el funcionamiento del sistema en los distintos sectores de la cuenca.

- La interacción entre el sistema superficial y subterráneo en el área de la cuenca es poco conocida. Esta puede variar en distintos tramos dependiendo de varios factores naturales y antrópicos. Un mejor conocimiento de esta interacción reduciría la incertidumbre acerca de la magnitud del flujo base y del efecto en el sistema por el ingreso de agua superficial, procesos que tienen un alto impacto en el saneamiento de la cuenca.

Importantes esfuerzos se deberán emprender para atender las cuestiones citada e incrementar la confiabilidad del comportamiento del flujo e incorporar la componente de calidad al modelo.

Conclusiones

Un modelo de flujo fue desarrollado para reproducir el comportamiento del sistema de agua subterránea en el área de la Cuenca Matanza Riachuelo en el marco del plan integral de saneamiento ambiental. Se simularon tres escenarios de funcionamiento del sistema variando los valores de un conjunto de parámetros.

Los resultados obtenidos para los tres escenarios propuestos son satisfactorios, ya que reproducen adecuadamente los niveles observados, los parámetros estimados y el balance de masas. Las simulaciones permitieron validar en términos generales el modelo conceptual propuesto, probar hipótesis alternativas de controles del flujo, identificar zonas del dominio de modelación que presentan deficiencias de información e incertidumbres.

Las piezometrías observadas fueron reproducidas validando la hipótesis de que los cursos superficiales son vías de descarga de los acuíferos. Asimismo, los flujos descendentes observados durante el período 1980 hasta la actualidad fueron reproducidos. El término dominante del balance de masas es la recarga. La descarga hacia los ríos y arroyos se estimó entre el 68 y el 87 % de la recarga, en cambio la descarga al Río de La Plata se estimó en el orden del 18 al 20 %.

Los avances logrados en la integración de la información y en la generación del conocimiento

y de herramientas para la toma de decisiones, son importantes. Los resultados obtenidos son un paso inicial y refuerzan la generación de información en los aspectos claves que permitan robustecer este modelo como herramienta de evaluación de las medidas implementada y de los impactos en el sistema en el marco de la recuperación de la cuenca.

Agradecimientos

Es destacable agradecer la información facilitada por la Empresa Agua y Saneamientos Argentinos S.A. (AySA), el apoyo del personal de la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo y el valioso aporte realizado por el Prof. Dr. Jesús Carrera Ramírez y la Dra. María Pool del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA, Barcelona) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC, España), durante la revisión externa de la modelación.

Referencias

- Bocanegra E, 2010. Desarrollo de herramientas hidrogeoquímicas y numéricas aplicadas a la evaluación de la explotación del Acuífero de Mar del Plata. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Mar del Plata. 119 p.
- Carrera J. and Neuman S.P., 1986. Estimation of aquifer parameters under transient and steady-state conditions, Maximum likelihood method incorporating prior information. *Water Resour. Res.*, 22(2), 199-210.
- EVARSA, 2011a. Proyecto desarrollo sustentable – cuenca matanza riachuelo – préstamo BIRF7706-AR. Ítem I V. Aforos en la Rectificación – Octubre.
- EVARSA, 2011b. Proyecto desarrollo sustentable – cuenca matanza riachuelo – préstamo birf 7706-AR. Ítem II: Aforos Líquidos Periódicos-Noviembre 2011.
- EVARSA, 2011c. Proyecto desarrollo sustentable – cuenca matanza riachuelo – préstamo birf 7706-AR” Ítem II: Aforos Líquidos Periódicos-Diciembre 2011.
- IATASA, 2008. Contratación de obras de conocimiento Topo-Batimétrico de la cuenca hídrica Matanza Riachuelo. Licitación Pública Nacional N° 01/2008
- INA, 2010. Balance de Agua Subterránea en la Cuenca Del Matanza-Riachuelo Mediante Modelación Numérica. Instituto Nacional Del Agua Proyecto INA 1.207 Informe LHA 01-1.207-10 Ezeiza. 119 pp.

- Mancino C, Vives L, Funes A, Zárate M y Martínez S, 2013. Modelación del flujo subterráneo en la cuenca Matanza Riachuelo, provincia de Buenos Aires. 1. Geología y geometría del subsuelo. (En este volumen).
- Medina A. and Carrera J., 1996. Coupled estimation of flow and solute transport parameters. *Water Resour. Res.*, 32(10), 3063-3076.
- Scioli C, Vives L, Burgos M y Martínez S, 2013. Modelación del flujo subterráneo en la cuenca Matanza Riachuelo, provincia de Buenos Aires. 2. Cálculo de la recarga. (En este volumen).
- UNLP, 2009. Estudio de las condiciones hidrogeológicas, capacidad de recarga y de la calidad de las aguas subterráneas en la cuenca Matanza – Riachuelo. ACUMAR
- Vives, L., Mancino C. y Scioli C., 2012. Modelo conceptual y numérico del flujo de aguas subterránea de la cuenca del río Matanza-Riachuelo. 227p.