

GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS: LOS MODELOS HIDROGEOLÓGICOS COMO HERRAMIENTA AUXILIAR

Water management: Hydrogeological modeling as an auxiliary tool

Xavier Sánchez-Vila (*) y Daniel Fernández-García (**)

RESUMEN

El agua es un recurso escaso y, por tanto, debe gestionarse de modo adecuado para satisfacer la demanda global y realizar una correcta planificación integral de los recursos hídricos. En la gestión puede actuarse directamente tanto sobre la oferta como sobre la demanda. Una gestión correcta implica un sistema de contabilidad que reproduzca la situación existente y permita cuantificar el efecto de los distintos escenarios de gestión sobre la cantidad y la calidad de los recursos. Esta necesidad de cuantificación hace indispensables los modelos numéricos en general y los hidrogeológicos en particular para una correcta gestión de los recursos hídricos. En este artículo se presentan algunos de los elementos de un modelo hidrogeológico, incluyendo la necesidad de gestionar un conjunto importante de datos y algunos aspectos técnicos sobre discretización y calibración de un modelo numérico. Los modelos hidrogeológicos deben incluirse entonces en modelos de gestión de uso conjunto que contemplen todas las posibles fuentes de agua.

ABSTRACT

Water is scarce, and thus must be managed adequately in order to satisfy the global demand within a water resources integral planning. Management can act either on offer or demand. Proper management implies an accountability system capable both of reproducing the existing situation and quantifying the effect of management scenarios upon resources quantity and quality. The need for quantification makes indispensable numerical models in general, and hydrogeological models in particular. We present some of the elements that are included in a hydrogeological model, including the need for managing huge amounts of data and some technical aspects on discretization and calibration of numerical models. Hydrogeological models must be included into management models that account for conjunctive use of all available resources.

Palabras clave: Aguas subterráneas, gestión de recursos hídricos, recursos no convencionales, modelos hidrogeológicos.

Keywords: Groundwater, water resources management, non conventional resources, hydrogeological models.

LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

El agua es un recurso renovable, pero escaso. Cuando un recurso es imprescindible y a la vez escaso, puede plantearse la pregunta filosófica de si es un derecho o un bien de consumo. Ante esta dualidad los gobiernos de los distintos países plantean soluciones diferentes. El punto de partida es que el agua tiene diversos usuarios potenciales, cada uno de ellos con unas necesidades en términos de cantidad, de garantía de suministro y de calidad. Una gestión correcta de los recursos implica actuar en estas tres componentes, lo que en muchos casos puede provocar conflictos, como veremos más adelante.

Entre los usuarios potenciales tenemos (1) Población, (2) Agricultura y ganadería, (3) Industria, (4) Usos recreativos, (5) Usos ecológicos y (6) Usos energéticos. El suministro a la población es el

uso prioritario desde el punto de vista social. Un ejemplo reciente de la priorización del uso de agua para abastecimiento humano se ha visto en la primavera de 2008 en la gestión de la sequía en el entorno del Área Metropolitana de Barcelona. El uso agrícola es el que supone un mayor consumo (alrededor del 70% en España), pero a su vez es el que implica una demanda menos acuciante en el tema de calidad. El uso industrial es variable, puesto que depende de si el agua es un elemento que se introduce como materia prima (ej. Elaboración del papel), o sólo como elemento de refrigeración (ej. Centrales térmicas). Los usos recreativos pueden tener un consumo importante, como en el caso de los campos de golf, o las fuentes públicas, aunque también pueden usar el agua como factor de oportunidad (vela o windsurf en embalses). Los usos ecológicos tienen una consideración social cada vez más

(*) Grupo de Hidrogeología, Dept. Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona. E-mail: xavier.sanchez-vila@upc.edu

(**) Grupo de Hidrogeología, Dept. Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona. E-mail: daniel.fernandez.g@upc.edu

marcada, tanto el establecimiento de caudales ecológicos al pie de los embalses de regulación de agua superficial como el mantenimiento de humedales (ej. Doñana) para garantizar la persistencia de ecosistemas singulares. Recientemente está aumentando el interés por recuperar los bosques de ribera (elementos gobernados por la interacción entre ríos y aguas subterráneas). Finalmente, el agua puede utilizarse en la generación de electricidad.

Aparentemente sería sencillo clasificar los usos según unas prioridades y luego gestionarlos según estas preferencias. Sin embargo, la realidad socio-económico-política no es tan simple. Por ejemplo, un uso recreacional favorece el turismo hacia una determinada zona, con el consiguiente beneficio económico que se produce tanto por la propia actividad como por la generación de puestos de trabajo. Los usos agrícolas tienen también una componente socio-económica muy importante; no es extraño, pues, que la política española sea la de subsidiar parte del coste del agua a los agricultores. Es evidente, pues, que una gestión sostenible implica un conjunto de actuaciones bajo iniciativa pública o privada, conducente a evaluar recursos y necesidades y a diseñar un sistema que proporcione el máximo beneficio dentro del respeto a las reglas del juego. ¿Cuáles son estas reglas? En general se consideran cuatro principios básicos:

1. Solidaridad y equidad entre todos los actores presentes y futuros. Esto incluye reconocer todas las fuentes de agua como recursos potenciales susceptibles de priorización.
2. Sostenibilidad, que implica una correcta evaluación de los recursos, así como un estudio sobre los efectos que cualquier política de gestión podría provocar en el sistema. Para ello es necesario integrar todo el conocimiento y la información disponibles.
3. Eficiencia, que supone utilizar los recursos de modo que se maximice el beneficio global de la sociedad entendida en su conjunto.
4. Subsidiariedad, que implica involucrar a los actores en un proceso de gestión abajo-arriba, favoreciendo la participación de todos los actores, que deben sentirse responsables y partes activas en un objetivo común. Este principio incluye la necesidad de una buena educación ambiental.

OFERTA VERSUS DEMANDA

En un sistema puramente económico el agua podría gestionarse mediante la ley de la oferta y la demanda. En el mercado del agua, sin embargo, es posible interactuar sobre ambos lados. La gestión de la demanda implica la posibilidad de reducirla mediante acciones directas. Una de las políticas más efectivas es la tarifaria, pero tiene un alto coste social y político.

Una segunda acción, también muy efectiva, es la concienciación ciudadana. En el ámbito urbano este aspecto no es despreciable, y en ciudades como Copenhague se ha comprobado una reducción de consumo urbano del 15% en los últimos años por

una política conjunta de concienciación unida a una política tarifaria agresiva. En el ámbito agrícola es posible utilizar metodologías eficientes de riego, que tienen un coste de inversión significativa, el cual se compensa sobradamente con el ahorro del agua (Fig. 1). En este sentido cabe indicar que en un estudio realizado por la Junta de Andalucía se demostró que la productividad agrícola por m³ de agua consumido era muy superior en las zonas de riego eficiente, indicando la nula productividad adicional que se consigue con el sobrerriego. En el sector industrial se intenta encontrar procesos de producción eficientes. En el sector urbano es posible reducir el consumo global de una población mediante mejoras en la red de suministro, o mediante la reducción de la presión de operación del sistema (ambos efectos se combinan para reducir las pérdidas en la red, permitiendo reducir la presión sobre los recursos de abastecimiento).

La otra posibilidad es actuar sobre la oferta, lo que supone realizar acciones con el objetivo de aumentar los recursos disponibles en una zona, como veremos en el apartado siguiente.



Fig.1: Sistema de riego por aspersión (foto superior) frente a riego por goteo (foto inferior). La inversión en sistemas eficientes de riego se ve compensada por la reducción de consumo de agua.

ALTERNATIVAS DE AUMENTO DE RECURSOS

Los recursos habituales son las aguas superficiales y las aguas subterráneas (en conjunto se conocen como recursos convencionales). En el mundo podemos encontrar zonas que se abastecen exclusivamente con unos u otros, pero lo habitual es que estas dos fuentes de agua se combinen en alguna proporción para abastecer una necesidad determinada.

Sin embargo el continuo aumento de población y los efectos de los cambios en el clima han hecho que muchas zonas áridas y semiáridas del planeta se enfrenten a una escasez de agua actual. Esta escasez puede ser coyuntural o estructural. En el primer caso esto supone que existirán períodos de tiempo durante un año, o interanuales, en los que el suministro no queda garantizado (por ejemplo, el Área Metropolitana de Barcelona), con importantes repercusiones sociales y políticas. En el segundo, el problema es grave y acuciante (p. e., la franja de Gaza) y puede dar lugar a las “guerras del agua”.

Las soluciones a este problema entran en el terreno de los recursos no convencionales (Salgot et al., 1999). Entre ellos podemos destacar:

1. Aportaciones de cuencas excedentes, más conocidas como trasvases. Se trata de una alternativa válida desde el punto de vista técnico, pero socialmente controvertida (Fig. 2). Algunos de los mayores desastres ecológicos de la Tierra han sido provocados por los trasvases. Un ejemplo paradigmático podemos encontrarlo en la desecación del Mar de Aral (Micklin, 1988), producido fundamentalmente por un trasvase para usos agrícolas (Fig. 3).
2. Desalación de agua (Fig. 4). Se trata de una opción que ha tenido un gran auge en los últimos años (Wangnick, 2005). Esta opción permite captar agua de mar y mediante una técnica de membranas se consigue un agua en la que apenas quedan sales disueltas. Los problemas fundamentales son el coste energético (necesidad de utilizar una gran cantidad de energía que a su vez tiene un coste económico y ambiental) y la existencia de un agua de rechazo, con un alto contenido en sales, que debe verterse al mar con sus posibles repercusiones ecológicas.



Fig. 2: La controversia social va ligada a todos los proyectos de trasvases.

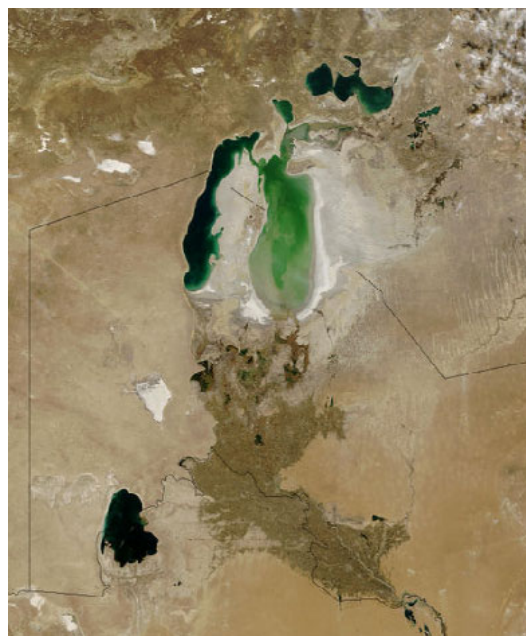


Fig. 3: La desecación del Mar de Aral, ligada a un trasvase para fines agrícolas.

3. Agua residual regenerada: la tecnología actual permite tratar las aguas residuales hasta un altísimo grado de depuración en función de las necesidades, aunque los costes aumentan claramente con el grado de tratamiento. En el límite podría plantearse un proceso similar al de las desaladoras y conseguir un agua prepotable. Las aguas regeneradas constituyen una fuente potencial muy importante en términos de cantidad y de disponibilidad (el volumen de agua disponible es mayor



Fig. 4: Interior de una planta desaladora en Ashkelon (Israel). En primer plano la tubería de entrada de agua procedente del mar. Al fondo el conjunto de membranas de ósmosis inversa.

en las zonas más pobladas, que a su vez son las que requieren mayor aportación).

- Recarga artificial de los acuíferos (Fig. 5). Los embalses superficiales y los acuíferos se rellenan de manera natural en los periodos de lluvia. Sin embargo, los acuíferos pueden seguir almacenando agua desviada de manera artificial hacia los mismos. El agua de recarga puede provenir del río en época de caudales altos, de una depuradora, o de una tormenta. En estos casos es importante evaluar la calidad del agua recargada y los procesos físico-químico-biológicos que tendrán lugar entre ésta y el agua ya existente en el acuífero (puede encontrarse más información en http://water.usgs.gov/ogw/artificial_recharge.html).



Fig. 5: Balsas de recarga artificial de acuíferos. Al fondo se observa una balsa llena (en proceso de recarga). Al frente una balsa en la que se acaba de realizar un tratamiento para eliminar la colmatación de la misma (mediante arado de la superficie).

- Captación de aguas de menor calidad, que pueden destinarse a algunos usos particulares, reduciendo por tanto la presión sobre los recursos hídricos de mayor calidad. Un ejemplo es la red secundaria de la ciudad de Barcelona que capta agua del subsuelo de la ciudad y la destina al riego de parques y jardines y al baldeo de calles.

Cada uno de estos métodos puede resultar en un incremento de la oferta de recursos. Los aspectos socio-económicos serán los que dirán si el coste de aumentar la oferta para satisfacer la demanda se compensa con un beneficio para el conjunto de la sociedad. En caso contrario es necesario priorizar los recursos.

LA GESTIÓN SOSTENIBLE EN TÉRMINOS CUANTITATIVOS

¿Cómo gestionar un recurso escaso? La analogía podemos encontrarla en la economía doméstica o empresarial, donde hay unos ingresos y unos gastos tanto de carácter mensual como anual o interanual. La economía se gestiona mediante un balance de entradas y salidas en un tiempo determinado (por ejemplo mensual), y la diferencia entre ambos es la cantidad de dinero que se ahorra al mes (puede ser positiva o negativa). Si el balance es negativo, entonces deber actuarse sobre las entradas (aumentar

ingresos) o las salidas (reducir gastos). Cuando nadie en la empresa se encarga de cerrar el balance, lo más probable es la quiebra.

El caso de los recursos hídricos es equivalente. Es necesario gestionar el recurso mediante balances temporales de disponibilidad y demanda. La unidad de la gestión es la masa de agua, que en términos matemáticos se suele escribir como el volumen de control. El equivalente al programa de contabilidad sería el modelo matemático. Finalmente el elemento que se contabiliza es el agua (modelos de flujo) o la masa de un soluto concreto (modelos de transporte).

El balance final puede escribirse como

$$E - S \pm F = \Delta A$$

donde E son las entradas de agua por los contornos (límites físicos) del volumen de control, y S las correspondientes salidas. El término F considera las fuentes externas de aportación (signo positivo) o pérdida (signo negativo). Como fuentes pueden considerarse la recarga (natural o artificial) o los excedentes de riego. Como pérdidas pueden considerarse las extracciones. Por último es la variación en el almacenamiento de agua en el volumen de control.

LOS MODELOS HIDROGEOLÓGICOS

La modelación consiste en encontrar la descripción matemática más coherente de un medio (un acuífero). El modelo hidrogeológico es la herramienta básica de la modelación. Se trata de un ente matemático que reproduce algún aspecto del funcionamiento del sistema acuífero, por ejemplo, la entrada/salida de agua subterránea o los niveles de agua subterránea. En general, podemos distinguir tres componentes básicos de un modelo hidrogeológico: Parámetros, condiciones de contorno e iniciales, y ecuaciones básicas (Fig. 6).

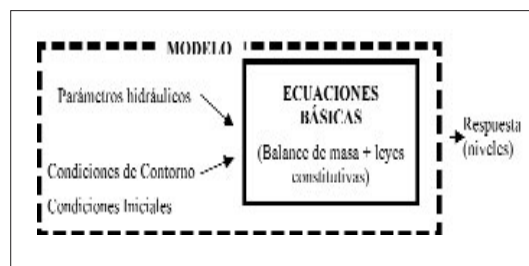


Fig. 6: Conceptualización de un modelo hidrogeológico.

Los parámetros son propiedades cuantificables del medio que caracterizan su comportamiento hidrogeológico. Las condiciones de contorno describen el comportamiento de la variable del sistema (niveles piezométricos o flujos de agua) en el contorno del dominio mientras que las condiciones iniciales indican el estado del sistema en el instante en que empieza la “contabilidad”.

Las ecuaciones básicas describen de forma matemática el comportamiento general del sistema. Las ecuaciones de un modelo hidrogeológico derivan de dos principios fundamentales: (1) Conservación de masa (balance de masa) y (2) Leyes constitutivas. El principio de conservación de masa, ya comentado anteriormente, expresa que el balance de masa neto (la masa entrante menos la saliente del sistema) debe ser igual a la masa acumulada, y puede aplicarse a distintos tipos de variables, como pueden ser la masa de agua (modelos de flujo) o la masa de una especie química disuelta en el agua (modelos de transporte).

Por otra parte, las leyes constitutivas caracterizan el comportamiento del medio en función de la variable estudiada. Por ejemplo, una de las leyes constitutivas más utilizadas en modelos de flujo es la Ley de Darcy, que expresa que el caudal de agua que atraviesa una muestra de suelo es proporcional a la diferencia de niveles de agua, definiendo la constante de proporcionalidad como permeabilidad del terreno. Los modelos de transporte son más complejos por los procesos físico-químicos que deben incorporarse al modelo. El soluto puede ser arrastrado por el movimiento del agua (advección), puede dispersarse por efectos entrópicos (dispersión) y puede experimentar un conjunto de reacciones químicas o biológicas (adsorción al medio físico, precipitación/disolución, oxidación/reducción, desintegración radioactiva, digestión anaerobia, intercambio iónico).

Los modelos se pueden clasificar en dos tipos: los analíticos y los numéricos. Los modelos analíticos son soluciones explícitas del problema matemático. Por ejemplo, los descensos de los niveles de agua de un acuífero debido a un bombeo en un pozo se pueden describir mediante la solución de Jacob,

$$s(r, t) = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right)$$

donde s es la variación del nivel piezométrico que se produce a una distancia r del pozo para un tiempo determinado t debido a un caudal de extracción Q . En este caso, T (transmisividad) y S (coeficiente de almacenamiento) son dos parámetros hidráulicos característicos del medio los cuales deben ser medidos en el campo o estimados indirectamente. Los modelos analíticos proporcionan la solución directa a las ecuaciones básicas del modelo hidrogeológico. Para ello, tanto la geometría del problema como la descripción geológica del sistema son generalmente muy simples (medio infinito y acuífero homogéneo). Estos modelos son útiles para poder entender desde el punto de vista pedagógico cómo las variables de estado (niveles piezométricos o concentraciones de solutos) varían en función de los parámetros del medio acuífero, pero en general no tienen en cuenta algunos de los factores importantes que caracterizan un modelo hidrogeológico: variabilidad espacial de las propiedades/parámetros del medio, geometría compleja del dominio matemático, etc.

Los modelos numéricos resuelven el problema matemático (ecuaciones básicas más condiciones de contorno e iniciales) mediante métodos numéricos englobados dentro de un programa de ordenador. Por tanto, no tienen ninguna de las limitaciones anteriores. Sin embargo, la solución del modelo hidrogeológico es sólo aproximada y suele requerir un tiempo de dedicación considerable. Además, su interpretación física es más costosa puesto que la dependencia de la solución del modelo con los parámetros ya no es evidente. La capacidad de resolver problemas mediante modelos numéricos va paralela al aumento sostenido de la capacidad de los ordenadores, de modo que problemas que hace pocos años eran inabordable con los grandes superordenadores de entonces pueden ser simplemente resueltos en los actuales ordenadores personales. A continuación, por tener un carácter más general, la discusión se centra en los modelos numéricos.

EL CONCEPTO DE DISCRETIZACIÓN

La mayoría de métodos numéricos que se utilizan para resolver las ecuaciones básicas de un sistema hidrogeológico requieren discretizar el dominio en un conjunto de elementos de volumen. El conjunto global de todos los elementos forma lo que se conoce como la malla numérica. Existen dos grandes grupos de métodos numéricos: El método de las diferencias finitas (MDF) y el método de los elementos finitos (MEF). La selección del método numérico condiciona en gran medida la geometría de los elementos (triángulos, rectángulos,...) que forman la malla. Se podría decir que en general los MDF conllevan mallas rígidas formadas por rectángulos, mientras que la malla de los MEF es totalmente arbitraria (Fig. 7). De todas formas, la selección del método numérico es subjetiva y cada uno de los métodos tiene ventajas y desventajas. Los MDF tienen una interpretación física sencilla (balance de masa de los

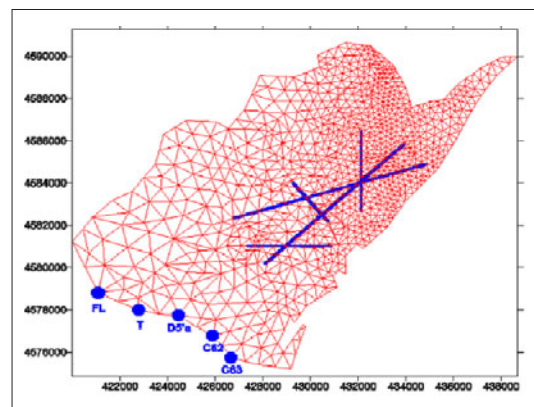


Fig. 7: Discretización de un acuífero bidimensional (entorno de la ciudad de Barcelona y parte de su Área Metropolitana) mediante elementos triangulares. Se aprecia la variabilidad en el tamaño de los elementos.

elementos), una entrada de datos cómoda y están tradicionalmente muy bien documentados. Sin embargo, la rigidez de la malla no permite un buen ajuste a contornos con geometrías complejas. Por el contrario, los MEF se pueden ajustar perfectamente al contorno pero su interpretación física es difícil debido a una mayor complejidad del desarrollo matemático.

EL CONCEPTO DE SELECCIÓN DE PARÁMETROS Y CALIBRACIÓN

Aunque teóricamente cada uno de los elementos que forma la malla numérica puede tener unas propiedades hidrogeológicas distintas, en la práctica se desconoce la mayor parte de las propiedades de los elementos del sistema. Para solucionar dicho problema se parametriza el modelo en base a unos pocos parámetros. La forma tradicional de parametrizar los modelos hidrogeológicos es la "zonificación". La zonificación consiste en definir zonas dentro del dominio con las mismas propiedades generalmente a partir de una caracterización hidrogeológica previa del medio (Fig. 8). Por ejem-

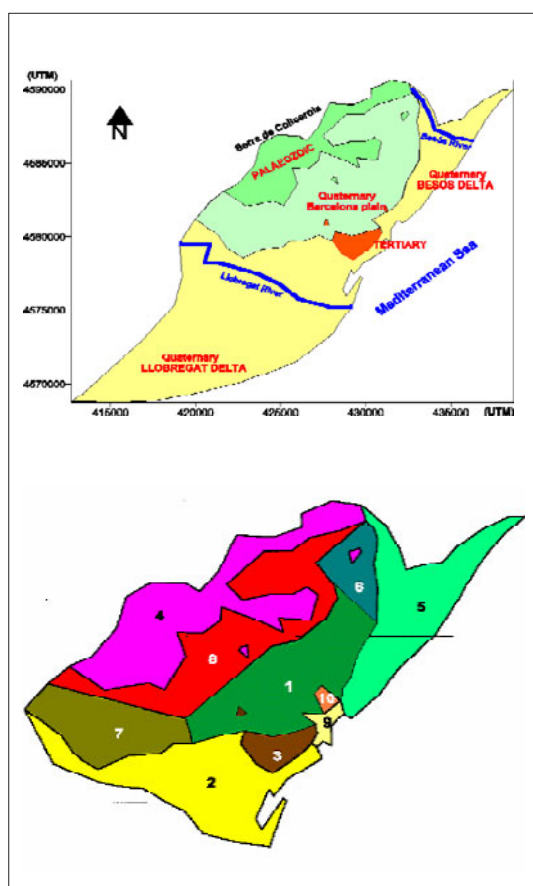


Fig. 8: Ejemplo de zonificación del modelo de la Figura 7. En la figura superior se presenta la geología simplificada. La zonificación (figura inferior) se sustenta sobre la geología, pero puede incluir informaciones complementarias que permiten la subzonificación.

plo, un estrato geológico podría delimitar una zona del modelo. Todos los elementos de la malla numérica dentro de dicho estrato se considerarían con las mismas propiedades físicas.

Una vez definidos todos los componentes de un modelo (ecuaciones básicas, parámetros por zonas, y condiciones de contorno e iniciales), éste debería ser capaz de realizar predicciones sobre el comportamiento del sistema. Sin embargo, normalmente, las primeras predicciones no se ajustan bien a la realidad debido a la incertidumbre existente en el modelo y es necesario "calibrar" el modelo. La calibración consiste en variar, manualmente o preferentemente de forma automatizada, los parámetros del modelo hasta que el modelo se ajuste a la realidad (observaciones). Se trata, pues, de un proceso iterativo.

La incertidumbre de un modelo proviene del desconocimiento parcial o total de alguna de sus componentes. Por ejemplo, en la realidad, es difícil conocer con exactitud: (i) las propiedades del medio (no es posible una medición exhaustiva de las propiedades, y los parámetros medidos no siempre son buenos); (ii) la geometría del modelo (situación de los contornos, fallas,...); (iii) los procesos hidrogeológicos importantes representados en las ecuaciones básicas.

LA INTEGRACIÓN DE LOS DATOS HIDROGEOLOGICOS EN UN MODELO

Un modelo hidrogeológico contiene una gran cantidad de información variada que debe ser almacenada eficientemente. Dicha información comprende todos los detalles sobre pozos, piezómetros, sondeos, ríos, mapas de zonas, mapas piezométricos, mapas de concentraciones, información hidrogeoquímica, etc. Dicha información consiste en datos referenciados tanto en el espacio (posición geográfica) como en el tiempo. La complejidad de dicha información es de resaltar. Por ejemplo, los piezómetros no deben ser únicamente referenciados geográficamente sino que también deben contener sus mediciones de niveles y concentraciones de varias especies químicas en el tiempo, además de incluir los datos geológicos procedentes de la perforación o los datos de los ensayos hidráulicos realizados tras la construcción de los mismos.

Toda la información debe ser fácilmente accesible y manipulable para ser integrada en el modelo hidrogeológico. Nótese, por ejemplo, que un modelo hidrogeológico debería ser recalibrado (o validado) cuando se dispone de más información sobre el sistema, y que por tanto la accesibilidad y manipulación de datos en tiempo real es un reto necesario. Actualmente, para hacer frente a este reto, los sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) constituyen la herramienta básica, entendiéndose por SIG una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para almacenar, manipular y analizar información en todas sus formas.

LOS MODELOS EN LA GESTIÓN GLOBAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Los modelos hidrogeológicos constituyen una herramienta básica de apoyo a las decisiones para la gestión de recursos hídricos y se utiliza para contabilizar las entradas y salidas de masa de agua o de soluto en el espacio y en el tiempo. En este contexto, un modelo hidrogeológico tiene la virtud de poder predecir el futuro de distintos escenarios posibles. Por ejemplo, la posible entrada en explotación de nuevos pozos de bombeo o cómo afectaría al sistema hidrogeológico la construcción de un obra singular en el territorio (un trasvase, recarga artificial,...).

En este artículo nos hemos centrado en presentar de modo sucinto los modelos hidrogeológicos como una herramienta indispensable para evaluar los distintos escenarios de gestión de las aguas subterráneas. Sin embargo, los recursos de agua provienen no solamente de las aguas subterráneas sino también de las aguas superficiales y/o de los distintos recursos no convencionales ya comentados a lo largo del artículo. Por este motivo, la gestión global de los recursos hídricos es extremadamente compleja. Así pues, la gestión global o integrada de los recursos de agua en una región podría albergar una multitud de acuíferos y sistemas hidrogeológicos distintos pero conectados entre sí, además de posibles embalses y otras obras singulares dentro del sistema.

La complejidad de los modelos integrados es tal que frecuentemente la gestión integrada de recursos de agua no incluye la modelación de cada uno de sus sistemas hidrogeológicos en detalle, sino que se ve forzado a simplificar el sistema acuífero a un modelo celular. El modelo celular se comporta como una malla de un solo elemento y únicamente proporciona la respuesta temporal del acuífero en base a una excitación o demanda externa del sistema. De esta forma, todos los recursos de agua (subterránea o no) dentro de una región son fácilmente entrelazados para poder analizar eficazmente cuál es la mejor gestión global de los recursos de agua.

Se debe tener en cuenta que la simplificación de un sistema de por sí complejo como un modelo hidrogeológico a un modelo celular no es nada evidente y que su formulación requiere ecuaciones básicas más complejas para de alguna forma tener en cuenta todos los procesos obviados dentro del acuífero.

CONSIDERACIONES FINALES

Los modelos numéricos en general y los hidrogeológicos en particular son indispensables para una correcta gestión de los recursos hídricos de una sociedad. El formalismo matemático permite garantizar que los resultados obtenidos de un modelo son susceptibles de ser usados en una gestión integral de los recursos. Sin embargo, los modelos tienen un riesgo. La mayoría de programas existentes son "user-friendly", de manera que tienen una gran sencillez de manejo. En este sentido, es fácil obtener soluciones que pueden ser físicamente irreales. Por este motivo conviene lanzar una nota de precaución sobre la necesidad de que sean profesionales hidrogeólogos las personas que construyan y gestionen los modelos numéricos.

BIBLIOGRAFÍA

- Micklin, P. P. (1988). Dessication of the Aral Sea: A water management disaster in the Soviet Union. *Science*, 241, 1170-1176.
- Salgot, M., Sánchez-Vila, X. y Torrens, A. (eds.) (1999). *Recursos d'aigua*. Fundació AGBAR, Barcelona.
- Wangnick (2005). *2004 Worldwide desalting plants inventory*. Global Water Intelligence. Oxford, England. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 5 de noviembre de 2007 y aceptado definitivamente para su publicación el 7 de junio de 2008.