

EVALUACIÓN DE LAS EXTRACCIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE BALANCES HÍDRICOS

Javier SAMPER CALVETE*

(*) Catedrático de Universidad - Presidente de la AIH-GE. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de La Coruña. Campus de Elviña, s/n
15192 LA CORUÑA

RESUMEN

Las extracciones de aguas subterráneas pueden ser evaluadas mediante métodos directos o mediante métodos indirectos que en general son mucho menos costosos y más viables. Una forma indirecta de evaluar las extracciones consiste en el planteamiento de balances hídricos en una porción o en la totalidad del acuífero. La ecuación del balance resulta de imponer el principio de conservación de la masa, por el cual el balance neto de entradas y salidas de agua entre dos fechas determinadas debe coincidir con la variación de masa almacenada en el acuífero. Las extracciones por bombeo constituyen un término de descarga que puede ser evaluado si se dispone de información suficiente del resto de los términos del balance: recarga por infiltración del agua de lluvia y por retornos de riego, recarga concentrada en cauces y piedemontes, recargas procedentes de otros acuíferos, descargas naturales en cauces, al mar en acuíferos costeros, en humedales y zonas de rezume, y descargas a otros acuíferos limítrofes. La evaluación de estas componentes, especialmente de la recarga, presenta dificultades y en general comporta incertidumbres considerables. Por ello, la estimación de las extracciones puede contener una elevada incertidumbre. Esta incertidumbre, no obstante, se puede reducir notablemente si se dispone de una adecuada caracterización hidrogeológica de la zona y de una buena base de datos históricos sobre la evolución hidrodinámica e hidroquímica del sistema durante la fase de explotación de sus recursos subterráneos. El método de balance tiene mayor fiabilidad en acuíferos en los que el régimen de explotación esté provocando de forma simultánea una disminución de las descargas comparable a la disminución de las reservas. La aplicación del método no requiere tecnologías especializadas y costosas ni precisa ser contrastado mediante campañas de campo. Puede ser llevado a cabo por hidrogeólogos con una sólida formación y experiencia. Su coste de ejecución es muy reducido. Por ello, puede ser útil para contrastar los resultados obtenidos con otros métodos directos o indirectos más costosos y laboriosos.

Palabras Clave: *Extracciones, balances en acuíferos, recarga, métodos de balance, modelos de flujo, modelos numéricos, oscilaciones freáticas.*

INTRODUCCIÓN

Las extracciones de aguas subterráneas pueden ser evaluadas mediante métodos directos o mediante métodos indirectos que en general son mucho menos costosos y más viables. Una forma indirecta de evaluar las extracciones consiste en el planteamiento de balances hídricos en una porción o en la totalidad del acuífero. La ecuación del balance resulta de imponer el principio de conservación de la masa, por el cual el balance neto de entradas y salidas de agua entre dos fechas determinadas debe coincidir con la variación de masa almacenada en el acuífero. Los balances hídricos pueden ser realizados a distintas escalas espaciales y en diferentes intervalos de tiempo (mensuales, anuales). Las extracciones por bombeo constituyen un término de descarga que puede ser evaluado si se dispone de información suficiente del resto de los términos del balance. La evaluación de cada uno de estos términos conlleva dificultades considerables que se traducen generalmente en que sus estimaciones contengan amplios márgenes de incertidumbre. Para cada componente del balance se puede en general establecer un intervalo de valores plausibles. En ciertos casos y particularmente en acuíferos con un alto grado de utilización de sus recursos se puede reducir la magnitud de este intervalo mediante la utilización de varios métodos de cálculo complementarios (por ejemplo la utilización de métodos hidrodinámicos e hidroquímicos). El mayor inconveniente que presenta la estimación de las extracciones a partir de balances hídricos radica en la precisión de esta estimación. La fiabilidad de este método depende directamente de la magnitud e incertidumbre del resto de los términos del balance. En general, la fiabilidad de las extracciones es tanto mayor cuanto mayor es la escala espacial (tamaño del acuífero), el intervalo de tiempo, los recursos del acuífero, y la magnitud de las extracciones. Por ello, la realización de balances hídricos en acuíferos es un método de estimación de las extracciones especialmente indicado en acuíferos de gran extensión con un importante grado de explotación que puede ser útil para contrastar las estimaciones obtenidas con otros métodos indirectos. Para mejorar la precisión de las estimaciones es recomendable confrontar los resultados del balance con información complementaria sobre la evolución de la calidad química de las aguas, y las posibles afecciones a otros acuíferos, zonas húmedas y otros puntos de descarga naturales, lo cual requiere disponer de adecuadas redes de control de niveles piezométricos, niveles de agua en zonas húmedas, y calidad química de las aguas.

En este trabajo se presenta una descripción de los métodos convencionales de evaluación de las extracciones a partir de balances en acuíferos y se analizan sus posibilidades, rango de aplicación y limitaciones.

IDENTIFICACIÓN DE LAS EXTRACCIONES Y SUS EFECTOS

El establecimiento de una captación de agua (pozo, dren, galería, etc.) en un acuífero produce un descenso de nivel piezométrico, que es rápido al principio de la extracción y luego cada vez más lento. Al cesar el bombeo los niveles tienden a recuperar su posición inicial, rápidamente al principio y luego más lentamente. Las *figuras 1 y 2* muestran los limnigramas de varios pozos y piezómetros situados en el acuífero del Llobregat en las proximidades de Barcelona (CUSTODIO y LLAMAS, 1983). En la *figura 1* se muestran las oscilaciones del nivel en un piezómetro situado en el acuífero profundo del Delta del Llobregat que indican el efecto de un bombeo próximo con un periodo de funcionamiento para riego por la mañana y otro por la tarde. Este efecto está

superpuesto a las fluctuaciones generales. La *figura 2* muestra la variación de niveles en la misma zona durante tres semanas, observándose el ascenso general de niveles en los domingos debido a la parada de los pozos que funcionan toda la semana en una zona industrial próxima a Barcelona. Por tanto, la existencia de captaciones de agua se traduce en oscilaciones piezométricas que son fácilmente detectables en puntos próximos.

Figura 1. (Tomada de Custodio y Llamas, 1983).

Toda explotación de aguas subterráneas tiene como consecuencia una serie de efectos tales como: (1) descenso de niveles en el entorno de la captación (niveles locales); (2) descenso generalizado de niveles (descensos regionales), especialmente si la explotación es intensa y prolongada; (3) cambios en el esquema de flujo subterráneo; (4) disminución, merma y desaparición de la descarga natural de los acuíferos afectados. Esta disminución de la descarga puede afectar a los caudales de base de ríos, los caudales de manantiales, las descargas al mar, necesarias para prevenir la penetración de cuñas salinas, y a la pervivencia de zonas húmedas. En casos extremos, no solo las descargas pueden desaparecer, sino incluso puede producirse una inversión en el sentido del flujo de forma que un cauce que en condiciones naturales recibe un flujo de base (río ganador) puede pasar a convertirse en un cauce perdedor por infiltración de parte de su caudal (en este caso se habla de recarga inducida o capturada); (5) afección a plantas freatofitas que dependen de la existencia de niveles freáticos someros; y (6) un aumento de la

recarga en acuíferos cautivos en los que el descenso de la superficie freática en su zona de cabecera puede propiciarlo. La explotación intensiva de los recursos subterráneos puede conducir incluso a problemas de calidad química ya sea por procesos de intrusión marina en el caso de acuíferos costeros o por desplazamiento de aguas de pobre calidad química. CUSTODIO (1989) presenta un detallado análisis de los efectos de la sobreexplotación de acuíferos. La identificación y evaluación de las extracciones puede abordarse a partir del análisis de sus efectos.

BALANCES

El balance hídrico consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de contorno. Durante un determinado periodo de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre el total de entradas y el total de salidas debe ser igual al cambio de agua en el almacenamiento. El establecimiento de un balance supone medir flujos de agua (caudales) y almacenamientos (niveles), aunque con una apropiada selección de la región y del período de tiempo, se pueden suprimir algunas medidas y términos (niveles iguales al principio y al final, ausencia de flujo de agua a través de divisorias o de límites impermeables, etc.). Si las entradas superan a las salidas existe una acumulación (aumento del almacenamiento) y lo contrario si las salidas superan a las entradas. Los términos del balance suelen contener errores de medida, de interpretación, de estimación y errores debidos a la evaluación con una metodología poco apropiada. Todos ellos provocan que la ecuación del balance “no cierre” de forma exacta, produciéndose un error de cierre. Es habitual obtener un término del balance, difícil de medir o estimar por otros métodos, como el valor que cierra el balance. Este es el fundamento del método tradicional de obtención de la recarga a partir del balance de agua en un acuífero entre dos fechas determinadas en las cuales se conocen los restantes flujos de entrada y salida (SAMPER, 1997a, b). Es crucial tener en cuenta que la evaluación de la recarga o de cualquier otro término del balance contiene el

Figura 2. (Tomada de Custodio y Llamas, 1983).

error de cierre, cuya magnitud puede ser importante en función de los errores cometidos en la evaluación del resto de los componentes.

Los balances pueden aplicarse al conjunto de toda la cuenca, incluyendo tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas, o bien a cualquiera de las porciones o componentes del ciclo hidrológico. Cuando se realizan balances parciales se debe comprobar la corrección y coherencia de los flujos de agua entre componentes. SAMPER (1997a) describe los detalles de la aplicación de métodos de balance de agua en el suelo. La estimación de la recarga a partir de balances en el acuífero es analizada por SAMPER (1997b). Otros tipos de recarga y otros métodos de evaluación son tratados por otros autores en las actas del Seminario sobre la Evaluación de la Recarga a los Acuíferos organizado por el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (GE-AIH) que tuvo lugar en Las Palmas de Gran Canaria del 27 al 29 de enero de 1997 y que se recogen en una publicación del ITGE (CUSTODIO et al., 1997).

Ecuación General del Balance

En el balance global de una región dada, en un cierto intervalo de tiempo, intervienen los siguientes términos:

- Aportación pluviométrica (incluye la lluvia, la nieve y otras formas de precipitación cuya importancia suele ser despreciable, tales como la condensación y el rocío) : P (+)
- El caudal superficial entrante: Q_{sc} (+)
- El caudal subterráneo entrante: Q_{tc} (+)
- La evapotranspiración real: ETR
- El caudal superficial saliente: Q_{ss} (-)
- El caudal subterráneo saliente: Q_{ts} (-)
- La variación del almacenamiento (diferencia entre el volumen final y el inicial) que debe incluir la variación del agua almacenada (reserva) en los acuíferos, en el suelo, en la zona no saturada, en los lagos naturales y artificiales, en los cauces, en las acumulaciones de hielo y nieve, etc.: ΔV

La suma de entradas menos salidas no es en general igual a la variación de almacenamiento debido a la existencia de un error de cierre del balance, G , por ello, la ecuación del balance es:

$$P + Q_{sc} + Q_{tc} - ETR - Q_{ss} - Q_{ts} \Delta V = \epsilon \quad (1)$$

Algunos de esos términos se pueden eliminar si su valor es cero o muy pequeño, o bien se pueden desglosar en otros varios que consideren diferentes entradas y salidas, varios acuíferos, varias formas de almacenamiento, etc. Dentro de la región es posible definir subzonas en las que se pueden establecer balances parciales que deben encajarse entre sí; tales pueden ser los balances de un cierto acuífero, del suelo, de un lago, etc. En un sistema de grandes dimensiones Q_{tc} y Q_{ts} suelen ser muy pequeños y por ello pueden muchas veces despreciarse, en especial si los límites de la región coinciden con la divisoria de una gran cuenca fluvial en la que no dominen terrenos kársticos.

Balance en acuíferos

La ecuación del balance en un acuífero puede plantearse a muy distintas escalas. De hecho, la ecuación general del flujo subterráneo es la expresión del principio de conservación de masa a escala infinitesimal (en sentido estricto a la escala del volumen elemental representativo). Por unidad de volumen de medio poroso esta ecuación tiene la siguiente expresión:

$$-\nabla \cdot (K \nabla h) + w = s_s \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

en la que K (LT^{-1}) es el tensor de conductividad hidráulica, s_s (L^{-1}) es el almacenamiento específico, h (L) es el nivel piezométrico, ∇ es el operador gradiente y $\nabla \cdot$ la divergencia. En esta ecuación el primer término representa el balance neto de las entradas y salidas en una porción de acuífero de volumen unidad, el término w (T^{-1}) representa el aporte neto asociado a posibles fuentes o sumideros de agua y el término de la derecha representa la variación por unidad de tiempo del volumen de agua almacenada en dicha porción. En la mayoría de los casos el flujo en los acuíferos es fundamentalmente horizontal. La ecuación del flujo en acuíferos se obtiene integrando a lo largo de la vertical la ecuación general del flujo, lo cual conduce a una expresión del tipo:

$$-\nabla \cdot (T \nabla h) + q = s \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

en la que la transmisividad T (L^2T^{-1}) sustituye a la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento s reemplaza al almacenamiento específico, el nivel h representa el nivel existente en un determinado punto de coordenadas (x,y) y q (LT^{-1}) representa el término fuente/sumidero por unidad de superficie horizontal. Este término puede incluir: (1) la entrada de agua a través de la superficie freática (recarga del agua de lluvia y de los retornos de riegos) para acuíferos libres, (2) el goteo hacia o desde otros acuíferos sub o suprayacentes, (3) salidas por extracciones, y (4) entradas por inyección (véase *Figura 3*). Por tanto, el término q puede escribirse como:

$$q = r + g - Q_B \delta(\underline{x}_B) + Q_I \delta(\underline{x}_I) \quad (4)$$

en la que $\delta(\underline{x}_B)$ es la función delta de Dirac, que sólo es no nula en el punto $x = x_B$. Nótese que la ecuación es aplicable a todo punto \underline{x} interior al acuífero. De hecho, se puede integrar espacialmente en cualquier subdominio del acuífero. Integrando en el conjunto del acuífero se obtiene que:

$$-\int_V \nabla \cdot (T \nabla h) dx + \int_V q dx = \int_V s \frac{dh}{dt} dx = -DS - \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

De acuerdo con el teorema de la divergencia, el primer término es igual a la integral de los flujos de entrada (Q_e) o salida (Q_s) a través de los contornos laterales Γ del acuífero,

$$-\int_V \nabla \cdot (T \nabla h) dx = \int_{\Gamma} (Q_e - Q_s) dG \quad (6)$$

En general, los contornos del acuífero se pueden agrupar por tramos y de esta forma, la integral de contorno puede evaluarse como la suma de las entradas menos las salidas en cada uno de los N tramos

$$\sum_{n=1}^N$$

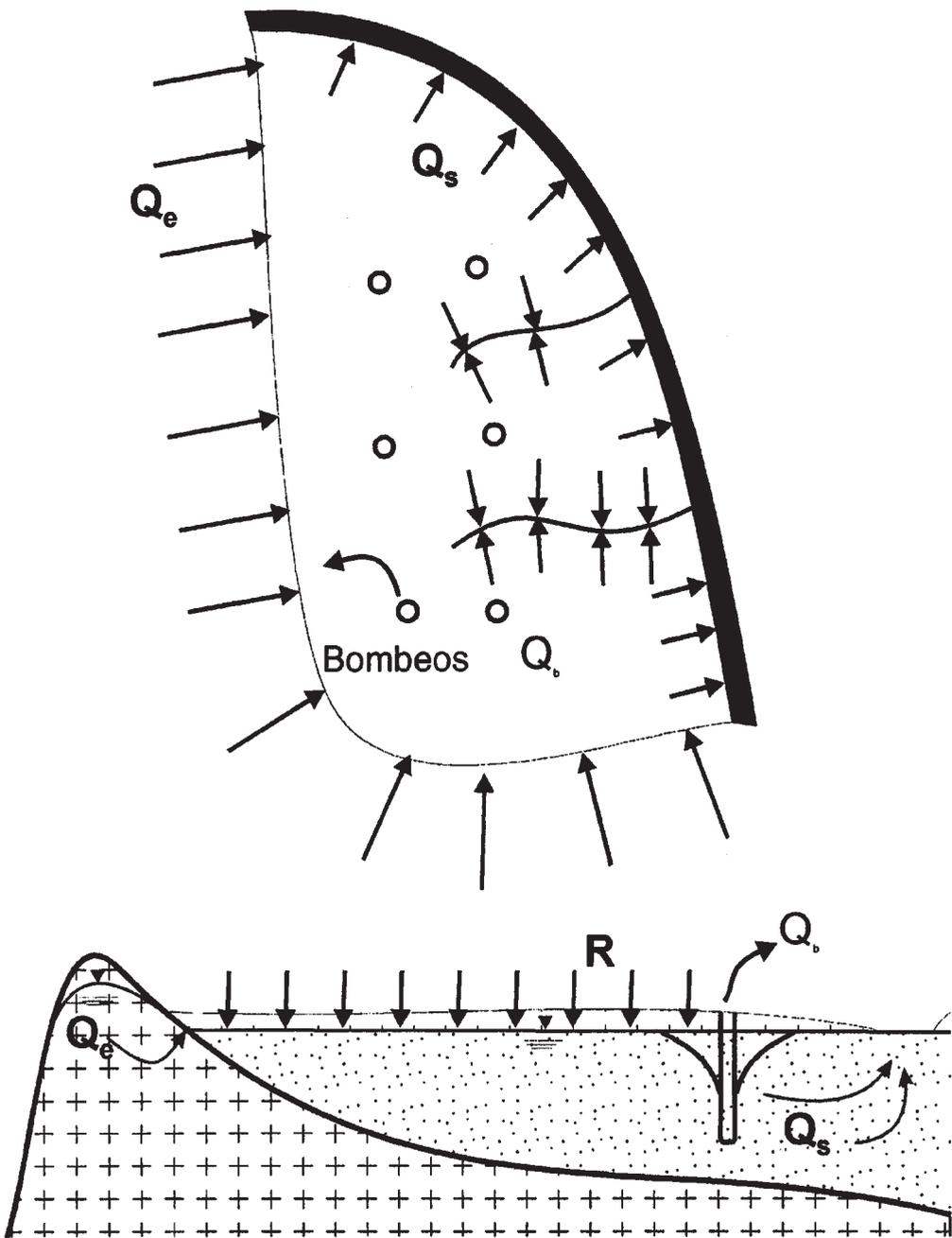


Figura 3. Esquema ilustrativo de las posibles entradas y salidas en un acuífero en régimen de explotación.

$$G(Q_e - Q_s)dG = \sum_{n=1} (Q_e - Q_s) \quad (7)$$

que pueden incluir las entradas por cauces, las pérdidas de lagos y embalses, las entradas a través de los contactos con otras formaciones, las entradas procedentes de la infiltración de la escorrentía de zonas altas de la cuenca, y salidas por manantiales, descargas a ríos, y salidas hacia otros acuíferos (CUSTODIO y LLAMAS, 1983).

El segundo término en (5) representa la tasa de recarga del conjunto del acuífero $R(L^3T^{-1})$

$$R = D_r dx \quad (8)$$

que coincidirá con el producto rA (A es el área del acuífero) si r es espacialmente uniforme. Análogamente se puede definir el goteo total G , la extracción total B y la inyección total I . De esta forma, la Ecuación 4 puede reescribirse como

$$\sum_n (Q_e^n - Q_s^n) + R + G - B + I = D_s \frac{h}{t} dx \quad (9)$$

Esta ecuación representa el balance de las entradas y salidas por unidad de tiempo.

A efectos de realización de balances resulta conveniente integrar esta ecuación en el tiempo. Para ello se selecciona un tiempo inicial t_i y un tiempo final t_f entre los cuales se integra la ecuación y se obtiene

$$(10)$$

Esta ecuación de balance admite aplicaciones muy diversas dependiendo del intervalo de tiempo t transcurrido entre el inicio y el final del balance ($\Delta t = t_f - t_i$).

Valores pequeños de Δt

Para valores pequeños de Δt se puede suponer que los caudales de entrada y salida así como los términos fuente/sumidero son aproximadamente constantes en el tiempo, de forma que las integrales temporales en (10) pueden evaluarse como el producto del caudal por Δt , es decir

$$(11)$$

Si se analiza un episodio de recarga relativamente rápido y se toma como instante inicial el momento en el que comienzan a subir los niveles y como tiempo final el correspondiente al momento en el que los niveles son máximos, Δh se corresponderá con el ascenso máximo del nivel (que puede variar de unos puntos a otros). La entrada por recarga de lluvia $R\Delta t$ predominará sobre otros términos del balance, especialmente si Δt es del orden de unos pocos días. En este caso, la Ecuación (10) se simplifica quedando,

(12)

Puesto que tanto S como Δh pueden variar espacialmente, la integral de la derecha debe evaluarse a partir de sendos mapas de Δh (obtenidos a partir de los hidrogramas de niveles en pozos someros) y S . En la mayoría de los casos suelen tomarse unos valores medios de S y Δh , S y Δh de forma que finalmente la Ecuación (12) se reduce a:

(13)

donde A es el área del acuífero. Esta expresión suele ser utilizada para cuantificar la recarga producida por un episodio de lluvias suficientemente intensas como para generar recarga.

Evaluación de las extracciones a partir de balances

El balance hídrico en el acuífero puede plantearse entre dos fechas en que la superficie freática presenta un descenso medio Δh . Generalmente se suele plantear el balance entre dos periodos de estiaje consecutivos ($\Delta t=1$ año). Si las extracciones no son importantes se puede admitir de forma razonable que el término de variación de almacenamiento es despreciable ($\Delta h \approx 0$). En general, sin embargo, existirá una disminución de reservas, que vendrá dada por el producto del descenso medio Δh , el área del acuífero A y su coeficiente de almacenamiento S (en acuíferos libres el almacenamiento viene dado por la porosidad drenable). Si se adopta $\Delta t=1$ año, la Ecuación (10) se transforma en la ecuación del balance anual de forma que

(14)

donde se utilizan los términos V_e , V_s , V_R , ... para denotar los volúmenes anuales (generalmente en hm^3) de cada una de las componentes (V_e y V_s) de entradas y salidas por los contornos, V_R el volumen de la recarga anual, V_B el de los bombeos y V_G corresponde a las entradas o salidas desde/ hacia otros acuíferos). Esta ecuación puede reescribirse en la forma usual, o sea igualando la suma de las entradas a la suma de las salidas

(15)

De esta forma, el volumen anual de las extracciones se puede obtener a partir del resto de los términos del balance

(16)

donde se ha añadido el término de error de cierre del balance, ϵ , para reconocer que la evaluación de V_B contendrá en general un error debido al hecho de que el resto de los términos del balance también contienen errores.

Para la evaluación de los distintos términos del balance en la Ecuación 16 se pueden utilizar una amplia gama de métodos (CUSTODIO Y LLAMAS, 1983). Una estimación del orden de magnitud de las entradas y salidas por los contornos se pueden obtener mediante la aplicación de

la Ley de Darcy, para lo cual es necesario conocer la transmisividad, el gradiente piezométrico y la longitud de los contornos. Las salidas a cauces y lagos y la posible recarga procedente de los cauces se pueden deducir a partir de aforos en ríos y manantiales. No obstante, la parte correspondiente a la recarga y descarga en los cauces no siempre es de fácil evaluación puesto que los valores a medir son a veces menores que el margen de error de los aforos. SAHUQUILLO (1997) presenta una descripción detallada de otros posibles métodos para evaluar la recarga procedente de cauces y torrentes.

El método tradicional para evaluar las entradas por recarga artificial e inyección y las salidas por extracciones se basa en la realización de un inventario de estas actividades. Es muy importante tener en cuenta que raras veces una extracción de aguas subterráneas es totalmente consuntiva, lo cual sólo sucede cuando existe una exportación a otras cuencas o se produce el vertido directamente al mar. Por lo tanto hay que considerar el retorno de las aguas utilizadas no consumidas a los acuíferos o su integración en los caudales de aguas superficiales. Ello supone establecer las oportunas eficiencias de riego, infiltración de canales y de desagües, etc. Una revisión de los métodos de evaluación de la recarga producida por los retornos de riego y fugas de canales puede consultarse en GIRÁLDEZ Y LÓPEZ (1997). En zonas urbanas se debe considerar que las fugas de la red de distribución no son nunca despreciables y pueden constituir una recarga importante, lo mismo que las redes de saneamiento, según el tipo de red y la posición del nivel freático; la recarga en tormentas, si la red es unitaria, puede ser importante mientras duren los elevados caudales y sobre todo mientras ciertos tramos estén en carga (CARRERA, 1997).

El término de variación de almacenamiento $S\Delta h$ es especialmente relevante en acuíferos libres. Su evaluación requiere disponer de datos de la porosidad drenable en la zona de oscilación de los niveles y de la magnitud y distribución espacial de las oscilaciones freáticas. Las limitaciones, incertidumbres y problemas que plantea la evaluación de este término son abordadas por SAMPER (1997b). Por un lado, la porosidad drenable puede presentar una gran variabilidad dependiendo de la profundidad del nivel freático. Por otro lado, la correcta cuantificación de Δh a partir de las oscilaciones freáticas presenta numerosas dificultades (CUSTODIO Y LLAMAS, 1983). Algunas son debidas a las inadecuadas características del sondeo o pozo de observación. De acuerdo con SAMPER (1995) es necesario disponer de adecuadas redes de control piezométrico para poder establecer de forma inequívoca la evolución de los acuíferos, especialmente en aquellos sometidos a una explotación considerable. En otros casos, las medidas piezométricas pueden estar afectadas por toda una serie de factores perturbadores (véase Cap. 8.6 de CUSTODIO Y LLAMAS, 1983) tales como la afección de mareas, oscilaciones de nivel en lagos o embalses próximos, efectos de bombeos próximos (efectos dinámicos), etc.

La evaluación de las extracciones también puede abordarse tomando como referencia las condiciones existentes en el acuífero previamente al inicio de las extracciones. En condiciones naturales suele existir un régimen cuasi-estacionario en el cual, en periodos suficientemente largos, se puede establecer que las entradas medias al sistema, R_0 , coinciden con las descargas naturales, D_0 , de forma que, a pesar de las fluctuaciones estacionales y anuales, en grandes periodos de tiempo, el total de la alimentación o recarga coincide con el total de la descarga:

$$R_0 - D_0 = 0 \quad (17)$$

La *figura 4* muestra el esquema de un acuífero en condiciones naturales así como los dos principales efectos de las extracciones de agua mediante captaciones: (1) el descenso de niveles que provoca la disminución del volumen de agua en el acuífero, ΔV , respecto al volumen medio almacenado en condiciones naturales, V_0 , y (2) la disminución de las descargas ΔD . En régimen de explotación, la ecuación del balance vendrá dada por

$$R_t - D_t - B = V_f - V_0 = -\Delta V \quad (18)$$

donde V_f es el volumen almacenado en régimen de explotación y B es la magnitud de las extracciones. Si las extracciones son considerables y se prolongan durante periodos de tiempo suficientemente largos de forma que el descenso de niveles se propague hasta los límites del acuífero, se produce una disminución progresiva en las salidas subterráneas por los puntos naturales de descarga, ΔD .

$$\Delta D = D_0 - D_t \quad (19)$$

Por otro lado, en régimen de explotación las entradas, R_t pueden aumentar

$$DP = R_t - R_0 \quad (20)$$

Sumando a la Ecuación 18 la Ecuación 17 cambiada de signo y teniendo en cuenta (19) y (20), se obtiene

$$(21)$$

Despejando el término B , finalmente se deduce que

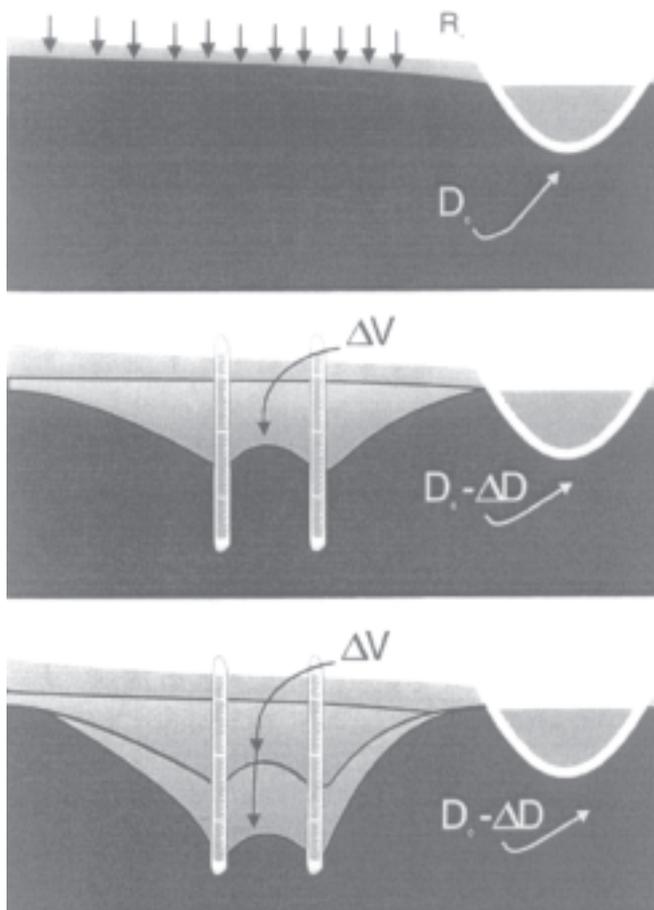
$$(22)$$

Esta ecuación refleja que en términos globales, en un acuífero en explotación, las extracciones de agua pueden provenir de una combinación de las tres siguientes fuentes: 1) un aumento de las entradas de agua (recarga inducida), 2) una disminución de las descargas en los puntos de salida naturales y 3) una disminución de las reservas. La contribución de cada una de ellas es variable en función de las características del acuífero y del régimen y distribución espacio-temporal de las extracciones. En ciertos casos la recarga inducida puede no ser relevante. La importancia relativa de los otros dos términos, ΔD y ΔV , varía con el tiempo. En acuíferos libres como el de la Figura 4 en las fases iniciales de la explotación predominará la disminución de las reservas hasta el momento en el que los descensos afecten a las zonas de descarga. El término ΔD irá creciendo progresivamente mientras que ΔV disminuirá. Eventualmente, se puede alcanzar una situación de equilibrio o régimen estacionario en el cual $\Delta V = 0$. En estas condiciones de explotación se cumplirá:

$$(23)$$

Nótese que para que poder alcanzar esta situación de estabilización de niveles y reservas, las extracciones no pueden exceder del valor máximo del término $(\Delta R + \Delta D)$. Puesto que el valor

máximo de ΔD es D_0 , que de acuerdo con (17) es igual a R_0 , el valor máximo de B_{equil} , viene dado por la magnitud del total de la recarga natural del acuífero (lo que normalmente se conoce como los recursos del acuífero) más todas las recargas inducidas que pueda propiciar el propio régimen de explotación.



La Ecuación 22 proporciona una expresión que permite evaluar el conjunto de las extracciones de un acuífero. Esta ecuación es similar a la del balance de entradas y salidas (Ecuación 16). Sólo difiere en la forma de expresar los términos del balance.

Figura 4. Esquema ilustrativo de un acuífero en condiciones naturales (figura superior) y en régimen de explotación. En condiciones naturales las entradas, R_0 , coinciden con las descargas, D_0 . Las extracciones de agua provocan la disminución del volumen de agua en el acuífero, ΔV , y la reducción de descargas ΔD .

UTILIZACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE FLUJO EN ACUÍFEROS

Algunas de las limitaciones de los balances clásicos en acuíferos se pueden soslayar si el balance se realiza mediante un modelo numérico de simulación del flujo. La construcción de un

modelo razonablemente válido requiere en general disponer de: (1) una detallada caracterización geológica y geofísica del acuífero, (2) una piezometría espacial suficientemente densa, con hidrogramas de niveles completos, una buena base de parámetros hidrogeológicos (transmisividad y coeficiente de almacenamiento), (3) una adecuada caracterización hidroquímica e isotópica ambiental, y (4) la correcta identificación de la geometría, el tipo y las condiciones de los contornos del acuífero. En estas condiciones es posible deducir las extracciones como parámetros de la calibración del modelo de flujo. Dicha calibración puede realizarse por tanteos (lo cual suele limitar considerablemente el número de pruebas) o bien utilizando modelos de calibración automática (que permiten realizar más pruebas en menos tiempo), algunos de los cuales han sido desarrollados en universidades españolas (CARRERA & NEUMAN, 1986; MEDINA y CARRERA, 1996). La utilización de este tipo de métodos proporciona una alternativa de análisis cuantitativo especialmente valiosa en acuíferos complejos. No obstante, su utilización conlleva una serie de riesgos que a veces no son adecuadamente tratados. La descripción del proceso de modelación numérica del flujo en acuíferos, puede encontrarse en SAMPER (1997b).

Para ilustrar el potencial de los métodos numéricos para evaluar las extracciones y sus efectos en los descensos de niveles y en la reducción de las descargas subterráneas, se utilizará el ejemplo de la *figura 5* que corresponde a un acuífero libre monocapa de 400 km² de extensión. En condiciones naturales el acuífero tiene una recarga por infiltración de la lluvia de 50 mm/año que equivalen a 20 hm³/año. Se consideran dos supuestos respecto a posibles entradas laterales procedentes de un acuífero situado en la parte occidental. En el primer supuesto (modelo 1) estas entradas laterales suponen 10 hm³/año. El modelo 2 supone que estas entradas son despreciables. Aunque el ejemplo es sintético, sus datos y parámetros (véase *tabla 1*) corresponden a los del Sistema Acuífero nº 23 de la Mancha Occidental (ITGE, 1989).

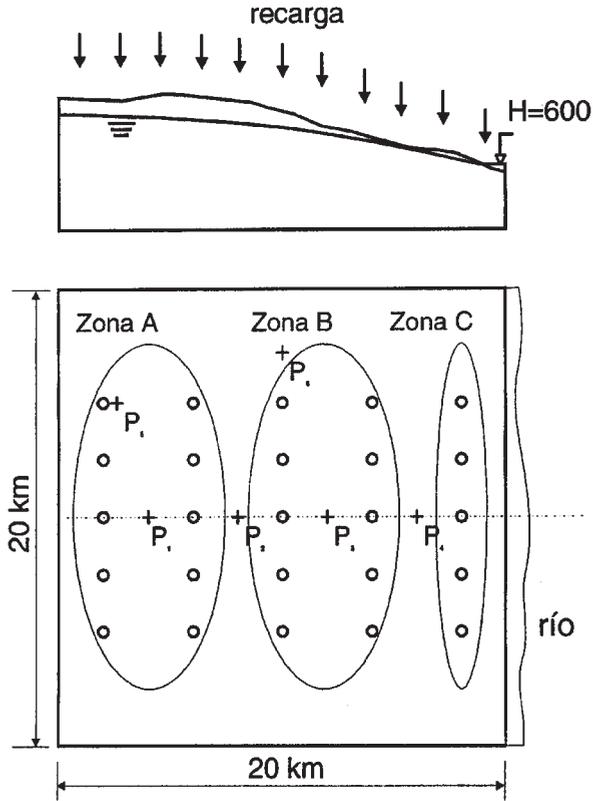
CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

Transmisividad	1000 m ² /día
Porosidad drenable	0.05
Espesor	250 m
Área 20 x 20 km ²	400 km ²
Recarga natural	50 mm/año (20 hm ³ /año)

COMPONENTES DEL BALANCE (hm³/año)

	MODELO 1	MODELO 2
Recarga natural	20	20
Entradas laterales por el contorno	10	0
Salidas al río en condiciones naturales	-30	-20
Extracciones en la Zona A (desde t=0)	-15	-15
Retornos de riego (10%)	+1.5	+1.5
Extracciones en la Zona B (desde t=10 años)	-15	-15
Retornos de riego (10%)	+1.5	+1.5
Extracciones en la Zona C (desde t=20 años)	-10	-10

GEOMETRÍA, BOMBEO Y PUNTOS DE OBSERVACIÓN



RÉGIMEN DE EXTRACCIONES

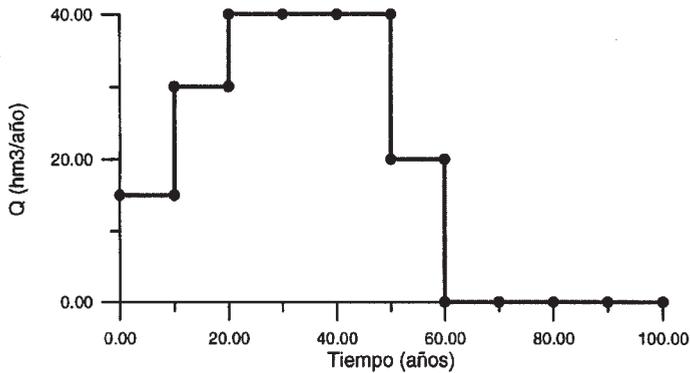


Figura 5. Características del acuífero con la ubicación de las zonas y pozos de bombeo.

Retornos de riego (10%)

+1

+1

Tabla 1. Datos del ejemplo numérico. Las zonas de riego se muestran en la figura 5.

En condiciones naturales el acuífero descarga en un cauce situado a cota 600. En una determinada fecha se pone en desarrollo el regadío de la zona A (Figura 5) que consta de 10 pozos cuya extracción anual supone 15 hm³/año. Los pozos sólo funcionan durante 5 meses. Se supone que un 10 % del volumen bombeado retorna al acuífero. Al cabo de 10 años se desarrolla la zona B de similares características pero situada más próxima al cauce. Con las extracciones de estas dos zonas, la extracción total (30 hm³/año) es igual a la magnitud de los recursos del acuífero. Finalmente, al cabo de 20 años entran en funcionamiento los 5 pozos de la zona C que extraen 10 hm³/año. El conjunto de las tres zonas de regadío funcionan durante 30 años. Al cabo de este tiempo, se supone que los bombeos se reducen a la mitad y después de otros 10 años se abandona el regadío.

La simulación numérica del flujo en el acuífero se realizó mediante un potente programa de elementos finitos desarrollado en la Universidad de La Coruña por JUANES (1997). Aplicaciones del código pueden verse en JUANES et al. (1997).

La figura 6 muestra la evolución de las salidas subterráneas al río para los dos modelos considerados. En el modelo 1 se supone que las entradas laterales son de 10 hm³/año. En este

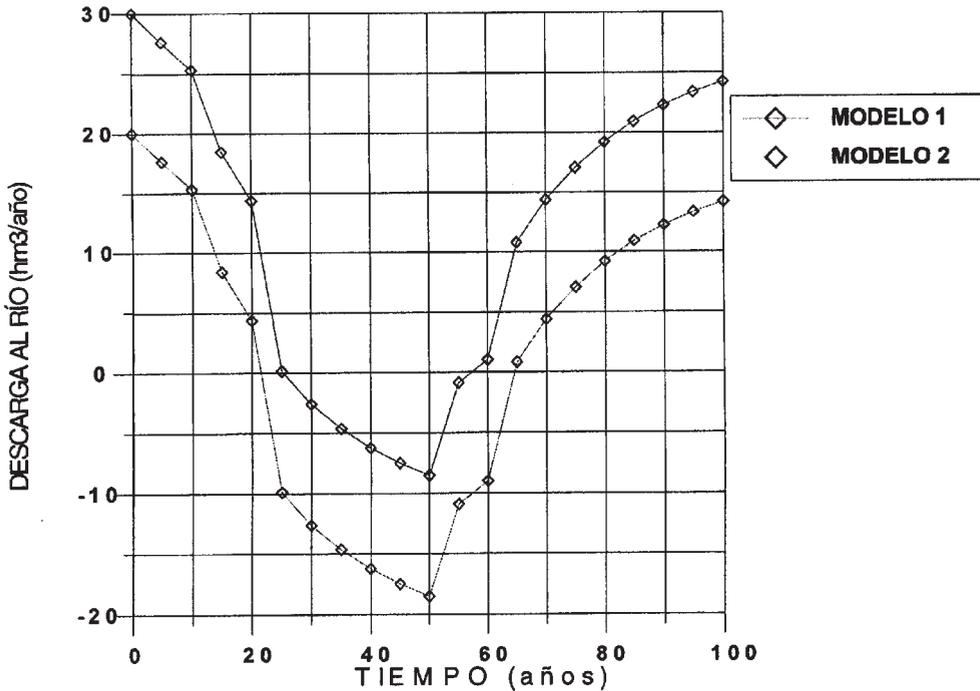


Figura 6. Evolución de las descargas totales al cauce (hm³/año) a lo largo del periodo de explotación (hasta 60 años) y del cese de las mismas.

caso las descargas naturales ($t=0$) son iguales a $30 \text{ hm}^3/\text{año}$. Después de 10 años de explotación, durante los cuales se han explotado 150 hm^3 ($15 \text{ hm}^3/\text{año}$), la descarga al río pasa de 30 a $25 \text{ hm}^3/\text{año}$. Es decir, sólo disminuye la descarga en $5 \text{ hm}^3/\text{año}$, $\Delta D = -5 \text{ hm}^3/\text{año}$. En este periodo el volumen detraído del cauce es de 25 hm^3 . El resto del agua bombeada proviene del almacenamiento. Por tanto, a los 10 años el volumen detraído al cauce sólo representa un 16% del volumen bombeado. Al cabo de 20 años, cuando ya están funcionando las zonas A y B con una explotación conjunta de $30 \text{ hm}^3/\text{año}$, las descargas al cauce se reducen a $15 \text{ hm}^3/\text{año}$ (es decir, la mitad de las descargas naturales). En los 20 años, el volumen total detraído del cauce es 75 hm^3 que también representa el 16 % del volumen total bombeado en este periodo (450 hm^3). En la *Tabla 2* se resumen los resultados del balance al cabo de 10 y 20 años. Puede verse en la *Figura 6* que el acuífero deja de descargar (se anulan las salidas) al cabo de 25 años. Puesto que las extracciones continúan a un ritmo de $40 \text{ hm}^3/\text{año}$ superior a los recursos, las descargas no sólo no se anulan, sino que se comienza a producir una descarga inducida, es decir, el cauce pasa a ser ganador. Esta es una hipótesis que en la realidad debería ser contrastada para verificar si efectivamente en el cauce existen recursos que se puedan infiltrar como recarga inducida. Al cabo de 50 años esta recarga inducida supone algo más de $10 \text{ hm}^3/\text{año}$. Después de 50 años, cuando decrecen las extracciones, las descargas comienzan a aumentar. Nótese que incluso 40 años después de haber cesado las extracciones, no se han recuperado todavía las descargas naturales.

Este resultado tiene una notable trascendencia, ya que indica que al igual que existe una larga inercia hasta que se notan los efectos de las extracciones, también hay un gran retraso en la recuperación de las condiciones iniciales.

	10 años	20 años
Recarga natural	+ 300	+ 600
Volumen bombeado	- 150	- 450
Retorno de riego	+ 15	+ 45
Volumen detraído del cauce	+ 25	+ 75
Disminución de reservas	+ 110	+ 330

Tabla 2. Componentes del balance al cabo de 10 y 20 años de comenzar las extracciones.

Para evaluar el efecto de un periodo de sequía prolongado, en el modelo 3 se analiza la evolución del sistema cuando en el periodo comprendido entre los años 20 y 30 se produce una sequía que reduce la recarga a la tercera parte y que provoca que los bombeos se intensifiquen, aumentando en un 50 %. La *figura 7* muestra la evolución de niveles en un punto de observación situado entre las zonas B y C (véase *figura 5*). En esta figura puede apreciarse cómo a las oscilaciones freáticas anuales se superpone la tendencia general de descenso del nivel freático. En los 10 primeros años el descenso total es del orden de 2 m. Al cabo de 20 años el descenso ha crecido hasta 9 m, a razón de 0.7 m/año . En la figura se compara la evolución de niveles con y sin el efecto de la sequía. En el supuesto de 10 años secos (modelo 3) los descensos son mayores (del orden de 6m) y también son mayores las oscilaciones estacionales.

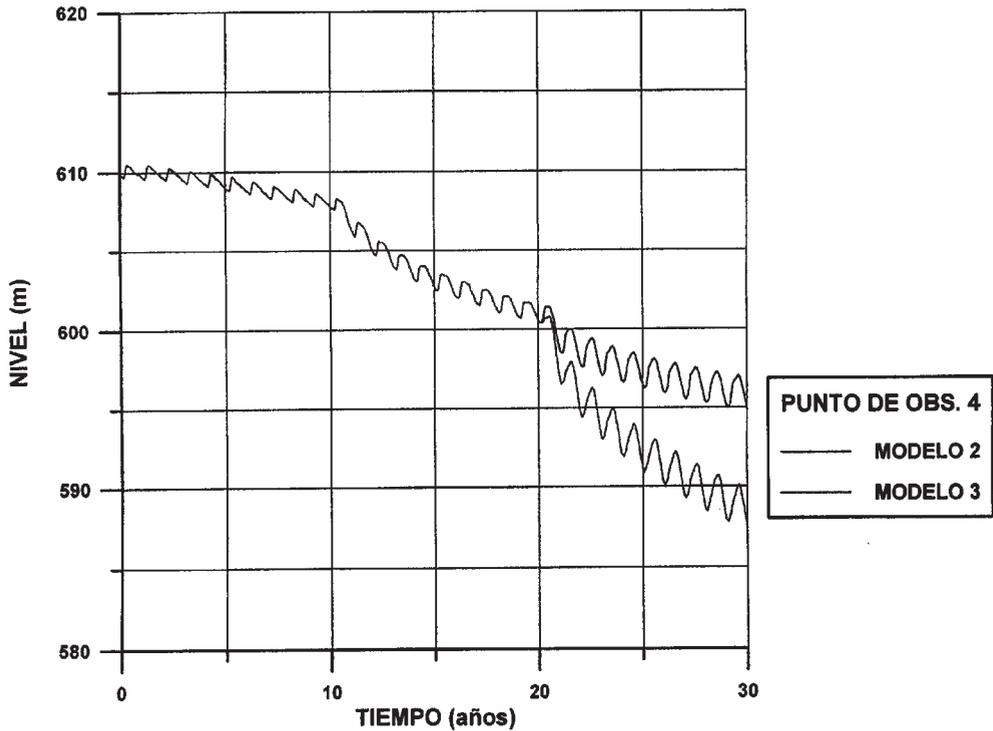


Figura 7. Evolución de niveles en el punto de observación n° 4 situado entre las zonas B y C de riego (ver figura 5).

ERRORES, INCERTIDUMBRES Y APLICABILIDAD

Errores y fiabilidad

Cuando existen errores de medida de una variable P , el valor medido P_m se relaciona con el real P_r a través de

$$P_m = P_r + \epsilon_p \quad (24)$$

Este error ϵ_p suele expresarse a veces en términos relativos (como una fracción del valor de la variable):

$$(25)$$

donde e_p es el error relativo. Sea σ_p^2 la varianza del error de medida y sea S_p^2 la varianza del error relativo e_p .

Suponiendo que las extracciones B se pueden calcular como la suma de la disminución de las reservas ΔV y la disminución de las descargas ΔD ,

$$B = \Delta V + \Delta D \quad (26)$$

las varianzas de los errores en B, σ_B^2 y S_B^2 vienen dadas por

$$(27)$$

$$(28)$$

donde $\sigma_{\Delta V}^2$, $\sigma_{\Delta D}^2$, $S_{\Delta V}^2$ y $S_{\Delta D}^2$ son las varianzas de los errores de medida de las variables ΔV y ΔD . Despejando ΔV a partir de (26) y sustituyendo en (28) se deduce que

$$(29)$$

donde λ es la relación $\Delta D/B$. A partir de esta expresión se deduce que la varianza del error de las extracciones presenta un mínimo que corresponde al caso en el que

$$(30)$$

En la *figura 8* se muestra la variación del error relativo en las extracciones B en función del parámetro λ para diferentes valores de la precisión relativa de ΔD y ΔV ($S_{\Delta D}^2$, $S_{\Delta V}^2$). Se observa que cuando una de las dos componentes (ΔD y ΔV) es predominante, por ejemplo, cuando las extracciones provienen casi enteramente de la reducción de las reservas, es decir $B \approx \Delta V$, el error relativo de las extracciones coincide prácticamente con el de la reducción de las reservas ΔV . También puede verse que en todos los casos existe un mínimo, que puede llegar a ser menor que cualquiera de los otros dos $S_{\Delta D}^2$, $S_{\Delta V}^2$. De hecho este mínimo es tanto más acusado cuanto más similares son las magnitudes de ΔD y ΔV . Una conclusión importante que se deduce del análisis de esta figura es que la precisión relativa de las extracciones, cuando su magnitud se deduce a

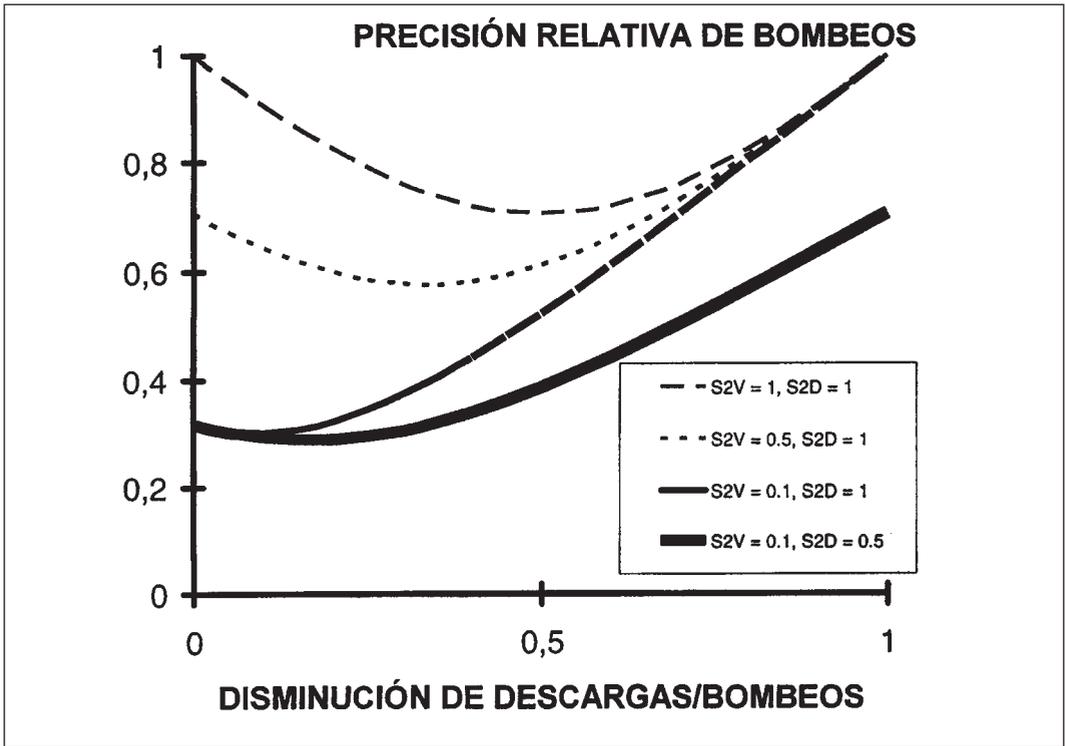


Figura 8. Variación de la precisión relativa de los bombeos S_b^2 en función del cociente $\Delta D/B$ para distintos valores de la precisión relativa de ΔD y ΔV ($S_{\Delta D}^2, S_{\Delta V}^2$).

partir de la reducción de las reservas y de las descargas, puede mejorar respecto a la precisión relativa de ΔD y ΔV . Esta mejora es tanto mayor cuanto más parecidas son las magnitudes de ΔD y ΔV . Es decir, el método de balance tiene mayor fiabilidad en acuíferos en los que el régimen de explotación esté simultánea una disminución comparable a la disminución de las reservas.

Para ilustrar la magnitud de los errores estimaciones de la extracción anual B a partir de los valores anuales de ΔV y ΔD , el que (valores en hm^3):

provocando de forma noción de las descargas de las reservas.

partir de los valores considerese el caso en

para el cual

y por tanto

es decir, el error de estimación de la descarga tiene una desviación típica de magnitud igual al 28.2% de la extracción que es menor que la de ΔV y ΔD . Suponiendo una distribución estadística de tipo normal, podría establecerse que el intervalo de confianza del 95% para las extracciones sería

que representa un amplio margen de valores.

Cuando la extracción se evalúa mediante balances en el acuífero, el valor de la extracción resulta ser una función en general no lineal de una serie de parámetros P_1, P_2, \dots, P_{Np} , y de una serie de variables. En general, por tanto se puede establecer que

(31)

La incertidumbre de la extracción debida a errores en los datos de partida y en los parámetros puede ser calculada a partir de la expresión (31). Sea B^* la extracción correspondiente a unos determinados valores de los parámetros P_i^* y de las variables V_j^* . Estos valores de referencia, P_i^* y V_j^* , suelen corresponder a los datos y parámetros deducidos al final de la calibración. Suponiendo que la extracción varía de forma continua, el desarrollo en serie de Taylor de primer orden permite relacionar de forma aproximada la extracción B correspondiente a valores de P_i y V_j diferentes a los de referencia, de forma que

(32)

donde $\frac{\partial B}{\partial P_i}$ y $\frac{\partial B}{\partial V_j}$ representan la sensibilidad de la extracción a las variaciones del parámetro

P_i y de la variable v_j , respectivamente. Sean ϵ_{P_i} y ϵ_{V_j} los errores en los parámetros y variables y sean $\sigma_{P_i}^2$ y $\sigma_{V_j}^2$ sus correspondientes varianzas. Una aproximación de primer orden del valor de la varianza del error de la extracción se obtiene a partir de (32) mediante:

(33)

donde se ha supuesto que los errores en P_i y V_j son independientes entre sí. El análisis de errores o análisis de sensibilidad permitirá detectar las variables cuyos errores tienen un mayor efecto en el error de la recarga. Estas variables son las que convendrá estimar mejor. El análisis de errores, sin embargo, carece totalmente de sentido cuando el modelo conceptual es erróneo. En este sentido es conveniente contrastar los valores de las extracciones obtenidos con distintos métodos.

Aplicabilidad

La evaluación de las extracciones mediante la realización de balances en acuíferos presenta las siguientes características:

1. Proporciona una estimación del volumen total extraído en una amplia zona, que puede corresponder a todo un acuífero o solamente a un sector del mismo. Por tanto, es aplicable a escala regional y para la estimación del conjunto de todas las extracciones.
2. La fiabilidad de la estimación de las extracciones depende de la fiabilidad de las estimaciones del resto de las componentes del balance (entradas por recarga de lluvia y retornos de riego, entradas y salidas por los límites, entradas y salidas desde otros acuíferos, y la variación de almacenamiento). La evaluación de estas componentes, especialmente de la recarga, presenta dificultades y en general comporta incertidumbres considerables. Por ello, la estimación de las extracciones, en general, puede contener una elevada incertidumbre. Esta incertidumbre, no obstante, se puede reducir notablemente si se dispone de una adecuada caracterización hidrogeológica de la zona y de una buena base de datos históricos sobre la evolución hidrodinámica e hidroquímica del sistema durante la fase de explotación de sus recursos subterráneos. Este es un motivo por el cual se deben mantener unas adecuadas redes de control piezométrico, de caudales y de calidad química. Cuando las extracciones se deducen a partir de la estimación de la reducción de las reservas ΔV y de las descargas ΔD , la precisión relativa de las extracciones puede mejorar respecto a la precisión relativa de ΔD y ΔV . Esta mejora es tanto mayor cuanto más parecidas son las magnitudes de ΔD y ΔV . Es decir, el método de balance tiene mayor fiabilidad en acuíferos en los que el régimen de explotación esté provocando de forma simultánea una disminución de las descargas comparable a la disminución de las reservas.
3. La aplicación del método no requiere tecnologías especializadas y costosas ni precisa ser contrastado mediante campañas de campo. Puede ser llevado a cabo por hidrogeólogos con una sólida formación y experiencia. Su aplicación solo requiere disponer de una adecuada caracterización hidrogeológica e hidroquímica del acuífero (ya disponible para la mayoría de los acuíferos de España). Si además se dispone de datos históricos sobre la evolución hidrodinámica del sistema será posible mejorar notablemente la fiabilidad de la estimación de las extracciones. En resumen, se trata de un método fácilmente aplicable (la información que requiere está -o debería estar- disponible en la mayoría de los casos en los Organismos de Cuenca) y con un coste de ejecución muy reducido ya que puede ser realizado por los técnicos de la propia administración.
4. La realización de balances hidrológicos es una tarea que forma parte tanto de la planificación

como de la explotación y gestión de un sistema de recursos hídricos. Puesto que la evaluación de las extracciones a partir de estos balances es un método de aplicación rutinaria, debería ser útil para contrastar los resultados obtenidos con otros métodos directos e indirectos más costosos y laboriosos.

AGRADECIMIENTOS

Algunos aspectos relevantes de este trabajo han sido desarrollados parcialmente en el marco de Proyectos de Investigación financiados por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyectos AGR89-146-C02-01, AMB95-0997-C02-01 y HID98-282), así como por diversos proyectos de I+D financiados por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA). Las opiniones y puntos de vista expresados en este trabajo son los de su autor y no los de la AIH-GE. El autor quiere agradecer al Comité Organizador por su invitación a participar en estas Jornadas. Quiero agradecer además a los profesores E. Custodio, A. Sahuquillo y R. Llamas que con sus sugerencias y las discusiones mantenidas contribuyeron a mejorar la calidad final de esta modesta contribución. Para la preparación del ejemplo numérico se ha contado con la inestimable colaboración de Rubén Juanes, becario doctoral de grupo de hidrología de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad de La Coruña. También han colaborado R. Juncosa y Ll. Huguet en la preparación de las figuras y M. Vázquez en la edición del texto.

REFERENCIAS

- CARRERA, J. (1997). Observación y medida de la recarga (descarga) a partir de aguas superficiales y conducciones, transferencias y fugas. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE. E. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper editores, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. pp. 229-245.
- CARRERA, J. & NEUMAN, S.P.(1986). Estimation of aquifer parameters under transient and steady-state conditions. *Water Resour. Res.*, 22(2), pp. 199-210.
- CUSTODIO, E. (1997). Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper editores, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, pp. 19-40.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega, Barcelona, 2 Vols. 2450 pp.
- CUSTODIO, E. (1989). Consideraciones sobre la sobreexplotación de acuíferos en España. En: *La Sobreexplotación de Acuíferos*. Almería, AIH-GE. Madrid, 43-64.
- CUSTODIO, E., M.R. LLAMAS y J. SAMPER, editores (1997). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Textos del Seminario celebrado en Las Palmas de Gran Canaria en enero de 1997 y organizado por la AIH-GE. Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 455 pp.
- GIRÁLDEZ, J.V. & J. J. LÓPEZ (1997). Evaluación de la recarga derivada de acciones antrópicas: regadíos,

canales, conducciones, embalses y depósitos. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE. E. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper editores, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. pp. 141-152.

ITGE, (1989). Mancha Occidental Sistema Acuífero N° 23. Serie: Manuales de Utilización de Acuíferos.

JUANES, R. (1997). TRANMEF: Un Código para la Modelización Tridimensional de Flujo y Transporte. Proyecto Técnico, E.T.S. Ing. de Caminos, Universidad de A Coruña, 250 pp+listados.

JUANES, R; SAMPER, J. y MOLINERO, J. (1997). Modelización Numérica tridimensional de flujo de agua y transporte de solutos y calor en medios porosos y fracturados. VII Congreso de Geoquímica, Soria, Ed. CEDEX, 119-126.

MEDINA, A. & CARRERA, J. (1996). Coupled estimation of flow and solute transport parameters. *Water Resour. Res.* 32(10): 3063-3076.

SAMPER, J. (1995). Las redes de observación y control de las aguas subterráneas en España: Estado actual, necesidades y perspectivas. En: Jornadas sobre Las Aguas Subterráneas en la Ley de Aguas Española: Un Decenio de Experiencia. Ed. AIH-GE. Murcia, pp. 363-385, Vol.1.

SAMPER, J. (1997a). Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balances de agua: utilización, calibración y errores. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE. E. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper editores, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. pp. 41- 79.

SAMPER, J. (1997b). Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE. E. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper editores, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. pp. 153-180.