

Modelo de flujo en un acuífero costero. Una aproximación a la evaluación de actuaciones frente a la intrusión marina

J.G. Heredia Díaz⁽¹⁾, J.M. Murillo Díaz⁽²⁾, J.L. García Aróstegui⁽³⁾,
J.C. Rubio Campos⁽⁴⁾ y J.A. López Geta⁽²⁾

(1) Consultor Independiente. C/. Santo Angel, 81 - 28043 Madrid
E-mail: jheredia@ciccp.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España. Sede Central. C/. Ríos Rosas, 23 - 28003 Madrid
E-mail: lopezgeta@igme.es y jm.murillo@igme.es

(3) Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de Murcia. Avda. Alfonso X El Sabio, 6 - 30008 Murcia
E-mail: murcia@igme.es

(4) Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de Granada. Urb. Alcázar del Genil, 4 , Edif. Zulema - 18006 Granada
E-mail: granada@igme.es

RESUMEN

La unidad hidrogeológica 06.22 "Río Verde" es un acuífero aluvial de reducidas dimensiones. Situado en la costa de la provincia de Granada, históricamente se desarrolló sobre el mismo una agricultura que cubría sus necesidades hídricas con recursos superficiales. El acuífero era excedentario, existiendo en su línea de costa una serie de descargas difusas. En los años setenta de la pasada centuria, la sustitución de los cultivos tradicionales y, conjuntamente, el desarrollo de una actividad turística en continuo crecimiento trajo aparejado un fuerte incremento de la demanda hídrica estacional. Así, los recursos superficiales resultaron escasos y comenzó una explotación cada vez más importante de los limitados recursos subterráneos, produciéndose déficits estivales. Ello provocó, a partir de la posterior década de los ochenta, la aparición de fenómenos estacionales de intrusión marina. La notable magnitud que estos alcanzan se debe tanto a la importancia de las extracciones como a las características del acuífero.

La repercusión socio-económica del deterioro de la calidad de las aguas del acuífero de río Verde ha motivado que el mismo fuera objeto de numerosos estudios y que se elaboraran varios modelos numéricos; algunos de ellos se emplearon en el estudio de distintas acciones para afrontar el fenómeno de intrusión. Este trabajo describe la calibración de un modelo en régimen estacionario de los aluviales de los ríos Verde y Seco y tres simulaciones en régimen estacionario de dos opciones de emplazamiento de recarga artificial del acuífero y la reducción del caudal circulante en el río Verde que causaría la futura presa de Otívar. El régimen estacionario representado corresponde a la situación media del período plurianual más seco del que se poseen registros piezométricos. El contraste de los efectos de las dos opciones de recarga tiene como objeto la selección del emplazamiento más efectivo para enfrentar al fenómeno de intrusión marina. El análisis de los tres escenarios simulados es parcial al efectuarse los mismos en régimen estacionario. Una información deficiente de la complejidad del sistema real y la elección de un período de estudio climatológicamente extremo imposibilitaron la representación numérica del sistema en régimen transitorio.

Palabras clave: impacto ambiental, intrusión marina, modelo de flujo, recarga artificial, Río Verde

Flow model in a coastal aquifer. An approach to evaluate the actions to face seawater intrusion

ABSTRACT

The hydrogeologic unit 06.22 "Río Verde" is an alluvial aquifer of small dimensions. It's located in the coast of Granada province and, historically, the agriculture practised had covered its water necessities from surface resources. The aquifer had water exceed and a set of diffuse discharges were located along the coastal line. During the seventies of the last century both the substitution of traditional crops and the important development of tourist activities produced a strong increase of the seasonal water demand. Therefore the surface resources weren't enough and an exploitation of the limited ground water resources began with a summery deficit associated. During the eighties, this new situation produced the appearance of a seasonal seawater intrusion phenomena. The great magnitude that these intrusion can reach is due both the magnitude of the pumping and the characteristics of the aquifer.

The socio-economical impact of the quality decrease of the río Verde aquifer water has induced the elaboration of numerous studies and several numeric model, some of them were used to search the proper action to face the seawater intrusion. This work describes the cali-

bration of a stationary regime model of the alluvial aquifer of Verde and Seco rivers and three stationary simulations of two options of emplacement of artificial recharge and the flow reduction in the Verde river that it will be produced by the future Otívar dam. The stationary regime represent the average situation of the driest pluri-annual period with piezometric data. The comparison of effects induced by the two different recharge options is done in order to select the more efficient emplacement to face the seawater intrusion. The analysis of these three sceneries is limited since the simulations were performed in stationary regime. A deficient information of the complexity of the real system and the selection of a period with extreme climatology prevented the numeric representation of the aquifer system in transitory regime.

Key words: artificial recharge, environmental impact, flow modelling, Río Verde, seawater intrusion

Introducción

La Unidad Hidrogeológica 06.22 "Río Verde" se sitúa en el litoral de la provincia de Granada (*Costa Tropical*). Este acuífero está compuesto por los depósitos aluviales de los ríos Verde y Seco, con una superficie de 5.5 km², de los que 4.2 km² corresponden al aluvial del río Verde y el resto, 1.3 km², al del río Seco (Fig. 1). Ambos aluviales presentan un mayor desarrollo en sus tramos bajos, los cuales se ponen en contacto al norte de la ciudad de Almuñécar. Estos depósitos han dado lugar a fértiles vegas, en un enclave climáticamente privilegiado, en el que se han asentado diferentes culturas a lo largo de los tiempos.

Hasta la década de los setenta de la pasada centuria, el volumen de agua superficial derivada por las acequias de riego era suficiente para satisfacer las necesidades de los cultivos tradicionales (caña de azúcar y hortícolas) sin hacer apenas uso del agua subterránea. En aquella época, en la franja costera de la desembocadura del río Verde, todavía existían zonas pantanosas, así como pozos -ejecutados entre 1970 y 1975- para el drenaje de algunas fincas que llegaban a inundarse en épocas particularmente húmedas (Fernández-Rubio, 1988; Fernández-Rubio, Benavente y Chalons, 1988). Posteriormente la zona sufre sucesivas transformaciones agrícolas por el cambio generalizado de estos cultivos por otros de tipo subtropical; es en este momento cuando se intensifica la explotación del acuífero. Actualmente el interés económico del acuífero radica en la alta rentabilidad de los cultivos, mayoritariamente subtropicales, que allí se desarrollan, bien sobre la superficie del propio acuífero o en las laderas de la sierra colindante. El otro pilar de la economía de la zona es el turismo, centralizado en la localidad de Almuñécar, que precisa de un importante aporte de agua en el período estival, coincidiendo con la mayor demanda de recursos hídricos requerida por la agricultura. Los principales núcleos de población de la zona son Almuñécar -en cuyo término se desarrolla la mayor parte del acuífero-, Jete -en el río Verde- y Otívar -en el norte del aluvial del río Verde-.

La cuenca hidrográfica comprende una superficie conjunta de unos 120 km², de los que 99 km² pertenecen al río Verde y 21 km² al río Seco, aunque existen ligeras diferencias de evaluación entre los distintos estudios realizados (CHSE, 1997; ITGE, 1992). Los únicos cursos que, en algunos tramos, presentan carácter permanente por recibir la descarga de una serie de manantiales en su cabecera, son el río Verde y su afluente el río Lentegí. Las derivaciones para riego que sufre el río Verde en las inmediaciones de Jete y la infiltración en el cauce, aguas debajo de esta población, reducen paulatinamente su caudal. El comportamiento de río perdedor y cauce seco se suele mantener hasta la desembocadura la mayor parte del año. Sólo en períodos de fuertes precipitaciones el río llega a descargar agua al mar. Excepcionalmente, tras períodos muy húmedos, se evidencia incluso un tramo de río ganador en el sector de la desembocadura.

El acuífero está conformado por depósitos aluviales cuaternarios (gravas, arenas y limos) que reposan sobre metapelitas alpujárrides de baja permeabilidad. Entre el río Lentegí y la Rambla de Torrecuevas el aluvial discurre en un estrecho cañón, cuyo ancho máximo es de 100 m, para abrirse en una plana costera, cuyo ancho varía entre 900 m y 350 m en la costa. La presencia del paleocauce del río Verde con una permeabilidad alta ($k=200-400$ m/d, Calvache y Benavente, 1988) destaca por ser un camino preferente de flujo. El paleocauce en la zona de la plana costera se encuentra al oeste del actual cauce del río. En el sector de Otívar el acuífero presenta poco espesor y se pone en contacto con los mármoles de la unidad hidrogeológica de "Tejeda-Almijara-Los Guájaros". El límite meridional del sistema es el mar Mediterráneo.

Intrusión marina

En un análisis de 1974 se caracterizaban hidroquímicamente las aguas del aluvial del río Verde como bicarbonatadas magnésico-cálcicas, propias de aguas poco cargadas en sales (Fernández-Rubio, Benavente

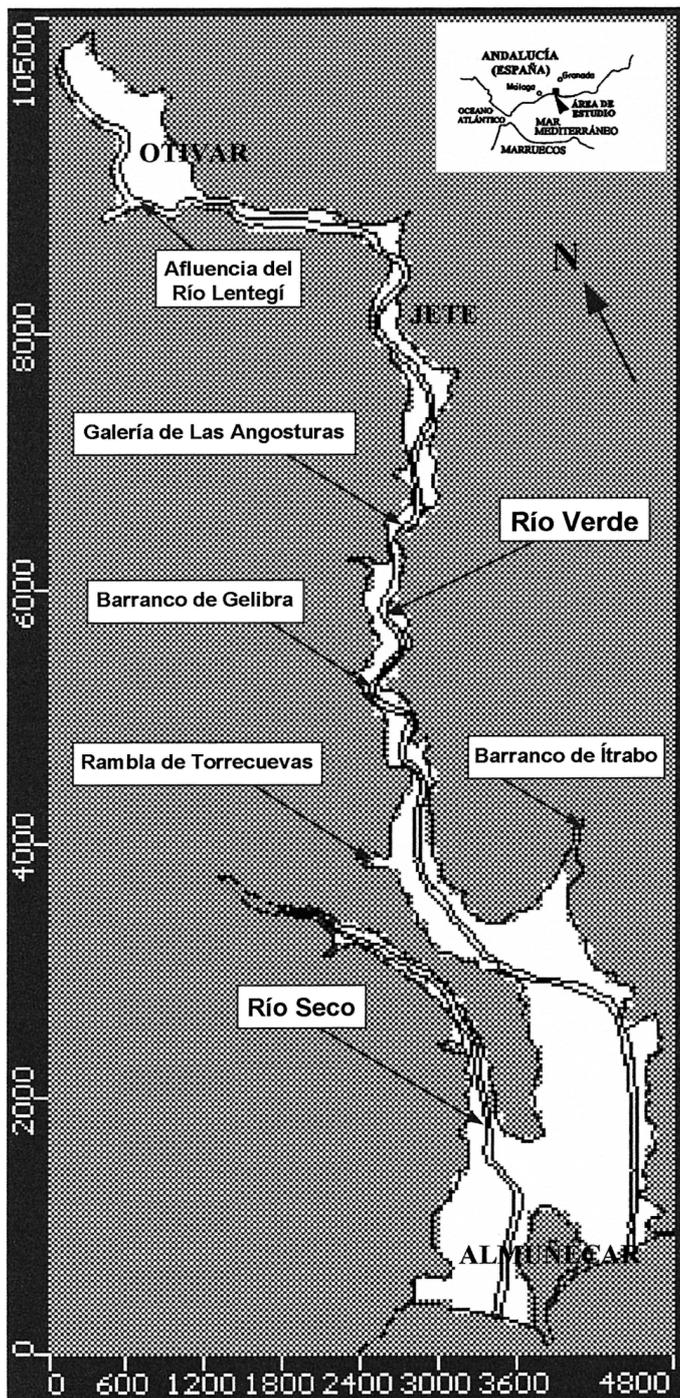


Fig. 1. Acuíferos aluviales de los ríos Verde y Seco. El dominio del modelo aparece en blanco. Las coordenadas escritas en los márgenes son locales

Fig. 1. Alluvial aquifers of the Verde and Seco rivers. Model domain appears blanc. The coordinates written on the margin are local

de más de 10 hm³/a. En el siglo pasado, a fines de la década de los 70, el cambio total de cultivos, el incremento de la superficie regada, y un notable desarrollo de la actividad turística trajo aparejado un fuerte aumento de los bombeos. A consecuencia de esta variación en el volumen de las extracciones y potenciado por unos años secos hizo irrupción, en los primeros años de la década de los 80, el fenómeno de intrusión marina.

La intrusión tiene como eje de penetración el paleocauce del río y se presenta como una situación estacional, que se desarrolla rápidamente y se adentra de forma notoria hacia el interior del acuífero, aunque igualmente rápida es la retirada de la cuña salina al llegar el otoño. La rapidez en el desarrollo y remisión de la intrusión y la magnitud que alcanza la penetración, se debe a la alta permeabilidad y escasa presencia de materiales arcillosos en el acuífero y, en particular, en el paleocauce (Calvache y Pulido, 1996 y 1997). En 1982, se observó que la cuña de intrusión se adentró 1.400 m; en 1983 fueron 2.000 m y, en los años posteriores, superó los 3.000 m. El análisis de cloruros en un pozo situado a 1.200 m de la línea de costa, permitió apreciar, en el período 1982-87, el crecimiento de este ion a partir de Julio alcanzando su máximo en Noviembre, momento en que decrece al comenzar el período de lluvias y producirse las crecidas del río Verde, retornando en los primeros meses del año a niveles bajos, 3 a 7 mg/l. En 1983, 85 y 87 se superaron los 5.000 mg/l, 2.000 mg/l y 1.500 mg/l, respectivamente, y en 1986 casi se alcanzan los 4.000 mg/l. Los períodos de recuperación del acuífero se fueron reduciendo progresivamente (Fernández-Rubio y Jalón, 1988).

Estudios y modelos de flujo

La trascendencia económica de las actividades que se desarrollan en la zona, su dependencia de los recursos hídricos y la grave amenaza que representa el problema de intrusión marina ha motivado la propuesta de una serie de actuaciones: regulación del río Verde en cabecera, recarga artificial del acuífero aluvial y/o en la costa, construcción de una pantalla impermeable o trasvases desde los ríos de la Miel o del Guadalfeo. La efectividad de la recarga ya fue constatada, en una simple actuación de arado del lecho del río previo a una avenida que logró que el pico en la evolución del ion Cl⁻ no superase, en 1984, los 60 mg/l (Fernández-Rubio, 1988).

Igualmente, la importancia del problema ha servido de incentivo para el desarrollo de los siguientes trabajos de modelización numérica:

y Chalons, 1988). En esta época el acuífero era claramente excedentario, con una descarga media al mar

- Calvache (1989, 1991) desarrolla el primero de los modelos de flujo y el correspondiente estudio de la posición de la interfase agua dulce-agua salada. El dominio modelizado, 2.5 km², se restringe al sector meridional del acuífero del río Verde (vega de Almuñécar). Se calibra un régimen transitorio que comprende los años hidrológicos 1985/86-1987/88, caracterizados como medio, seco y medio.
- Calvache y Pulido (1989) calibran un modelo de flujo en régimen estacionario y simulan una recarga artificial haciendo uso de la calibración en régimen transitorio realizada anteriormente por Calvache (1989); La recarga simulada se realiza mediante una inyección en un pozo inmediato a la confluencia del río Verde y el Barranco de Ítrabo y se ejecuta desde Diciembre de 1985 a Julio de 1986, la simulación se continúa hasta Octubre de 1986 para observar la evolución del acuífero una vez finalizada la recarga. La simulación en régimen transitorio de la recarga artificial se realizó bajo unas condiciones hidrometeorológicas más favorables respecto a las del presente modelo y se consideró un caudal de inyección sensiblemente mayor, 8 hm³/a. No obstante estas diferencias, aquel estudio ofrece interesantes resultados que complementan a los aquí presentados, pues el mismo permite apreciar la evolución temporal de la piezometría y la intrusión marina, con y sin recarga. Igualmente, pone de manifiesto el "bajo poder retentivo de este sistema acuífero", que indica que toda actuación de recarga para paliar la intrusión será efectiva en la medida que se ejecute en el mismo período estacional que la misma.
- Benavente *et al.* (1995) y Padilla *et al.* (1997a y b) elaboran un modelo de flujo del acuífero, cuyo dominio es algo mayor que los anteriores y se extiende hasta la Rambla de Torrecuevas. Este modelo se calibra y se realizan tres simulaciones para un régimen estacionario que se corresponde a una situación hídrica media. Las simulaciones representan tres hipótesis de gestión una vez construida la presa de Otívar y considerando que esta regula el caudal medio anual, el cual se infiltra totalmente en el acuífero. La primera hipótesis no supone cambio alguno en los bombeos; la segunda supone las extracciones concentradas en la costa y la tercera supone la recarga de 4 hm³/a en las inmediaciones de la costa, para hacer frente a la intrusión marina.
- La Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE, 1997) retoma las investigaciones previas de Calvache, realizando un modelo en régimen transitorio para el período mayo de 1996 a abril de

1997, cuyas condiciones hídricas son las medias. El dominio del modelo se extiende hasta Jete. Se representa por primera vez la galería de Las Angosturas, aunque con una condición de contorno de caudal prefijado.

Los dominios de todos los modelos se extienden estrictamente por el acuífero aluvial del río Verde, debido, en buena medida, a que existe cierta incertidumbre respecto a la vinculación hidrogeológica entre este aluvial y el del río Seco.

Objetivos

Las características de la intrusión marina en el acuífero del río Verde -acciones que la propician y estación en que se produce- y el hecho que los modelos desarrollados hayan tratado períodos hidroclimáticos medios sugiere el interés de abordar la modelización de un período seco, por ser un escenario de mayor gravedad respecto al problema de intrusión. Atendiendo a ello, se procuró desarrollar un modelo que simulase en régimen transitorio un período interanual particularmente seco. Los objetivos eran la calibración del mismo, el análisis del fenómeno de intrusión marina y la simulación de distintas acciones sobre el sistema para enfrentar la intrusión, estudiando y valorando el impacto de las mismas. El período seleccionado comprende los años hidrológicos de 1990/91 a 1993/94 y se caracteriza por ser el ciclo seco interanual más prolongado que registran las estaciones meteorológicas de Almuñécar y Jete, bajo cuya influencia se encuentra el sistema acuífero.

Las condiciones hídricas extremas que afectan al período simulado, la magnitud de los bombeos que se efectúan para paliar la sequía y las características del acuífero -parámetros y geometría- propician el secado de celdas durante la simulación. Ello se produce en los sectores donde el acuífero es más somero, zonas de encajamiento y áreas perimetrales de la plana litoral. En particular, el elevado número de celdas que se secan en los tiempos de cálculo correspondientes a los períodos de estiaje impide la resolución del régimen transitorio en este ciclo interanual extremo.

La respuesta que se dio al problema expuesto fue el desarrollo del modelo en régimen estacionario, en el que se simula la situación media del período de sequía seleccionado (1990/91-1993/94). Obviamente, el acuífero se encuentra menos solicitado en esta situación media que en los escenarios extremos que ofrecen los períodos de estiaje del ciclo seleccionado. Debido a ello, si bien se secan celdas en la simulación en régimen estacionario, esto no impide la resolución del problema directo. La robustez que ofrece la simu-

lación en régimen estacionario va en detrimento de las posibilidades de representación, al no poder modelizarse situaciones dinámicas en el acuífero, en las que el almacenamiento juega un papel fundamental. Así, se pierde precisión para analizar los efectos que los bombeos intensos ocasionan al disminuir los recursos almacenados propiciando la intrusión marina o las actuaciones de recarga artificial para paliarla. No obstante, la resolución del régimen estacionario permite evaluar algunos aspectos de interés del sistema, siempre desde una perspectiva crítica que asuma la imposibilidad, ya señalada, de representar situaciones dinámicas.

Los objetivos planteados para la modelización de los aluviales de los ríos Verde y Seco en régimen permanente fueron los siguientes:

- calibración del modelo, con el fin de validar la conceptualización del acuífero realizada en anteriores modelos o identificar una nueva caracterización
- realizar una primera aproximación en el análisis para determinar el emplazamiento más efectivo para las actuaciones de recarga artificial contra la intrusión marina
- realizar una primera aproximación para evaluar el impacto sobre el acuífero de la disminución del caudal circulante en el río Verde debido a la construcción de la presa de Otívar

La consecución de estos objetivos se realiza mediante la calibración un modelo de flujo y la posterior simulación de las actuaciones de recarga artificial y de disminución del caudal circulante en el río. El modelo numérico se desarrolla con el difundido código en diferencias finitas MODFLOW, en la versión integrada en el paquete informático Visual MODFLOW v.2.81.105 (WHI, 1999). La aplicación de un modelo de flujo no es la herramienta numérica más idónea para estudiar problemas relacionados con la intrusión marina. Este tipo de modelo sólo pueden ofrecer una primera aproximación en términos de balance hídrico para el estudio del fenómeno. No obstante, a pesar de estas limitaciones, se han realizado numerosos modelos de flujo para el estudio de la intrusión marina en este ámbito geográfico (García-Aróstegui, 1998; Padilla *et al.*, 1997a y 1997b; Calvache y Pulido-Bosh., 1989, 1996 y 1997; Calvache, 1989 y 1991); esta opción también se contempló en trabajos metodológicos (López-Geta y Ramos, 1988). Revisiones y análisis interesantes sobre una representación numérica más adecuada del fenómeno de intrusión marina mediante modelos de densidad variable o de interfase neta se encuentran en los trabajos de Verruijt *et al.* (1988) y Oude Essink y Boekelman (1998)

La exposición de los trabajos realizados sigue el orden secuencial de las tareas de desarrollo de un modelo numérico: definición de un modelo conceptual, identificación de la estructura del modelo numérico, calibración, análisis de sensibilidad y simulaciones. Finalmente, se comentan las conclusiones a las que se arriba y las recomendaciones que se derivan de las mismas.

Definición del modelo conceptual

El modelo conceptual de un sistema hidrogeológico es la caracterización de sus rasgos, componentes y funcionamiento. Su definición suele ser el resultado de un exhaustivo estudio de síntesis, en el que se colecta, analiza y depura la información. En muchos casos el resultado del trabajo de síntesis no es necesariamente un único modelo conceptual, por ser verosímil más de una caracterización del sistema o ni siquiera una claramente definida, debido a la mayor o menor magnitud de la incertidumbre inherente a toda información. Finalmente, no se debe perder de vista que frente a la complejidad de un sistema real, cualquier modelo del mismo, aún el más sofisticado, sólo podrá representar los aspectos más relevantes de aquel. Para el lector, atender a la descripción de los principales rasgos del modelo o de los modelos conceptuales es un paso previo necesario para el buen entendimiento de la descripción del modelo numérico y las eventuales simulaciones que se realicen. Asimismo, resulta de buena práctica establecer claramente el origen de la información sobre la que se asienta el modelo.

La información relativa a los acuíferos de los ríos Verde y Seco se encuentra dispersa en numerosos trabajos previos (García-García *et al.* 1981; Benavente, 1982; DGOH-JA, 1986; Benavente y Calvache, 1988; Calvache y Benavente 1988; Calvache y Pulido, 1989 y 1997; DGOH-JA, 1989-90 y 1992; Fernández-Rubio, Benavente y Chalons, 1988; Fernández-Rubio y Jalon, 1988; Molina, Cobos y Rosillo, 1988). La Confederación Hidrográfica del Sur de España, CHSE, ha ido integrando la misma en los sucesivos documentos del Plan Hidrológico del Sur de España, PHSE (CHSE, 1983; CHSE, 1988; CHSE, 1995; CHSE, 1997). El Instituto Geológico y Minero ha desarrollado una labor análoga de integración, aunque en un marco temático más específico (IGME, 1983 y 1985; DGOH-IGME, 1988; ITGE, 1989 y 2000; Diputación Provincial de Granada-ITGE, 1990). El análisis de esta documentación permite definir el modelo conceptual que a continuación se describe.

Los acuíferos aluviales que integran el sistema son

de escasa dimensión, con una superficie de 4.2 km² el de río Verde y 1.3 km² el de río Seco y una tipología física similar, definida por un sector de cabecera que se encuentra encajado en un estrecho cañón y una plana en el sector costero (Fig. 1). Otros aspectos relevantes de la geometría del acuífero son: indicios de un profundo y estrecho paleocauce en el sector central de la plana del río Verde, que podría alcanzar 70 m de profundidad; posible existencia de otro paleocanal menos profundo en la plana del río Seco y espesores someros en las zonas perimetrales de las planas litorales y en los encajamientos de cabecera.

Los datos sobre parámetros hidrogeológicos son escasos; la mayoría se obtuvieron mediante ensayos de bombeo y algunos a través de determinaciones indirectas -relación con datos litológicos, modelización numérica-. A continuación se realiza una breve reseña sobre los parámetros:

- En el sector de Las Angosturas, en 1981, se determinó mediante ensayo de bombeo una permeabilidad, k , de 300 m/d; posteriormente, en esta zona de encajamiento del acuífero, se determinó un valor medio de 60 m/d
- En el sector de Almuñécar, en 1972 y 1981, mediante ensayos y criterios basados en las características litológicas se determinaron valores de k entre 200 m/d y 1000 m/d. Posteriormente, en la zona del paleocauce se evaluó un valor máximo de $k = 500$ m/d y, en la vega, un valor medio de $k = 150$ m/d. Para la anisotropía vertical se estimó con técnicas de gabinete una relación media, $k_v/k_h = 5$
- Los valores de porosidad eficaz obtenidos experimentalmente y por relación con las características granulométricas de los registros litológicos, realizados en la vega de Almuñécar, varían entre 15-20 % y algo menos de 4 %
- El aluvial del río Seco posee escasos datos y se considera que su permeabilidad es menor que la del Verde; en un ensayo de bombeo se valoró $k = 50$ m/d

Esquemáticamente, las recargas de los acuíferos aluviales de los ríos Verde y Seco proceden de la infiltración de la precipitación y del retorno de los regadíos que se produce sobre los mismos aluviales y en las formaciones hidrogeológicas vecinas y cuencas de cursos de agua afluentes al río Verde, los cuales descargan al acuífero en los bordes de contacto con este y en la confluencia de los correspondientes aluviales, respectivamente. Otra recarga al acuífero procede del caudal del río Verde. Las descargas del acuífero se producen a través de la galería Las Angosturas en la zona de encajamiento del aluvial, al mar en la línea de costa, y a través de las extracciones que se realizan, en general, en todo el aluvial, aunque los bombeos

más fuertes se concentran en el norte de la plana litoral. Este esquema de entradas y salidas se describe a continuación con mayor detalle, se ofrecen conjuntamente los valores medios anuales correspondientes al período estudiado.

Los cursos de aguas superficiales presentes en la zona de estudio son los ríos Verde y Seco; de ellos, sólo el primero se puede considerar como un elemento permanente que interacciona con el acuífero. En períodos secos como el estudiado, en el curso inferior del río Verde no suele existir caudal. Durante el período de estudio (1990/91-1993/94), todo el caudal circulante recarga al acuífero; su valor medio es de 10.868 m³/d, y en su evaluación se contemplan las aportaciones del río Lentegí y las derivaciones del agua para riego.

La recarga originada por la infiltración de la precipitación y el retorno de los regadíos se trata conjuntamente en el modelo. Los ámbitos espaciales sobre los que se evalúan estas recargas son el acuífero aluvial y las formaciones y subcuencas que descargan a este. Las estaciones termo-pluviométricas del Instituto Nacional de Meteorología, bajo cuya influencia se encuentra el dominio del modelo, son las de Almuñécar y Jete. La técnica de regadío que se aplica casi exclusivamente sobre el acuífero es la de gravedad y en las formaciones y subcuencas vecinas es la de goteo, a las que se asignan retornos del 30% y del 5%, respectivamente (Comunidad de Regantes de Jóvenes Agricultores de la Herradura, 1985; Comunidad de Regantes del Barranco de Cifas, 1993). El cálculo de la ETP se realiza por Thornthwaite y la recarga se establece mediante el balance hídrico, para distintas reservas útiles, RU, e imponiendo la hipótesis, bastante verosímil, que para el período seco de estudio toda la lluvia útil se transforma en recarga al acuífero. La recarga media se estima en:

- aluvial del río Verde, 271 mm/año; y aluvial del río Seco, 133 mm/año
- aportaciones de subcuencas y formaciones (Fig. 2): mármoles, 180 m³/d; cuarcitas -contacto norte-, 1166 m³/d; cuarcitas -contacto sur-, 782 m³/d; Barranco de Gelibra, 68 m³/d, Rambla de Torrecuevas, 202 m³/d; Barranco de Ítrabo, 403 m³/d, y cuenca superior del río Seco, 56 m³/d

Los bombeos del acuífero fueron evaluados sistemáticamente por primera vez por el IGME en 1984, que estableció una red de control de la que hizo un seguimiento mensual en los años hidrológicos 1985/86 a 1987/88 y semestral de 1988/89 a 1991/92. Los bombeos de los últimos dos años del período de estudio se definieron por el análisis de la evolución histórica de los distintos usos -agrícola y abastecimiento-, así como la analogía con la extracción de

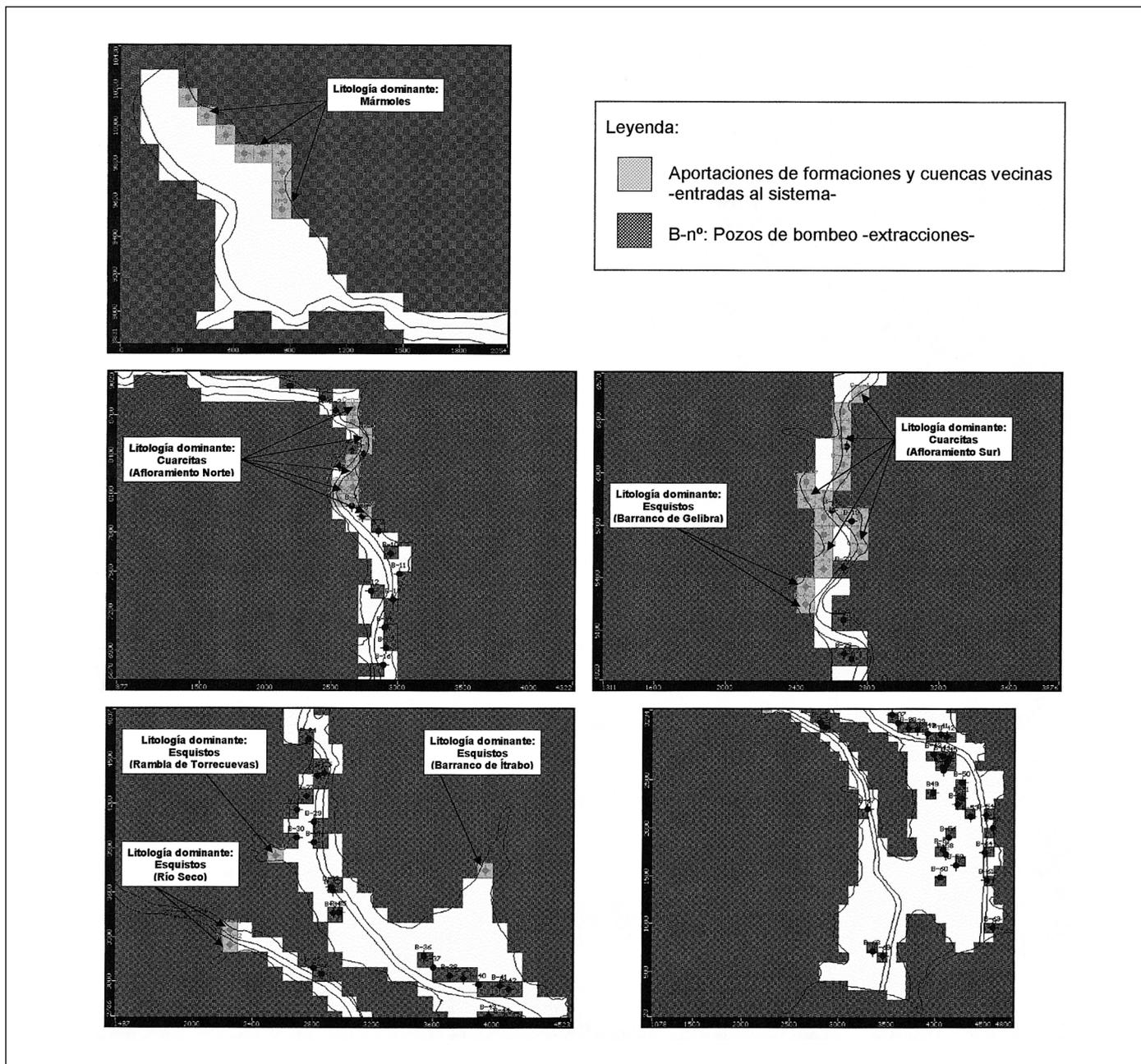


Fig. 2. Zonificación de las condiciones de contorno de caudal prefijado: aportaciones de formaciones y cuencas vecinas -entradas al sistema- y pozos de bombeo -extracciones-. Las coordenadas escritas en los márgenes son locales
 Fig. 2. Fixed boundary conditions zonation: adjacent formations and basins inflow and pumping well -extractions-. The coordinates written on the margin are local

años de características climatológicas similares. La extracción media anual correspondiente al período 1990/91-1993/94 en los pozos de bombeo se evaluó en 22.246 m³/d.

La antigua galería subálvea de Las Angosturas que abastece a Jete presentó hasta la década de los 80

caudales elevados, más o menos constantes, comprendidos entre 200 y 400 l/s. Posteriormente, sus caudales mermaron, no superando nunca los 150 l/s, e incluso se secó en algún período estival. Así, la magnitud de su descarga dejó de ser representativa de las características hídricas del año, pasando a

estar mediatizada por los bombeos que se ejecutan agua arriba. La descarga media para el período de estudio es de 2.192 m³/d.

Las medias anuales de la descarga de recursos al mar y de las entradas por intrusión marina, correspondientes al período 1990/91-1993/94, no fueron evaluadas por carecerse de información que permitiera abordar el cálculo de las mismas con el rigor requerido. No obstante, se supone que la descarga al mar media anual correspondiente a este período es, al menos, menor que la correspondiente a un año medio, por tratarse los años de estudio de un ciclo seco a muy seco.

La información piezométrica del modelo procede de las bases de datos del IGME y de la CHSE. Los datos piezométricos adoptados para el modelo en régimen estacionario corresponden a los valores medios de los niveles medidos en los puntos de observación durante el período de estudio (1990/91-1993/94). Durante este período, la piezometría presenta un descenso generalizado, en cabecera algunos pozos se quedan secos y en el litoral, en los meses de estiaje, se aprecian niveles negativos. No obstante, tal como se indicó anteriormente, la piezometría media utilizada representa un marco menos crítico que el ofrecido por los niveles del acuífero en los períodos de estiaje del ciclo estudiado.

Entre las actividades económicas que se desarrollan y que inciden notoriamente sobre el acuífero se deben señalar:

- una agricultura intensiva dedicada a cultivos subtropicales de gran rentabilidad, con el consiguiente encarecimiento del suelo
- una actividad turística marcadamente estacional que genera un fuerte aumento de la demanda en el abastecimiento durante el período estival

Identificación de la estructura del modelo

Identificar la estructura de un modelo numérico implica definir la conceptualización del sistema hidrogeológico en términos de los parámetros del modelo. Esto implica definir la geometría del modelo -dominio y discretización-, las condiciones de contorno, esquemas de parametrización -por ejemplo zonificaciones-, entre otras cuestiones. Por lo tanto, no depende sólo de la conceptualización del sistema estudiado sino de los recursos y características de la herramienta numérica empleada. A continuación se describe la estructura del modelo.

El modelo definido es bidimensional y está compuesto por 609 celdas activas. Las celdas son cuadradas, de 100 m de lado. El espesor mínimo del

modelo es de 15 m y el máximo alcanza, aproximadamente, los 70 m. Las condiciones de contorno definidas son:

- borde impermeable en el contacto entre el aluvial y los materiales metapelíticos
- nivel fijo, $H=0$ m, en el borde costero
- la condición de contorno de río se define inicialmente a lo largo del curso del río Verde hasta su desembocadura. Los parámetros que la gobiernan (WHI, 1999) adoptan los siguientes valores: la conductancia hidráulica río-acuífero, C_R , 200 m²/d, y la carga hidráulica, $(H-L_R)$, 0,25 m ó 0,15 m, según sea aguas arriba o abajo de la galería de Las Angosturas, respectivamente. Esta diferencia en la carga hidráulica procura reflejar la merma en el caudal circulante que ocasionan las derivaciones para riego en las inmediaciones de Jete y la galería de Las Angosturas. En las celdas donde los bombeos propician una recarga inducida se adopta $C_R = 2.000$ m²/d
- las entradas procedentes de cuencas de los cursos afluentes al río Verde -Barrancos de Gelibra e Ítrabo y Rambla de Torrecuevas-, formaciones vecinas -mármoles, cuarcitas (contactos norte y sur)- y cuenca superior del río Seco, se representan imponiendo la condición de caudal prefijado en las celdas pertinentes (Fig. 2)
- los bombeos se representan imponiendo la condición de caudal prefijado en 69 puntos, 64 en el aluvial del río Verde y 5 en el Seco. Las extracciones se definen mediante sendas series mensuales
- la galería de Las Angosturas se representa con la condición de dren; los parámetros que la gobiernan (WHI, 1999) adoptan los siguientes valores: la conductancia hidráulica, C_R , 85.000 m²/d, y cota de desborde $L_R=0,25$ m.

Las zonificaciones que se definen en el modelo son:

- la permeabilidad, la zonificación y los parámetros iniciales se corresponden a los definidos en modelos previos (Calvache, 1991; CHSE, 1997)
- recarga originada por la infiltración de la precipitación y el retorno de riego. Se consideran tres zonas: dos en el aluvial del río Verde, que se corresponden con las zonas de influencia de las estaciones meteorológicas de Jete y Almuñécar, y una tercera en el aluvial del río Verde

Los puntos de observación seleccionados fueron 23 (Fig. 3), con datos de periodicidad mensual para el período 1990/91-1993/94 (ITGE, 2000)

El presente modelo frente a los anteriores presenta los siguientes avances:

- su dominio comprende la totalidad de los dos acuíferos aluviales de los ríos Verde y Seco

- se estudia la situación media de un período inter-anual seco extremo: 1990/91 a 1993/94
- se representa la galería de Las Angosturas con la condición de contorno de dren; esta es la condición adecuada para su representación, además permite utilizar su descarga como criterio de ajuste para calibrar el modelo. El único modelo que representó anteriormente esta galería (CHSE, 1997) lo hizo mediante la condición de caudal prefijado, lo cual resulta menos preciso.

caudales, concentración de solutos- reproducir más ajustadamente la serie de datos que se posee de las mismas. No obstante, en muchas ocasiones el proceso de calibración obliga a reconceptualizaciones que modifican el modelo conceptual original, por ejemplo en la caracterización que se hace de sus rasgos o, eventualmente, a revisar el régimen de representación elegido: transitorio o estacionario. En particular, este último hecho incide en la elección de la ecuación de estado que rige el problema. En cualquier caso, toda reconceptualización tiene una repercusión directa en la modificación de la estructura del modelo.

La calibración de los parámetros del modelo ofreció los siguientes resultados:

Calibración del modelo

El proceso de calibración consiste en identificar los parámetros del modelo numérico. En principio, se consideran parámetros óptimos del modelo a aquellos que permiten a las variables del modelo -niveles,

- permeabilidades (k). La zonificación de este parámetro coincide conceptualmente con los anteriores modelos, aunque su definición geométrica difiere al considerar que el paleocauce alcanza la

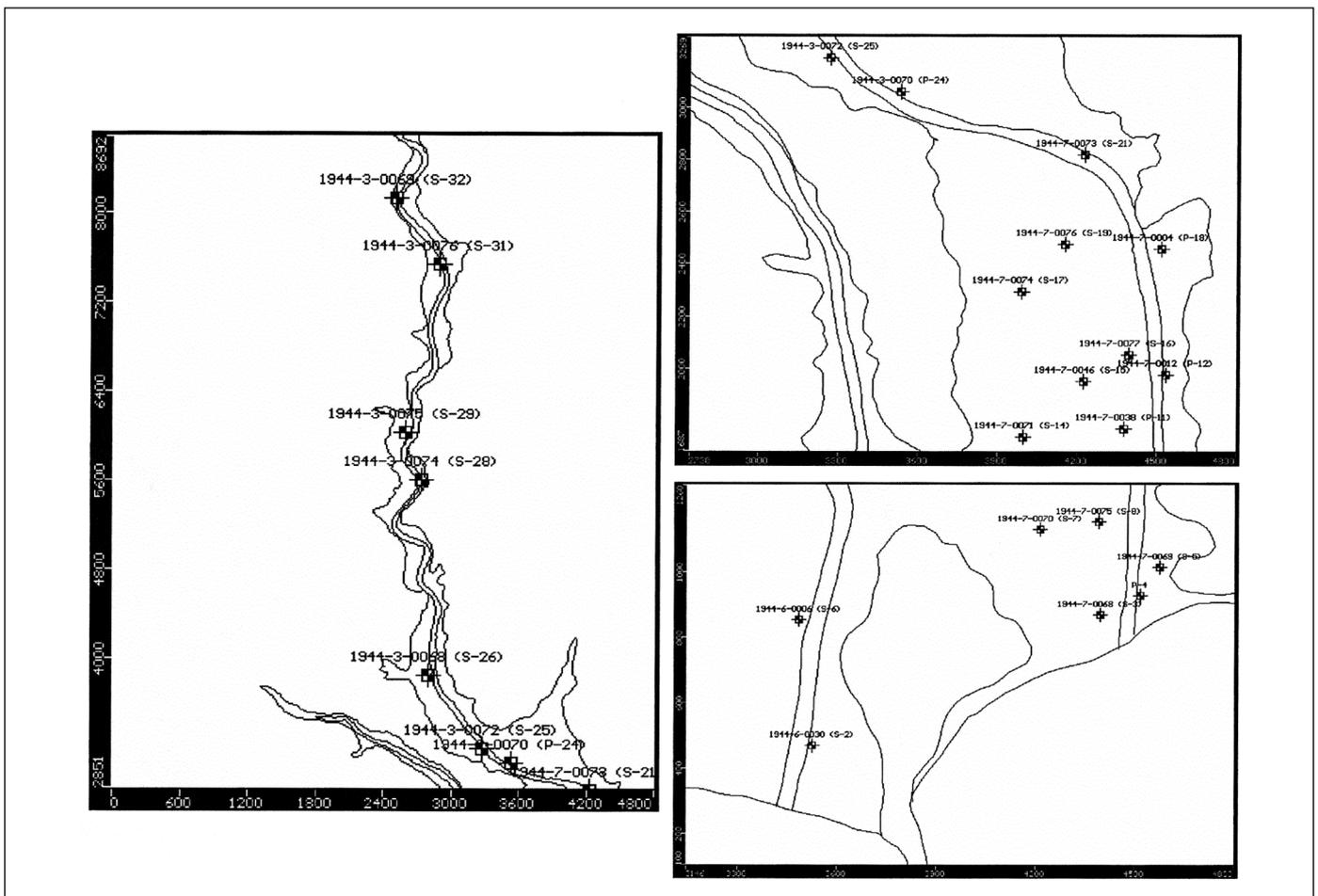


Fig. 3. Pozos de observación seleccionados. Las coordenadas escritas en los márgenes son locales
 Fig. 3. Selected observation wells. The coordinates written on the margin are local

costa (Fig. 4). Los valores calibrados son los siguientes:

Zona 1: $k = 12.5$ m/d, sector perimetral de la plana litoral del acuífero aluvial que está conformado por conos de deyección, material coluvial, etc.

Zona 2: $k = 300$ m/d, paleocauce, o zona de flujo preferente, en la plana del río Verde.

Zona 3: $k = 125$ m/d, se extiende entre el paleocauce y la zona perimetral de la plana del aluvial del río Verde.

Zona 4: $k = 200$ m/d, paleocauce en la plana del río Seco.

Zona 5: $k = 75$ m/d, sector de encajamiento del aluvial en el cañón del río Verde, aguas abajo de Las Angosturas.

Zona 6: $k = 175$ m/d, sector de encajamiento del aluvial en el cañón del río Verde, aguas arriba de Las Angosturas.

- conductancia hidráulica río-acuífero, C_R . El río

sólo se considera activo para la situación estacionaria modelada mientras discurre por el cañón, en el sector encajado del aluvial. Tras la salida del mismo se sitúan importantes extracciones, entre las que destaca el abastecimiento a Almuñécar, que da lugar a una movilización de recursos (Fig. 5). La carga hidráulica definida para el río es de 0.25 m aguas arriba de Las Angosturas y de 0.15 m aguas abajo. La calibración ofrece un C_R de 250 m^2/d en la mayor parte de su curso y variable entre 2000 m^2/d y 500 m^2/d en las celdas donde los bombeos situados en las márgenes del río suscitan el efecto de recarga inducida. Esto último se produce en el tramo final del río, donde se encuentran las explotaciones antes referenciadas

- galería de Las Angosturas. Se representa como una condición de contorno de dren. Los valores calibrados para la conductancia hidráulica, C_{DR} , y la cota de desborde, L_{DR} , del dren son de 5000 m^2/d y 78.5 m, respectivamente.

La piezometría resultante de la calibración se caracteriza por un buen ajuste en la casi totalidad de los datos piezométricos -valores medios de los niveles medidos en los puntos de observación durante el período de 1990/91 a 1993/94-. La bondad del ajuste se aprecia en la correlación entre niveles medidos y calculados y en los indicadores de los errores del ajuste, o residuos de nivel -diferencia entre los niveles medidos y calculados-. Entre los indicadores de los residuos se presta particular atención al error medio absoluto y a la desviación estándar de los residuos, pues el primero da una perspectiva de la bondad del ajuste conjunto y el segundo pone en evidencia la existencia de residuos que destacan sobre el conjunto. (Fig. 6). Los residuos extremos se concentran en los cuatros pozos situados en el tramo del cañón del río Verde situado aguas abajo de Las Angosturas; este hecho probablemente evidencia deficiencias en la conceptualización de este sector. La evolución espacial de la piezometría presenta los rasgos siguientes:

- en el sector de cabecera del acuífero aluvial del río Verde, aguas arriba de la afluencia del río Lentegí, la piezometría varía de los 400 m a los 150 m, con un gradiente muy acusado.
- en el cañón del río Verde, en la zona de encajamiento del acuífero aluvial, la piezometría varía uniformemente entre los 150 m, en el extremo aguas arriba, y los 25 m, en su punto más bajo.
- en la plana costera del acuífero del río Verde, la piezometría varía de forma muy suave, entre los 25 m y los 0 m. Existen amplios sectores, con evolución desde el cauce del río hacia su zona central, que presentan una depresión del orden de algu-

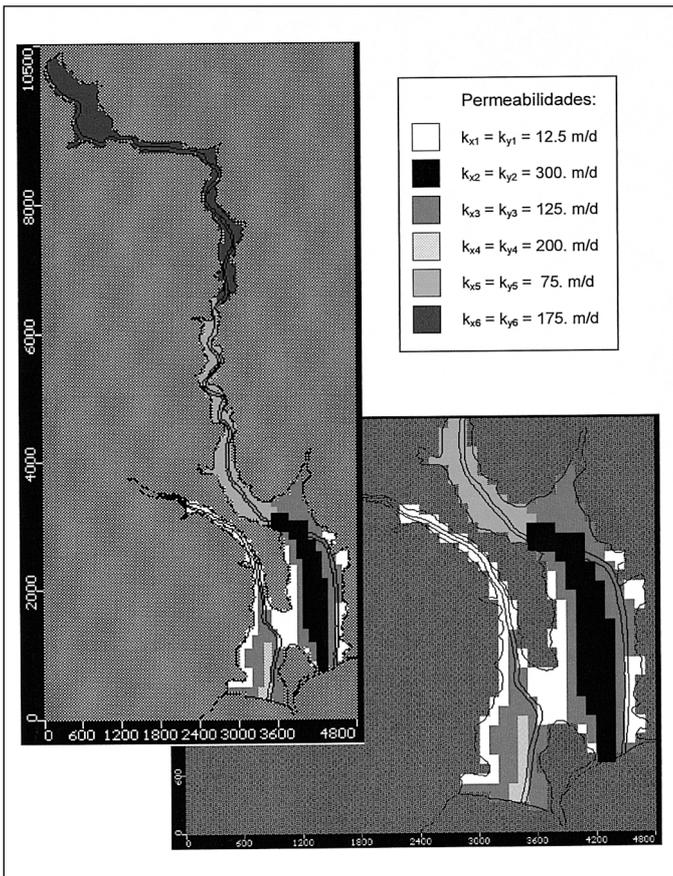


Fig. 4. Modelo calibrado: zonificación de permeabilidades, k , resultante. Las coordenadas escritas en los márgenes son locales
 Fig. 4. Calibrated model: final permeability, k , zonation. The coordinates written on the margin are local

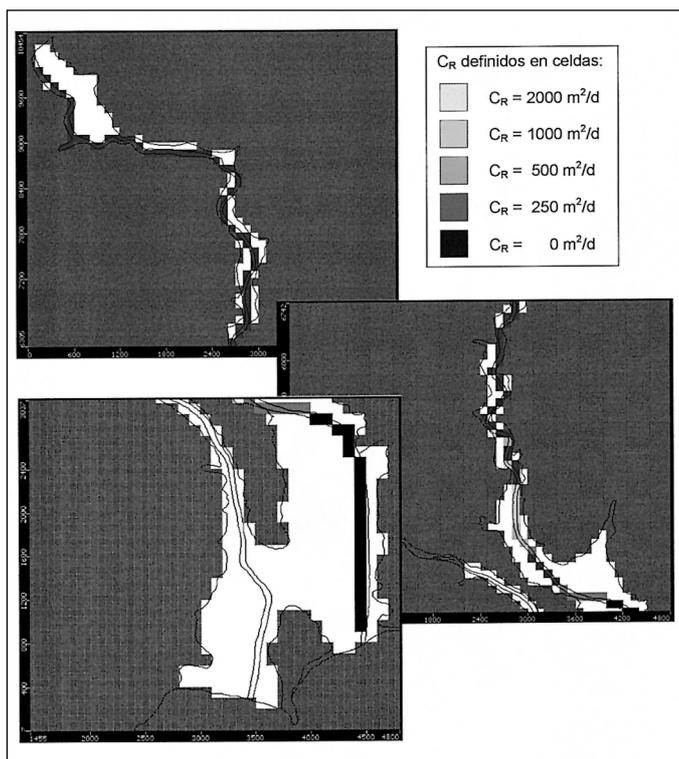


Fig. 5. Modelo calibrado: tramos de río activos. C_R : conexión hidráulica río-acuífero. Las coordenadas escritas en los márgenes son locales

Fig. 5. Calibrated model: active river cells. C_R : conductance river-aquifer. The coordinates written on the margin are local

nos decímetros negativos, a causa de los bombeos, depresión que influye claramente sobre la descarga al mar, limitándola. Destaca un importante cono de bombeo, que alcanza los -4,5 m, producido en la zona del pozo de abastecimiento a Almuñécar, donde también se sitúan otras explotaciones. Inmediatamente al Norte de Almuñécar, se aprecia un trasvase subterráneo de recursos desde el acuífero aluvial del río Seco al del río Verde.

- en el cañón del río Seco, en la zona de encajamiento de este aluvial, la piezometría presenta una evolución uniforme desde los 86 m hasta los 10 m
- la plana litoral del acuífero aluvial del río Seco varía entre los 10 m y los 0 m en la costa. No se detectan valores negativos, ni se aprecia influencia de los bombeos. Este acuífero descarga al mar y al aluvial del Verde en su contacto, al Norte de Almuñécar.

El balance hídrico pone en particular evidencia dos limitaciones de la modelización realizada: 1) la simulación en régimen estacionario no permite represen-

tar el efecto del almacenamiento en el acuífero, y 2) la simulación de la situación media del período de 1990/91 a 1993/94 ofrece un marco del sistema menos crítico que los escenarios extremos que ofrecen los períodos de estiaje del ciclo estudiado. Debido a ello el modelo no representa los recursos movilizados por las extracciones en los períodos de estiaje, cuando se produce una drástica depresión de la piezometría y se propicia una fuerte intrusión marina, ni la evolución temporal del sistema con la remisión de dicho fenómeno en épocas de aguas altas. El balance hídrico (Tabla 1), a pesar de las limitaciones expuestas y de alguna deficiencia en la conceptualización del sistema que sugiere, ponen de manifiesto de forma clara la situación deficitaria del acuífero ante las solicitudes a las que se halla sometido.

La ligera diferencia que se observa entre la recarga estimada previamente y la representada en el modelo, un 1%, y la diferencia, algo más marcada, correspondiente a las aportaciones laterales, un 14%, se deben a los efectos de la discretización espacial y, en particular, al secado de celdas. Esto último afecta en mayor medida a las aportaciones laterales, pues se inactivan celdas que tenían asociadas la condición de contorno de caudal prefijado. El valor de la recarga puede parecer algo elevado, sin embargo debe considerarse que su principal componente son los retornos de riego, para el que se aplican dotaciones importantes; otros modelos de este acuífero ofrecen estimaciones de la recarga superiores a estas (Padilla *et al.* 1997; Calvache y Pulido-Bosh, 1996).

Los balances hídricos realizados en las celdas donde se definió la condición de contorno de río indican que la recarga procedente del río está asociada a bombeos ejecutados en sus márgenes, que propician un efecto de recarga inducida. Existe una evidente disparidad entre la estimación previa de la recarga procedente del río y la realizada por el modelo, algo más del 40%, y aunque la valoración previa encierra incertidumbres apreciables se considera que esta entrada se halla infravalorada por el modelo. Las descargas al río se producen aguas arriba de Lentegí y en algunos tramos en los que este discurre encajado, aunque estas últimas salidas se consideran sobrealoradas por el modelo -aún más, se estima que en estos tramos encajados la relación río-acuífero tiene un signo opuesto: que el río recarga al acuífero-. No obstante, esto es una valoración subjetiva; una observación estricta de los resultados en la zona de encajamiento del acuífero, tanto en lo referente al balance hídrico como al ajuste piezométrico, apuntan a una conceptualización deficiente del acuífero en este sector. Por otro lado, la caracterización de la galería ha sido correcta, lo que se refleja en el balance.

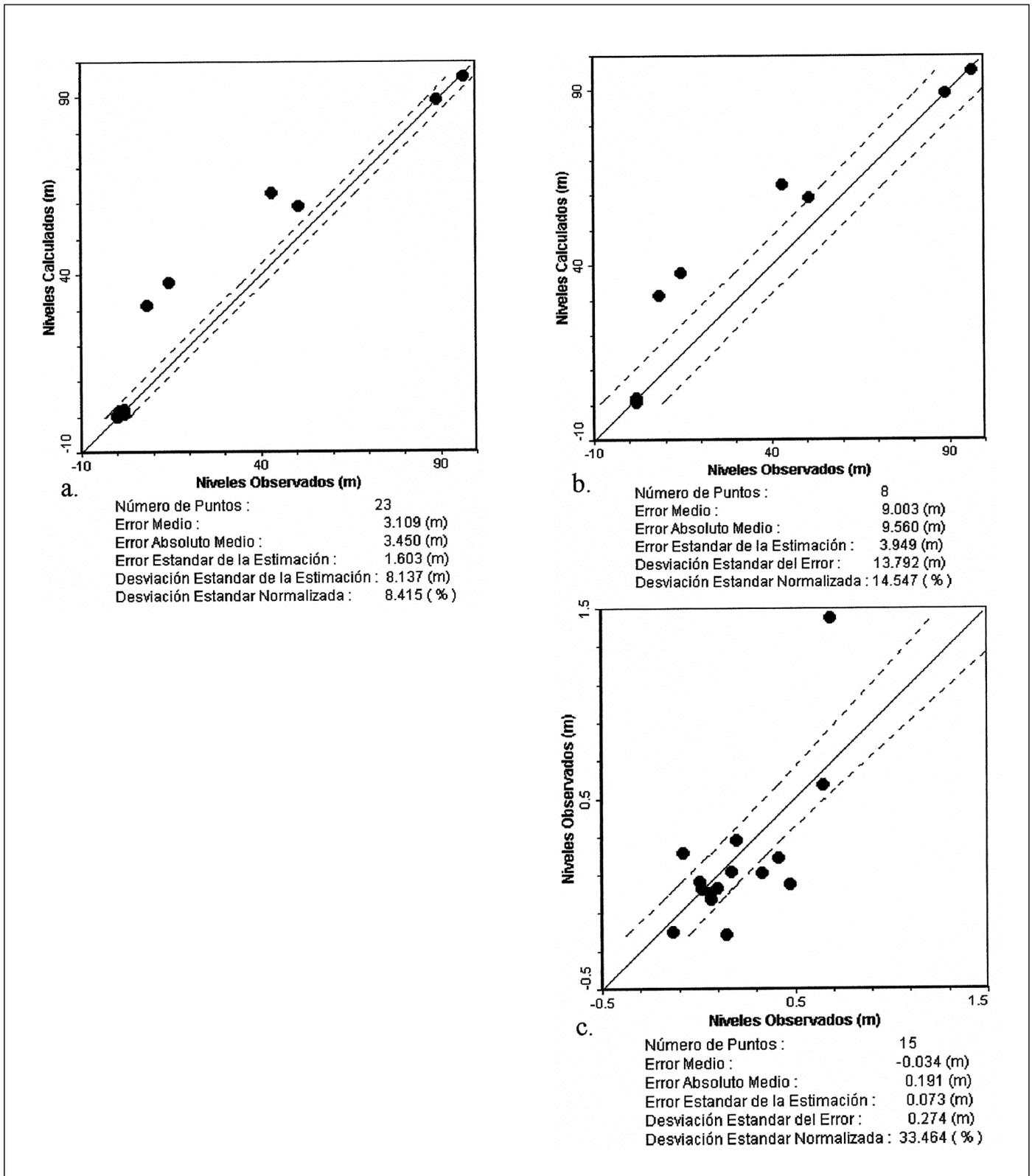


Fig. 6. Modelo calibrado: correlaciones entre niveles medidos y calculados. a. Sector: dominio modelado, b. Sector: Cañón del río Verde, c. Sector: planas costeras de los ríos Verde y Seco

Fig. 6 Calibrated model: correlation between measured and calculated heads. a. Sector: model domain, b. Sector: Río Verde river canyon, c. Sector: Verde and Seco rivers coastal plains

E/S	Componente del BH		Parcial (m³/d)	Información previa (m³/d)	Modelo calibrado (m³/d)
ENTRADAS	Mar		-	No evaluado	-
	Aportación Formaciones y cuencas laterales	Mármoles	180	2857	2445
		Cuarcitas (afloramiento Norte)	1166		
		Cuarcitas (afloramiento Sur)	782		
		Esquistos (Barranco Gelibra)	68		
		Esquistos (Rambla Torrecueva)	202		
	Esquistos (Barranco Ítrabo)	403			
	Esquistos (Río Seco)	56			
	Río Verde		-	10868	6230
	Recarga	Cuenca río Verde	3579	4042	3979
		Cuenca río Seco	463		
SALIDAS	Mar		-	No evaluado	15648
	Pozos de bombeo		-	22246	22180
	Galería Las Angosturas		-	2192	2366
	Río Verde		-	No evaluado	6921

Tabla 1. Calibración del modelo: balance hídrico (BH)
 Table 1. Calibrated model: water balance (BH)

Los bombeos son la salida más importante del escenario modelado, el 47% del total. El balance hídrico no acusa el fenómeno de intrusión marina, probablemente por tratarse este de un efecto estacional y marcadamente dinámico y representar el modelo, por otro lado, una situación media anual. Paradójicamente, este hecho puede ser la causa de sobrevaloración de la descarga al mar que es presentada por el modelo como una salida muy significativa, el 33% del total.

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad de un modelo numérico permite evaluar la robustez del mismo, en cuanto a la consistencia con que se calibraron sus parámetros. Se entiende por sensibilidad del modelo a la mayor o menor alteración que acusan las variables del mismo

-niveles, concentración de soluto, caudales- ante una variación, uno a uno, del valor de los parámetros calibrados. Así se evalúa la sensibilidad de las variables del modelo respecto a los parámetros, el grado de dependencia de estos con algún conjunto de datos en particular o la correlación que pudiera existir entre los parámetros. Todo ello permite valorar el grado de incertidumbre de los parámetros identificados, juzgándose, entre otros aspectos, el fundamento de los valores obtenidos o cuan superflua resulta la definición de algunos parámetros -sobrep parametrización-. El análisis de sensibilidad, si bien revisa los resultados de la calibración, lleva en muchos casos no sólo a reconsiderar el modelo conceptual, sino también a analizar las características y posibilidades que ofrecen los datos sobre los que se funda el estudio.

Los parámetros calibrados que presentan mayor consistencia por ejercer una incidencia apreciable entre los distintos conjuntos de datos son: k_{2r} , C_{Rr} , k_{3r}

C_{DR} y L_{DR} y, en menor medida, k_1 . La determinación de k_4 y k_5 ofrecen una robustez baja, el primero por su relativamente media-baja influencia sobre el conjunto global de las variables del modelo y el segundo por su fuerte dependencia del conjunto de datos piezométricos de la zona k_6 y los caudales de la galería de Las Angosturas. La definición propuesta de la zona de permeabilidad k_6 se presenta como superflua, al apreciarse que la calibración del mismo es dependiente exclusivamente de los datos situados en su zona, siendo la restante información prácticamente insensible al valor que adopte.

Finalmente, se debe añadir que la representación del sistema, para las condiciones dadas -período extremadamente seco e información limitada-, posee una inestabilidad que le es inherente y que, a su vez, añade una cierta incertidumbre a la solución. Todo ello se refleja durante el proceso de calibración, en el que se aprecia la marcada inestabilidad numérica que sufre el problema.

Simulaciones

Las simulaciones presentadas son un ejemplo del uso de un modelo numérico como herramienta de análisis de las eventuales acciones que se planifiquen sobre un sistema acuífero. Asimismo, se puede apreciar la potencia, a la par que la economía, que implica su uso en estas tareas. Sin embargo, son también un ejemplo de cómo los resultados de las simulaciones sólo pueden ser analizados con rigor, y por ende ser de provecho, únicamente si se tienen en cuenta las limitaciones e incertidumbres con las que fue construido el modelo numérico.

Las dos hipótesis de simulación se plantean, en respuesta a dos de los objetivos del estudio, realizar una primera aproximación en el análisis para determinar el emplazamiento más efectivo para las actuaciones de recarga artificial contra la intrusión marina y realizar una primera aproximación para evaluar el impacto sobre el acuífero de la disminución del caudal circulante en el río Verde debido a la construcción de la presa de Otívar.

La Hipótesis I representa la actuación para frenar la intrusión marina mediante la inyección de aguas residuales procedente de la depuradora de Almuñécar (ITGE, 1997). El volumen de agua disponible para la recarga es $1,3 \text{ hm}^3/\text{a}$ y los emplazamientos analizados para los pozos de inyección son dos.

El primero se ha denominado Hipótesis Ia. La instalación propuesta ocuparía una superficie teórica de $7,7 \text{ ha}$ que se situaría perimetralmente a lo largo de la cota de 25 m , aproximadamente (Fig. 7a). Estaría

compuesta por pozos de recarga de gran diámetro, por lo que la superficie real ocupada sería considerablemente menor. Esta zona es la de menor coste de suelo.

El segundo emplazamiento denominado Hipótesis Ib, se propone cercano a la costa, en las inmediaciones de la carretera nacional N-340 (Fig. 7b). El alto coste del suelo en este sector condiciona la extensión de la superficie en que se emplazan los pozos de recarga; la misma se restringe a 3 ó 4 parcelas de $0,5 \text{ ha}$ cada una.

Los resultados indican que ambas actuaciones son efectivas frente a la intrusión marina, pues eliminan, en la plana del Verde, los niveles negativos producidos por los bombeos e incrementan las salidas al mar en un valor aproximadamente igual al inyectado. Este último efecto en la descarga al mar, es el esperado al simularse el acuífero en régimen estacionario y encontrarse las otras salidas no prefijadas del sistema -río y galería de Las Angosturas- aguas arriba y muy distantes de los puntos de inyección. En una primera aproximación, la Hipótesis Ia se presenta como más efectiva que la Ib, pues produce un mayor aumento en los niveles piezométricos de la plana del acuífero y genera un ligero incremento de la piezometría en la zona de encajamiento del acuífero. No obstante, ninguna de las dos hipótesis influye sobre el gran cono de bombeo que genera el conjunto de pozos existentes en las inmediaciones del pozo que abastece a Almuñécar.

La Hipótesis II representa la influencia de la futura presa de Otívar en el régimen hidrológico del río Verde y su impacto en el sistema acuífero. Así, la construcción de la presa de Otívar implicará que circule por el cauce, aguas abajo de la misma, un caudal mínimo igual al ecológico (Velasco *et al.*, 1984; Benavente *et al.*, 1995).

El caudal ecológico supuesto en la simulación es de $1.726 \text{ m}^3/\text{d}$ y se determinó a partir de estudios de impacto realizados anteriormente (Benavente *et al.*, 1995). En el modelo, la disminución del caudal circulante por el río se representa mediante la disminución de la carga hidráulica definida para la condición de contorno. Bajo los supuestos que todo el caudal circulante ($1.726 \text{ m}^3/\text{d}$) se infiltra, que ello acaece en los mismos tramos (celdas) identificados durante la calibración donde el río recargaba al acuífero y que en estos tramos (celdas) el acuífero se encuentra descolgado del río, se definió una carga hidráulica de $0,16 \text{ m}$, para el tramo aguas arriba de Las Angosturas, y de $0,10 \text{ m}$, para el de aguas abajo. El C_r aplicado para la identificación de la nueva carga hidráulica es el resultante de la calibración del modelo.

En la Fig. 8 se muestra el sector del acuífero que se

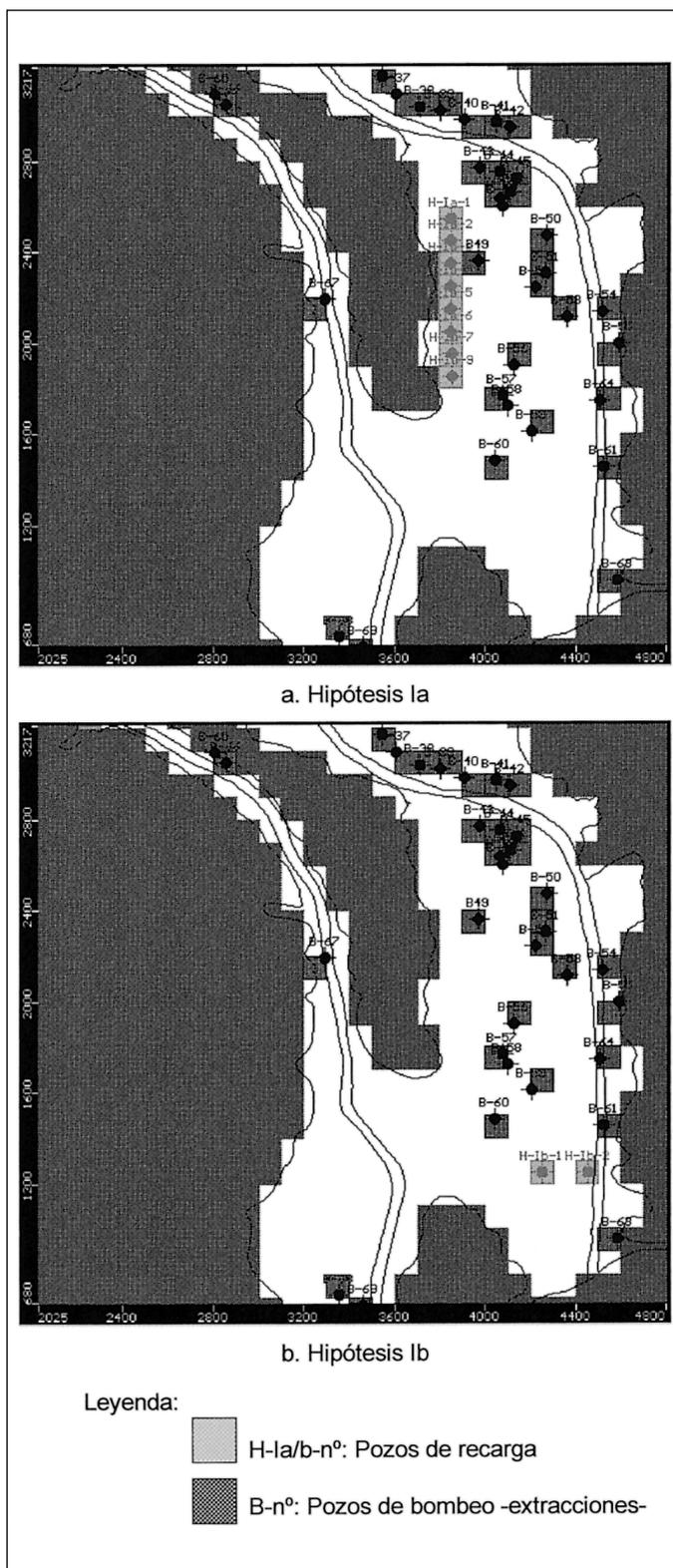


Fig. 7. Simulación de la hipótesis I: Emplazamiento de los pozos de recarga. a. Hipótesis Ia, b. Hipótesis Ib. Las coordenadas escritas en los márgenes son locales

Fig. 7: Hypothesis I simulations: recharge wells emplacement. The coordinates written on the margin are local

seca en la simulación. El mismo corresponde al tramo final aguas abajo del cañón del río Verde y se extiende desde el barranco de Gelibra hasta, aproximadamente, 300 m aguas arriba de la afluencia del barranco de Ítrabo al río. En este tramo se sitúan importantes bombes y, en su extremo aguas abajo, se encuentra el gran cono de bombeo evidenciado en la piezometría obtenida a partir de la calibración, originado por el abastecimiento a Almuñécar y las explotaciones adyacentes.

Los resultados reflejan los efectos de una disminución de los recursos hídricos disponibles en la parte alta del acuífero, durante un período extremadamente seco. Debido a que los efectos más notorios y dramáticos de las condiciones simuladas se producen en un sector del sistema con una deficiente caracterización, los resultados no se deben interpretar cuantitativamente de forma estricta. Sin embargo, la rotundidad de los resultados y su coherencia con las acciones simuladas, hacen que sí se puedan interpretar conceptualmente. Por ello, es realista suponer un agravamiento del fenómeno de intrusión marina y el secado de un sector encajado del acuífero, ubicado en el tramo final del cañón del río Verde. Todo ello si se reprodujeran las condiciones de la Hipótesis II: disponibilidad sólo del caudal ecológico durante un ciclo interanual extremadamente seco.

Discusión y conclusiones

El período de estudio (1990/91-1993/94) se caracteriza por ser el ciclo seco interanual más prolongado que registran las estaciones meteorológicas de Almuñécar y Jete, bajo cuya influencia se encuentra el sistema acuífero. En principio, esta particularidad convierte a este ciclo en el escenario más atractivo, entre los posibles, para abordar el estudio de la sobreexplotación y el consiguiente fenómeno de intrusión marina que sufre el acuífero en épocas de estiaje. Sin embargo, las características de los parámetros hidrogeológicos y la geometría del acuífero, dificultan su representación numérica, a causa del elevado número de celdas que se secan. Esta dificultad se extrema para los tiempos de cálculo correspondientes a períodos de estiaje, al punto de imposibilitar la resolución del problema directo en los mismos. Debido a ello se desestimó la modelización en régimen transitorio del período de estudio y se optó por simular en régimen estacionario la situación media de dicho ciclo. Las carencias e incertidumbres en la información contribuyen a incrementar las dificultades para la representación numérica.

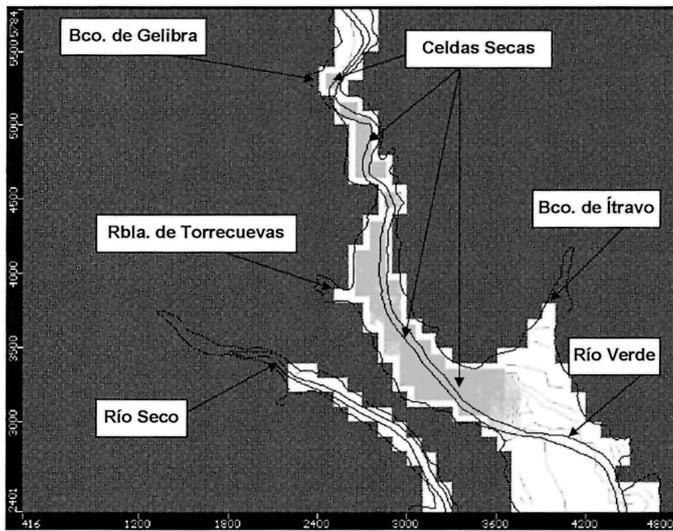


Fig. 8. Simulación de la hipótesis II. Resultado: celdas que se secan. Las coordenadas escritas en los márgenes son locales
 Fig. 8. Hypothesis II simulation. Result: dry cells. The coordinates written on the margin are local

La calibración del modelo para régimen estacionario ofrece unos valores de parámetros verosímiles y, en particular, una zonificación de permeabilidades, que si bien tiene el mismo marco conceptual que las definidas hasta ahora, presenta detalles más realistas. En este sentido, también sugiere la conveniencia de considerar una única zona de permeabilidad en el sector de encajamiento del acuífero, en el cañón del río Verde. La mayor parte de la plana aluvial del río Verde se ha caracterizado adecuadamente, pudiendo identificarse que la extensión del paleocauce, o zona de flujo preferente, alcanza la costa. Se ha representado por primera vez la vinculación entre los aluviales de los ríos Verde y Seco, poniéndose de manifiesto la descarga del segundo al primero. No obstante, se considera la necesidad de realizar nuevos estudios para mejorar la caracterización del aluvial del río Seco y del cañón del río Verde, dados los escasos datos disponibles actualmente.

La galería de Las Angosturas por primera vez se representa como dren, que es la condición de contorno correcta con la que se debe representar una galería de drenaje. Además, los parámetros que gobiernan la condición de dren se calibran con los datos de caudales de la galería y los niveles piezométricos de los pozos de las inmediaciones. El modelo deja constancia hasta donde se extiende el tramo del río Verde en que existe escorrentía superficial en periodos de sequía extrema.

Las simulaciones que se realizan ofrecen una

aproximación en el análisis de las posibles actuaciones contra la intrusión marina y respecto a una de las repercusiones de la presa de Otívar. Los resultados de las simulaciones de la Hipótesis I ofrecen una aproximación para identificar el emplazamiento más idóneo entre los dos contrastados para la recarga con aguas residuales y resultan un primer referente de los efectos que la recarga en cada uno de los emplazamientos propicia sobre el acuífero. La simulación de la Hipótesis II evidencia, en su aproximación, la repercusión profundamente negativa de disponer exclusivamente del caudal ecológico durante un período de sequía extrema.

El modelo en régimen estacionario que se presenta contribuye al avance del conocimiento del medio y resulta una herramienta válida para obtener un primer referente en el análisis de impacto sobre el acuífero de posibles actuaciones que se contemplan. Todo ello considerando con el debido rigor las limitaciones que le son inherentes frente a las características del acuífero, las problemáticas que le afectan y la información disponible. No cabe duda que la elaboración de un modelo en régimen transitorio para un ciclo hídrico seco extremo puede brindar frutos aún más interesantes en cuanto al conocimiento del medio, a la par de incrementar su potencia como herramienta de análisis. Sin embargo, para abordar esta tarea se requieren datos más detallados de algunos aspectos -bombeos y geometría, entre otros- que permitan tratar con la consistencia debida la construcción de una estructura de modelo más compleja que salve los problemas numéricos evidenciados por el modelo descrito en este trabajo.

Referencias

- Benavente, J. 1982. *Contribución al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos costeros de la provincia de Granada*. Tesis Doctoral. Univ. Granada. 435 pp.
- Benavente, J. y Calvache, M.L. 1988. *Estimación de la permeabilidad en el acuífero costero de Almuñécar*. TIAC' 88, III. La intrusión en España. Almuñécar, España. 385-394.
- Benavente, J., Cruz San Julián, J.J. y Padilla, F. 1995. *Impacto del Embalse Otívar en el acuífero del río Verde. Modelo de Simulación*. Instituto del Agua (Univ. de Granada). Inf. inédito para ALJAIMA, SA-CHSE. 325 pp.
- Calvache, M.L. 1989. *Simulación del contacto agua dulce-agua salada en el acuífero del río Verde (Almuñécar, Granada)*. Tesina de Licenciatura. Univ. de Granada. 120 pp.
- Calvache, M.L. 1991. *Simulación matemática del contacto agua dulce-agua salada en algunos acuíferos de la Costa del Sol*. Tesis Doctoral. Univ. de Granada. 317 pp.

- Calvache, M.L. y Benavente, J. 1988. *Nuevos datos sobre la geometría del acuífero costero de Almuñécar (Granada). Aportación al conocimiento de la porosidad eficaz y de las reservas*. TIAC' 88, III. La intrusión en España. Almuñécar, España. 375-384.
- Calvache, M.L. y Pulido, A. 1989. *Simulación de los efectos de una recarga en el acuífero del río Verde*. Congreso Nacional "La sobreexplotación de acuíferos", Almería, España. Pulido Bosh, Castillo y Padilla (Eds.). 193-205.
- Calvache, M.L. y Pulido, A. 1996. *Processus d'intrusion-extrusion marine dans des aquifères côtiers du Sud de l'Espagne*. C.R. Acad. Sci. Paris, (Hydrologie-Hydrogéologie), 323, Ila, 673-679.
- Calvache, M.L. y Pulido, A. 1997. *Effects of geology and human activity on the dynamics of salt-water intrusion in three coastal aquifers in southern Spain*. *Environmental Geology*, 30 (3/4), 215-223.
- CHSE 1983. *Informe de síntesis de los estudios básicos para la redacción del Plan Hidrológico del Sur de España. 1ª fase*. Grupo de Trabajo del Sur de España. Realizado por INITEC.
- CHSE 1988. *Plan Hidrológico de la Cuenca Sur. Documentación Básica*. Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- CHSE 1995. *Plan Hidrológico de la Cuenca Sur*. Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- CHSE 1997. *Estudio Hidrogeológico de los recursos de aguas subterráneas y superficiales de los ríos Verde y Seco (Granada)*. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente.
- Comunidad de Regantes del Barranco de Cifas 1993. *Investigación hidrogeológica en el aluvial del río Verde para mejora de los regadíos (Jete, Granada)*. INGEMISA Informe Técnico Particular.
- Comunidad de Regantes jóvenes agricultores de la Herradura (Almuñécar, Granada), 1985. *Posibilidades de captación de las aguas subterráneas para suministro a la C.R.J.A.H.*. INGEMISA Informe Técnico Particular.
- DGOH de la Junta de Andalucía 1986. *Estudio de la viabilidad de recursos y demandas en las cuencas del río Verde y rambla de Lújar en el litoral granadino*. Estudio realizado por INTECSA.
- DGOH de la Junta de Andalucía 1989-90. *Estudio hidrogeológico de las Sierras Tejeda, Almijara y Guájaras (Málaga-Granada)*. Estudio realizado por INGEMISA.
- DGOH de la Junta de Andalucía 1992. *Estudio de las posibilidades de aprovechamiento de recursos hídricos para suministro al área de Almuñécar (Granada)*. Estudio realizado por INGEMISA.
- DGOH-IGME 1988. *Delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características*. Estudio realizado por EPTISA para la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo y el Instituto Geológico y Minero.
- Diputación Provincial de Granada-ITGE 1990. *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Granada*.
- Fernández-Rubio, R. 1988. *Almuñécar-Intrusión salina. Soluciones a un problema*. TIAC' 88, III. La intrusión en España. Almuñécar, España. 427-438.
- Fernández-Rubio, R. y Jalons, M. 1988. *Nuevos datos sobre el proceso: salinización-desalinización del acuífero aluvial del río Verde (Almuñécar)*. TIAC' 88, III. La intrusión en España. Almuñécar, España. 413-425.
- Fernández-Rubio, R., Benavente, J. y Chalons, J. 1988. *Hidrogeología de los acuíferos del sector occidental de la costa de Granada*. TIAC' 88, II. Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental. Almuñécar, España. 239-265.
- García-Aróstegui, J.L. 1998. *Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga)*. Tesis Doctoral. Univ. Granada. 377 pp.
- García-García, J.L., Ollero, E. y Benavente, J. 1981. *Aplicación de un modelo matemático para comprobar las características hidráulicas de un acuífero aluvial (Las Angosturas, Jete, Granada)*. I Simposio Agua en Andalucía (Granada), 2, 975-987.
- IGME 1983. *Investigación hidrogeológica de las cuencas del Sur de España (sector occidental)*. PIAS. Informe técnico realizado por ENADIMSA.
- IGME 1985. *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes de la provincia de Granada (1ª y 2ª fases)*. Estudio realizado por ENADIMSA. 8 Tomos.
- ITGE 1989. *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase)*. Recopilación de 44 Notas Técnicas de 1985 a 1989.
- ITGE 1992. *Acuífero costero de Almuñécar. Síntesis de trabajos realizados, situación actual y perspectivas futuras*. 61 pp.
- ITGE 1997. *Estudio de las posibilidades de depuración de aguas residuales urbanas mediante la instalación de filtros verdes en Almuñécar y Castell de Ferro (Granada)*. 65 pp.
- ITGE 2000. *Actualización del conocimiento hidrogeológico de la Unidad 06.22 Río Verde y modelización matemática del acuífero*. 104 pp.
- López Geta, J.A. y Ramos G. 1988. *Estudios especiales de desarrollo tecnológico en la lucha contra la contaminación de acuíferos (1987-1988)*. Estudio de las posibilidades contra la intrusión salina mediante la utilización de barreras artificiales. ITGE. Madrid, España. 135-136.
- Oude Essink, G. H., Boekelman, R. H. 1998. *Problemas con el modelado a gran escala de la intrusión de agua salada en 3D*. Traducción Custodio, J. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 109-4. 4-403 a 4-420.
- Padilla, F., Benavente, J. y Cruz San Julián, J. 1997a. *Numerical simulation of the influence of management alternatives of a projected reservoir on a small alluvial aquifer affected by seawater intrusion (Almuñécar, Spain)*. *Environmental Geology*, 33 (1), 72-80.

- Padilla, F., Benavente, J. y Cruz San Julián, J. 1997b. Simulación de diferentes alternativas de gestión de los recursos hídricos en el acuífero costero del río Verde (Almuñécar, España). *Estudios Geológicos*, 53 (3-4), 173-182.
- Velazco, D., Vizcaino, M. y Alvarez, A. 1984. *Proyecto de la Presa de Otívar*. MOPU-CHSE. Informe técnico inédito.
- Verruijt A., Jousma, G. y Thorborg, B. 1988. *Modelación de la intrusión marina revisión de métodos*. TIAC' 88, I. El estado del arte a nivel nacional e internacional. Almuñécar, España. 229-290.
- Waterloo Hydrogeologic, Inc. 1999. *User's manual for Visual MODFLOW: 3-D Groundwater Flow and Transport Modeling*. Waterloo, Ontario. Canada.
- Recibido: Abril 2001
Aceptado: Junio 2001