

Efectos de la explotación intensiva de aguas subterráneas en la ciudad de Murcia (España) en épocas de sequía: orientaciones para una explotación sostenible

R. Aragón, J. Lambán, J.L. García-Aróstegui, J. Hornero y A.I. Fernández-Grillo

Instituto Geológico y Minero de España. Avda. Alfonso X El Sabio, 6. 30008 Murcia (España)
E-mails: r.aragon@igme.es - j.lamban@igme.es - j.arostegui@igme.es - j.hornero@igme.es

RESUMEN

Los períodos de intensas sequías que se padecen en la cuenca del río Segura (SE de España) han provocado notables incrementos de las extracciones de agua subterránea en numerosos acuíferos, entre ellos, el aluvial de la Vega Media del Segura (donde se localiza la ciudad de Murcia), constituido en su parte superior por sedimentos blandos cohesivos con intercalaciones más o menos permeables que se localizan por encima de una capa consolidada de gravas y arenas. El bombeo se concentra en esta capa, lo que ha generado un descenso rápido y acusado del nivel freático en las formaciones más superficiales (entre 5 y 8 metros en el período 1992-1995) induciendo un cambio tensional en el terreno que ha producido una moderada subsidencia (entre 2 y 8 cm en la ciudad), ocasionando importantes desperfectos en numerosas edificaciones. Para el entendimiento del flujo del agua subterránea se ha llevado a cabo un completo estudio hidrogeológico y se ha realizado un modelo numérico del flujo subterráneo con objeto de precisar el funcionamiento hidrodinámico y analizar la influencia de los planes para la captación de recursos en épocas climáticas adversas.

Palabras clave: explotación intensiva, gestión del agua subterránea, hidrogeología urbana, subsidencia

Effects of groundwater intensive exploitation in Murcia city (Spain) in drought periods: orientations for a sustentable exploitation

ABSTRACT

The intense droughts suffered in the Segura River basin (SE Spain) have brought about a significant increase in the extraction of groundwater from numerous aquifers, one of which is the Vega Media del Segura alluvial aquifer (where the city of Murcia is located). The top portion of it is composed of soft, cohesive deposits with more or less permeable intercalations, located above a consolidated layer of gravel and sand. The pumping is concentrated in this layer, which has generated a rapid and prominent decline in water table levels in formations nearer to the surface (from 5 to 8 meters in the 1992 to 1995 period), inducing tensional changes in the land that have produced moderate subsidence (from 2 to 8 cm in the city), resulting in significant damages to ever so many buildings. In order to understand the groundwater flow, a complete hydrogeological study was carried out, and a numerical model of groundwater flow was developed to determine its hydrodynamic functioning and analyze the influence of the different administrations water catchment plans for adverse weather periods.

Key words: groundwater management, intensive exploitation, land subsidence, urban groundwater

Introducción

El aprovechamiento intensivo de las aguas subterráneas en la cuenca del Segura (SE de España), cuyos recursos hídricos superficiales son muy reducidos y de gran aleatoriedad temporal, produce unos evidentes beneficios socioeconómicos, pero la ausencia de planificación en las extracciones ha provocado la aparición de diversos impactos (Aragón, 2003). Entre

ellos, se pueden destacar ciertas patologías detectadas en numerosas edificaciones de la ciudad de Murcia provocadas por la subsidencia del terreno a causa del descenso generalizado del nivel freático motivado por la intensa sequía del período 1992-1995 y el consiguiente incremento de las extracciones de aguas subterráneas para complementar los recursos superficiales disponibles (ITGE-CPTOP, 2000).

Para establecer las bases de una gestión sosteni-

ble de los recursos hídricos subterráneos de la Vega Media del Segura y, en especial, para su aprovechamiento como fuente complementaria de recursos en épocas de sequía, es imprescindible la comprensión de su funcionamiento hidrogeológico, de alta complejidad y alteración antrópica, y el análisis de las posibles afecciones a las edificaciones como consecuencia de los cambios tensionales del terreno provocados por las modificaciones del flujo subterráneo en el acuífero. El presente trabajo pretende contribuir a establecer un modelo racional de aprovechamiento de la unidad habiendo tenido como objetivos principales el entendimiento de su funcionamiento hidrogeológico y la elaboración de una herramienta eficaz de análisis, como es un modelo numérico de flujo, para el estudio del más adecuado régimen de explotación.

La ciudad de Murcia se sitúa sobre depósitos cuaternarios aluviales de la unidad Vega Media-Baja del Segura (figura 1), que corresponde al tramo de llanura aluvial del río Segura comprendido entre el azud de la Contraparada, que fija el límite con la Vega Alta, y el mar Mediterráneo, constituyendo una unidad hidrogeológica con una extensión superficial de 1.046 km². Pertenece a tres comarcas geográficas situadas en las provincias de Murcia (Vega Media) y Alicante (Vega Baja y Campo de Elche). Su longitud es del orden de 65 km y su anchura media de 15 km, variando esta última desde unos pocos cientos de metros aguas abajo de la Contraparada hasta un máximo de 24 km en la zona próxima a la desembocadura del río Segura en el mar Mediterráneo.

Desde el punto de vista geográfico, pueden distinguirse dos zonas: Vega Media, de 206 km², y Vega Baja, de 840 km², cuya diferenciación coincidiría aproximadamente con la divisoria territorial de las provincias de Murcia y Alicante.

Sobre la Vega Media se asientan 28 núcleos urbanos, de los cuales, el más importante es la ciudad de Murcia, cuyo casco tiene una población de unos 200.000 habitantes que se eleva hasta los 350.000 si se tiene en cuenta el entorno periurbano. También hay que considerar Alcantarilla (36.000 hab), Santomera (13.000 hab) y Beniel (9.500 hab). En la Vega Baja existen, igualmente, numerosas poblaciones, con un censo total superior a 425.000 habitantes.

La comarca de la Vega Media tiene forma más o menos rectangular y su topografía es muy suave, con altitudes que van desde 60 m s.n.m. en su sector occidental (zona de Alcantarilla) hasta 30 m s.n.m. en el sector oriental (zona de Beniel), a excepción de algunos resaltes topográficos correspondientes a afloramientos del substrato de la cuenca. Por ella discurren el río Segura y el río Guadalentín o Reguerón, que

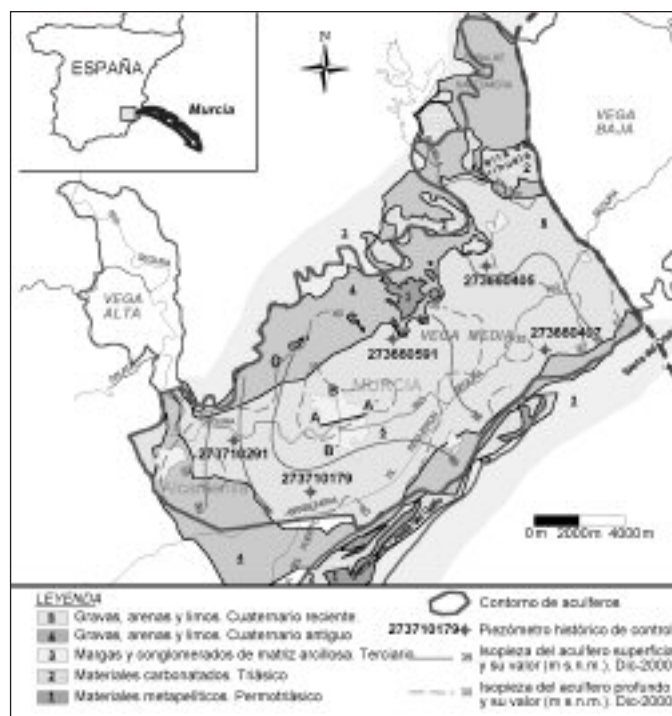


Fig. 1. Situación geográfica del sector acuífero de la Vega Media del Segura y localización de los puntos de observación del nivel piezométrico

Fig. 1. Geographic situation of the Vega Media aquifer sector and location of the piezometric level observing points

desemboca en el Segura a unos 4 km aguas abajo de Murcia. Es de destacar el complejo y extenso entramado de cauces de regadío existentes (azudes, acequias y azarbes), cuyo origen se remonta al tiempo de la dominación árabe y que prácticamente se ha mantenido hasta hoy en las tradicionales huertas de las Vegas del Segura.

En esta zona se desarrollan cultivos de regadío tradicional con aguas del Segura, constituyendo una de las áreas con mayor importancia de todos los regadíos de la cuenca, aunque la presión del crecimiento socioeconómico global de la zona y la diseminación urbana sobre la Vega ha traído como consecuencia una pérdida gradual del carácter fundamentalmente agrícola en favor de actividades urbanas e industriales, la fragmentación de la tierra y la intensificación de los vertidos no tratados a las redes de riego, con el consiguiente deterioro de la calidad de las aguas, por lo que la posibilidad de uso de los retornos se ve seriamente comprometida.

Marco geológico e hidrogeológico

La unidad hidrogeológica Vega Media-Baja del

Segura constituye la continuación hacia el NE de la depresión del Guadalentín, con cuyo acuífero limita o conecta hidrogeológicamente al oeste mediante un cambio de facies, de más arcillosa en el relleno del Guadalentín, a más detrítica gruesa en el del río Segura. Se trata de una fosa tectónica de grandes dimensiones formada por reacondicionamiento de grandes estructuras béticas durante el período de descompresión posterior a la fase compresiva principal de la Orogenia Alpina y rellena por materiales detríticos miocenos, caracterizados por una clara abundancia de facies margosas, y pliocuaternarios. La formación acuífera es el relleno pliocuaternario aluvial constituido por gravas y arenas con intercalaciones arcillosas, cuya proporción con respecto a los tramos permeables aumenta en el sentido de aguas abajo, de forma que el interés hidrogeológico es mayor en la Vega Media.

El sector acuífero de la Vega Media, que se incluye en la unidad mencionada y constituye el objeto de la presente investigación, coincide en superficie prácticamente con la zona geográfica del mismo nombre. Los materiales que lo componen corresponden a un conjunto detrítico que llega a alcanzar los 250 m espesor, cuya edad va desde el Plioceno hasta la actualidad. Desde el punto de vista sedimentológico, el relleno de la Vega Media corresponde a la superposición de dos regímenes de sedimentación fluvial, uno de baja energía –del Guadalentín– que tiende a sedimentar depósitos de granulometría fina a lo largo de toda la transversal de la depresión y otro de alta-media energía –el Segura–. De esta manera, se producen depósitos en régimen de baja energía (limos y arcillas) en los bordes de la cuenca, y en régimen de alta energía (arenas y gravas), en el sector central.

Además del régimen general de sedimentación descrito, influyen otros factores que dan como resultado la existencia de un conjunto de materiales de gran variabilidad en su tamaño de grano, tanto lateral como verticalmente. Por un lado influye el hecho de que en el sentido de aguas abajo aumenta la proporción de materiales finos con relación a los gruesos y el número de tramos superpuestos de distinta litología. También tienen influencia los movimientos neotectónicos de la zona que da lugar a la reactivación sedimentaria sobre todo en los abanicos aluviales, con su consiguiente variación de tamaño de grano de tendencia progradante. Además, a lo largo de los bordes norte y sur de la cuenca, se han formado abanicos aluviales y depósitos de piedemonte, sinsedimentarios con los depósitos fluviales. Tales depósitos de borde presentan facies variables, con cantos heterométricos y matrices arenoso-arcillosas de propo-

ciones variables; también se puede encontrar algún coluvión, pero de escaso espesor y extensión. En este conjunto de materiales de granulometría variable resulta prácticamente imposible la identificación de todos los niveles, así como su correlación lateral, para lo cual sería preciso un número de columnas litológicas que en la práctica resulta imposible de obtener.

Mediante el análisis de columnas litológicas de numerosos sondeos y con el apoyo de los resultados del reconocimiento con geofísica de superficie y testificación de sondeos, este conjunto detrítico, de una alta heterogeneidad litológica tanto vertical como horizontal, puede esquematizarse en dos tramos acuíferos principales (figura 2), uno superficial y otro profundo (IGME-CHS-CTOT, 2002).

El acuífero superficial, de espesor comprendido entre 3 y 30 m, corresponde al tramo superior del conjunto detrítico y está formado por arcillas, arenas finas y limos no consolidados, de escaso interés como acuífero por su baja productividad, pero de gran importancia en el funcionamiento hidrodinámico del sistema porque a través de él se produce la mayor parte de los intercambios de agua del acuífero con el exterior. El rango de conductividad hidráulica horizontal obtenido a partir de los ensayos efectuados y del modelo numérico de flujo subterráneo realizado (período 1994-2001) varía entre 0,01 y 0,5 m/día en función de la zona considerada.

El acuífero profundo es un potente conjunto, situado inmediatamente por debajo del tramo superficial, compuesto a techo por un primer nivel de gravas heterométricas de unos 10 a 30 m de potencia, con matriz variable e irregular continuidad en toda la vega, seguido por un tramo arcilloso que señala el inicio de una alternancia de niveles de granulometría gruesa (gravas y arenas con matriz arenoso-arcillosa) y fina (arcillas, arenas y limos) intercalados en una matriz predominantemente arcillosa. El espesor medio del conjunto inferior es del orden de 150 metros, llegando a superar localmente 200 metros. La conductividad hidráulica horizontal obtenida a partir del modelo de flujo y de los ensayos efectuados suele ser entre 2 y 3 órdenes de magnitud superior a la del acuífero superficial, con valores generalmente comprendidos entre 50 y 120 m/día. La conductividad hidráulica vertical estimada oscila entre 0,5 y 10 m/día.

El impermeable de base corresponde en su mayor parte a margas del Mioceno superior, según se ha podido deducir de la interpretación geofísica realizada (IGME-CHS-CTOT, 2002), ya que prácticamente no se cuenta con ninguna información de sondeos que las hayan alcanzado.

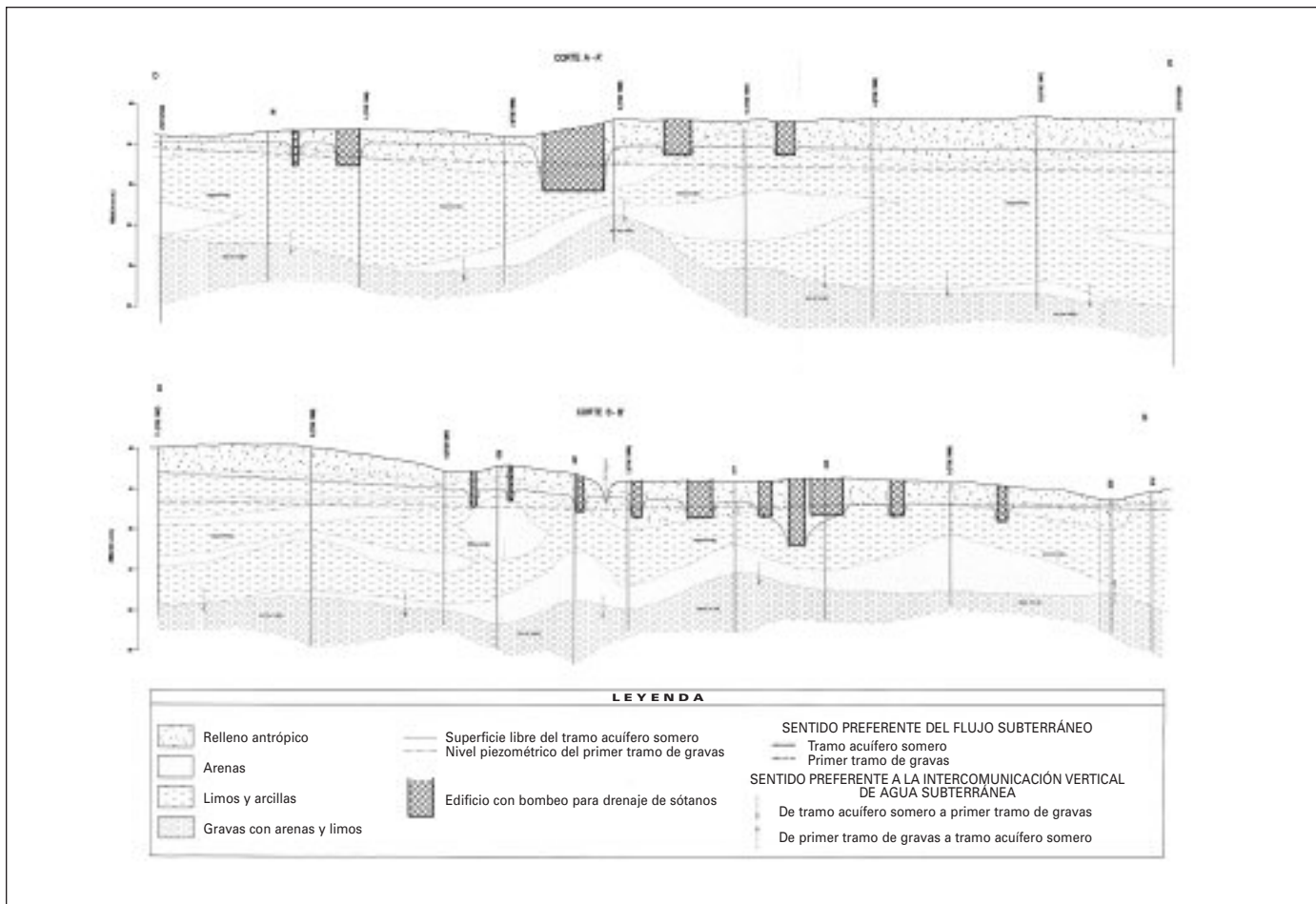


Fig. 2. Cortes hidrogeológicos del subsuelo de Murcia (ITGE-CPTOP, 2000)
 Fig. 2. Hydrogeologic sections of the subsoil of Murcia (ITGE-CPTOP, 2000)

De acuerdo con la litología y geometría de los bordes y el substrato del relleno aluvial, los límites del sector acuífero de la Vega Media coinciden en la mayor parte de su perímetro con la línea de contacto entre el relleno detrítico y los materiales neógenos o permotriásicos, en general de baja permeabilidad, que forman los bordes de la cuenca, por lo que constituirían límites hidrogeológicos a flujo prácticamente nulo, excepto en el sector de la unidad de la Cresta del Gallo y en la reducida zona de contacto con la Vega Alta, donde los límites son abiertos. En los extremos oriental y occidental se han establecido de forma arbitraria, pues existe conexión hidrodinámica con la Vega Baja y el Valle del Guadalentín, respectivamente.

Funcionamiento hidrodinámico

En régimen natural, es decir, prácticamente con

ausencia de bombeos, la Vega Media debía de funcionar como un conjunto único de carácter libre, pero la proliferación e intensificación de los bombeos de agua subterránea desde el año 1992 han modificado este esquema hidrodinámico, dando lugar a una diferenciación que se puede esquematizar en los dos niveles acuíferos mencionados: tramo superficial libre, con nivel freático muy somero, y tramo profundo multicapa semiconfinado. Es en el tramo acuífero profundo, y en especial en el primer nivel de gravas, donde, debido a sus excelentes características hidrodinámicas, se concentran las extracciones de agua para regadío y abastecimiento industrial.

La recarga se produce principalmente por la infiltración del exceso de agua aplicada a los riegos tradicionales con aguas del río Segura y, secundariamente, por recarga de agua de lluvia, infiltración en cauces y entradas laterales subterráneas. La descarga tiene lugar por salidas hacia los ejes de drenaje superficial –río Segura y azarbes–, descarga lateral

subterránea hacia la Vega Baja y bombeos de agua subterránea. Las relaciones laterales con las unidades de borde dependen de las posiciones relativas de las superficies piezométricas y son de escasa magnitud con respecto al balance global del acuífero.

La recarga por infiltración de lluvia se ha calculado mediante la aplicación de un balance hidrometeorológico a escala diaria para el período 1967/68-1999/2000, teniendo en cuenta también, con objeto de apoyar la estimación, la respuesta del acuífero ante diferentes eventos de lluvia que ha sido observada en piezómetros construidos al efecto y en pozos y sondeos seleccionados.

El estrecho control piezométrico permitió controlar y registrar con detalle la respuesta del tramo acuífero somero a las lluvias intensas de los días 23 a 25 de octubre de 2000. A su vez, la evolución piezométrica observada se correlacionó por deconvolución con la lluvia útil calculada para diferentes valores de la reserva útil del suelo, adoptando aquellos que mejor correlación proporcionaban y con los cuales se generó posteriormente una serie de lluvia útil representativa de la recarga natural del acuífero por este concepto para el período mencionado, ya que en rigor se considera que constituye el único recurso renovable (IGME-CHS-CTOT, 2002). Su valor medio interanual es de unos 10 hm³/año, con grandes oscilaciones de un año a otro, como corresponde a la acusada variabilidad pluviométrica, entre valores casi nulos (años 1978/79, 1980/81-1983/84, 1993/94-1995/96 y 1999/2000) y superiores a 30 hm³/año (años 1972/73 y 1986/88).

La evaluación de la recarga por infiltración de retornos de riego ha tenido las siguientes etapas: a) determinación de las superficies de riego y tipos de cultivo; b) estimación de las dotaciones y volúmenes de agua aplicados y c) cálculo de las tasas de infiltración.

Las clases y superficies de cultivo se han obtenido mediante teledetección con imágenes LANDSAT correspondientes a diferentes épocas (marzo y julio de 2000, como representativas de la situación actual, e imágenes de verano entre los años 1985 y 2000 para conocer su evolución) y reconocimiento en campo. La estimación de las dotaciones empleadas en cada tipo de cultivo y zona se ha realizado por medio de encuestas de campo, contrastadas con la información procedente de publicaciones especializadas. La evaluación de los volúmenes aplicados en el regadío se obtiene a partir del conocimiento de la superficie regada y de su dotación, habiéndose procedido a la correspondiente distribución espacio-temporal. Para el cálculo de las tasas de infiltración de los excedentes de riego se han tenido en cuenta los valores obtenidos en las parcelas piloto seleccionadas por su

representatividad de los cultivos mayoritarios de la Vega Media. Para aquellas zonas donde no se disponía de datos experimentales, se han estimado de acuerdo con el tipo de cultivo, forma de riego, pendiente y permeabilidad del terreno. La superficie total de cultivos de regadío en el año 2000 ha sido de 10713 ha –8592 ha de leñosos y 2121 ha de herbáceos–; las correspondientes dotaciones unitarias estimadas mediante encuestas fueron de 7287 y 6082 m³/ha/año, respectivamente. Las experiencias de infiltración modelizadas han permitido estimar en un 18 y un 29% la cuantía del retorno de riegos en cultivos leñosos y herbáceos, respectivamente. En los sondeos realizados en las parcelas de riego seleccionadas se observó la evolución piezométrica antes, durante y después de los riegos y se efectuaron ensayos de bombeo para la determinación de las características hidrodinámicas del acuífero. Se llevó a cabo un seguimiento del riego, mediante el control riguroso del volumen de agua. Finalmente, a partir de las medidas y ensayos realizados, se evaluó la recarga producida mediante la utilización de modelos numéricos de flujo en cada una de las parcelas seleccionadas. La recarga por retorno de riegos, estimada de este modo (IGME-CHS-CTOT, 2002; Gumiel *et al.*, 2001), es del orden de 15 hm³/año, con ciertas variaciones interanuales, en especial en épocas de sequía.

Con respecto a la relación río-acuífero, se considera todavía insuficientemente conocida por ausencia de elementos de contraste. El análisis de los caudales aforados a la entrada y salida de la Vega Media (1968-2004) pone de manifiesto: a) buena correspondencia entre el descenso de los caudales desembalsados desde la cabecera de la cuenca y los caudales aforados en la Vega y b) una importante componente de origen no subterráneo deducido a partir del hidrograma de caudales diarios y la curva de caudales clasificados. El estudio realizado hasta el momento considerando los caudales diarios en octubre, noviembre, diciembre y enero (con objeto de minimizar el caudal generado por los desembalses) aunque suponiendo hipótesis y simplificaciones considerables, indica un predominio de la recarga frente a la descarga subterránea a largo del río. Según los resultados obtenidos por el momento en el modelo numérico, esta recarga es mayor cuando más importantes son las extracciones de agua subterránea.

Modelo numérico de flujo subterráneo en la Vega del Segura

En el marco del proyecto “Estudio Hidrogeológico de la Unidad Vega Media y Baja del Segura” (IGME-CHS-

CTOT, 2002) se ha realizado un modelo numérico de flujo subterráneo en el que se integra todos los datos y estudios parciales realizados hasta el momento, con los siguientes objetivos: 1) revisar, actualizar y mejorar el modelo hidrogeológico conceptual, mediante la utilización de una herramienta que permita integrar y sintetizar toda la información previa disponible y 2) simular distintas hipótesis de funcionamiento regional así como diversos escenarios climáticos y/o de explotación. El código empleado ha sido el MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) en sus versiones Visual MODFLOW 2.7 y Visual MODFLOW 2.81.105 (incluyendo el módulo de calibración automática WINPEST). El modelo numérico está constituido por:

- Capa 1: representa el acuífero superficial, su espesor medio es de unos 20 m y presenta una gran importancia dado que controla tanto la recarga al acuífero profundo como la descarga a través del río Segura, azarbes y lagunas. Se ha simulado con un comportamiento libre (tipo 1) en coherencia con el modelo conceptual.
- Capa 2: representa al complejo o acuífero profundo. En esta capa se centra la mayor explotación, localizándose la mayor parte de los pozos de bombeo. Se ha simulado con un comportamiento mixto de tipo 3 (trasmisividad y coeficiente de almacenamiento variable) y/o con un comportamiento confinado (tipo 0) según el modelo geométrico adoptado.

Los límites del modelo numérico se han adaptado a los de la unidad hidrogeológica 07.24 "Vegas Media y Baja del Segura". Dicha unidad se encuentra limitada al S., por la Sierra de la Cresta del Gallo y su prolongación, pequeños relieves alineados entre las poblaciones del Mojón, Arneva, Jacarilla, Benejuzar, Benijófar, Rojas y Guardamar de Segura. Por el N, la unidad limita con una alineación de relieves desde el Campo de la Matanza hasta las Sierras de Abanilla, Crevillente, Elche y Colmenar. El límite SO viene dado por un cambio lateral de facies desde el Valle del Guadalentín hacia la Vega del Segura (tamaño de grano mayor por los aportes de mayor energía del río Segura). Hacia el E, el límite coincide con el Mar Mediterráneo. Dada la baja permeabilidad de los materiales afectados, se ha utilizado una condición de flujo nulo para todos los límites del modelo a excepción del contacto con la Vega Alta, Bajo Guadalentín y Cresta del Gallo (sector SO) y del límite con el mar (sector E). Así mismo, se ha utilizado este tipo de condición en el muro del acuífero dada la baja permeabilidad de los materiales miocenos que constituyen el substrato. Los aportes procedentes de la Vega Alta, Bajo Guadalentín y Cresta del Gallo se han obtenido de los Planes de Ordenación de la CHS y estudios pre-

vios, siendo éstos de 1,1, 2,5 y 0,39 hm³/año respectivamente. Dicho caudales se han simulado mediante una batería de pozos de inyección. Las salidas al mar se han simulado mediante una condición de tipo G.H.B. Además, se ha utilizado una condición de río para el Segura y una condición de dren para los azarbes. En la recarga se considera conjuntamente la infiltración de la lluvia y retornos de riego, obtenida a partir de estudios previos e independientes (IGME-CHS-CTOT, 2002).

El ajuste y calibración del modelo numérico se ha realizado en régimen estacionario y transitorio. A partir del modelo conceptual, se ha elegido el período 1973-75 como representativo del funcionamiento en condiciones poco influenciadas (régimen estacionario). El proceso de ajuste ha sido iterativo, tanteando los diferentes parámetros a partir de la información previa disponible y calibrando mediante la comparación de los niveles observados y calculados así como mediante la comprobación de los balances resultantes. Para controlar el error entre niveles, los 139 puntos de observación se han agrupado en sectores: Vega Media, Vega Baja, Triásico, Cabecera Vega Media, Norte Vega Baja, Centro Vega Baja y Sur Vega Baja. Para controlar el balance en la Vega Media y Baja se han definido las zonas de balance presentadas en la Figura 3.

Se ha considerado un medio anisótropo ($K_x = K_y < K_z$) dada la alternancia de materiales permeables (arenas y gravas) con poco permeables (arcillas y limos). Los resultados obtenidos en estacionario

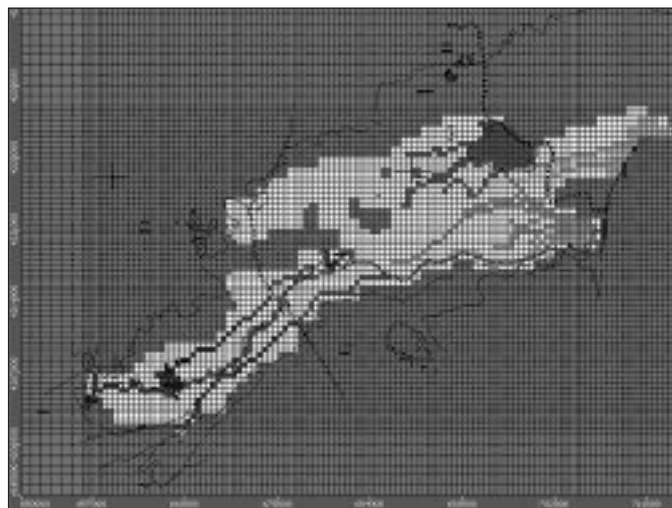


Fig. 3. Discretización espacial y zonas de balance consideradas durante el ajuste y calibración del modelo numérico de la Vega Media y Baja del Segura

Fig. 3. Spatial discretization and groundwater budget zones considered in the calibration of the Vega Media y Baja of Segura numerical model

son razonablemente coherentes con el modelo conceptual. El error medio absoluto para los 139 puntos de observación varía entre 1,1 y 1,3 m (error medio entre 0,01 y -0,18 m) en función de la hipótesis adoptada. Así mismo, los términos principales del balance de agua son también coherentes con la información previa disponible, las mayores diferencias se obtienen en el balance en el río, dada la incertidumbre asociada a la relación río-acuífero anteriormente mencionada (Figura 4).

Posteriormente se ha realizado la calibración en régimen transitorio durante 1994-01 con un paso de tiempo mensual, en coherencia con la información previa disponible. En la entrada de datos se ha considerado la evolución temporal de la recarga, explotación por bombeo y lámina de agua en diferentes tramos del río. Los puntos y datos de observación utilizados corresponden a los controles realizados por el IGME durante 1994-01. La comparación entre niveles se ha realizado analizando tanto la variabilidad espacial como la evolución temporal (Figura 5). El error medio absoluto obtenido por el momento entre todos los niveles observados y calculados en los 25 puntos de observación disponibles en la Vega Media es de 2 m (error medio -0,3 m).

Al igual que en estacionario, se ha tenido en cuenta el orden de magnitud y evolución de los principales términos del balance. La calibración en transitorio permite obtener unos primeros resultados razona-

bles, ajuste de niveles aceptable y balance coherente, aunque condicionados por las simplificaciones e hipótesis adoptadas como consecuencia del elevado número de parámetros implicados, las importantes acciones y modificaciones realizadas con respecto a las condiciones naturales y la escasa información previa disponible. En la Vega Media, la conductividad hidráulica obtenida hasta el momento para el acuífero superficial varía entre 0,05 y 0,5 m/día en función de la hipótesis y zona considerada. La conductividad hidráulica horizontal máxima para el acuífero profundo se encuentra entre 50 y 120 m/día, con una conductividad hidráulica vertical entre 0,5 y 10 m/día en función de la hipótesis y zona considerada.

La extracción intensiva de aguas subterráneas y su impacto

En contraste con otras zonas de la cuenca del Segura, la extracción de agua subterránea en la Vega Media ha sido relativamente poco importante hasta principios de la década de los años 90, del orden de 4 hm³/año (IGME, 1978; ITGE, 1990), debido a que los riegos se han atendido tradicionalmente con aguas superficiales. A partir de entonces se incrementan los bombeos, con valores comprendidos entre máximos de 24 hm³ en el año hidrológico 1994/1995 y de 20 y 23 hm³/año en 1995/1996 y 1999/2001, y mínimos

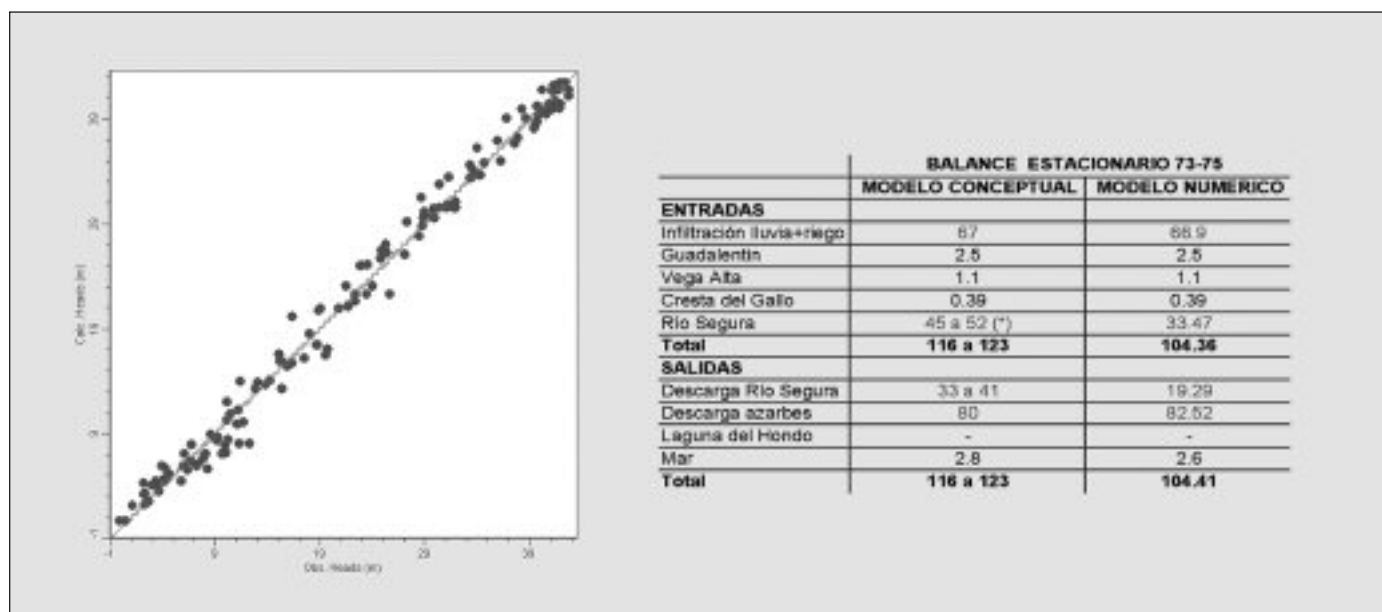


Fig. 4. Resultados obtenidos en régimen estacionario (comparación de niveles y balance entre el modelo conceptual con el modelo numérico); (*)= Valor orientativo

Fig. 4. Results obtained in stationary regime (water tables comparison and groundwater budget between the conceptual model by using the numerical model); (*) = Orientative value

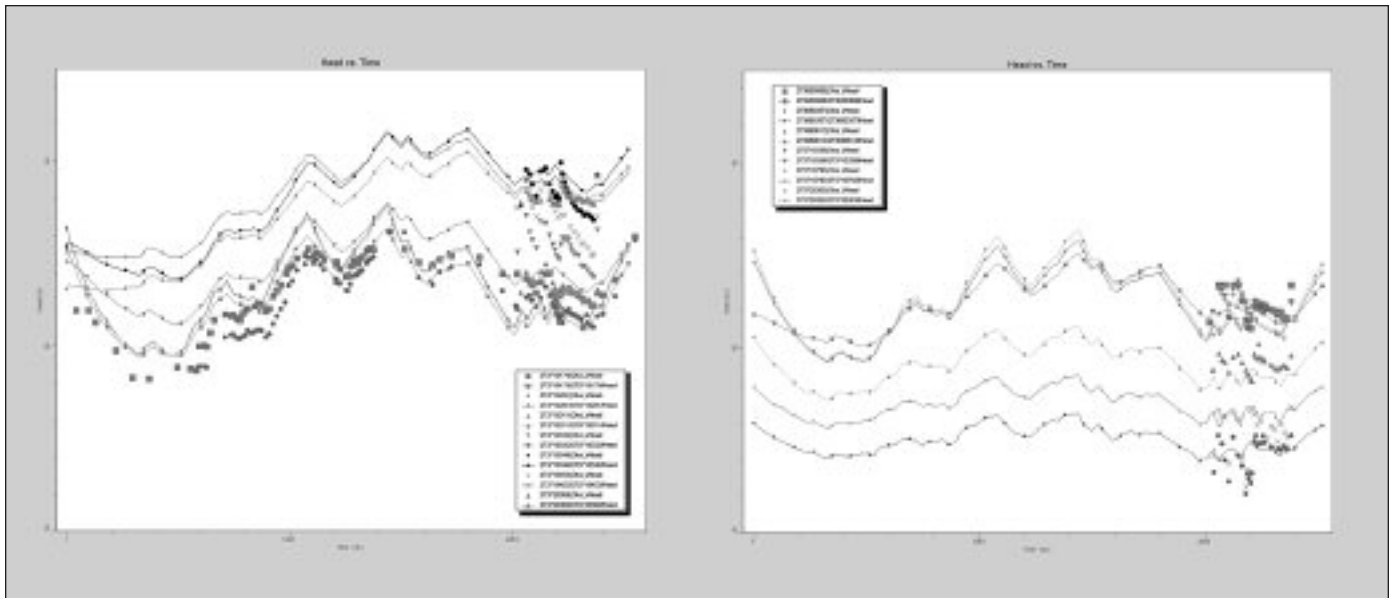


Fig. 5 (a y b). Niveles observados y calculados durante el período 1994-01 (Vega Media)
 Fig. 5 (a and b). Water tables measured versus calculated during 1994-01 period (Vega Media)

entre 12 y 17 hm³/año en el período 1996/1999 (IGME-CHS-CTOT, 2002).

La representación de la evolución de los niveles piezométricos en la Vega Media del Segura durante el período 1970-2003 (figura 6a) permite observar claramente la existencia de un descenso generalizado de niveles durante los períodos 1983-85 y, sobre todo, 1992-95, en coherencia con las situaciones de sequía durante dichas épocas y los bombeos efectuados para paliar sus consecuencias. Las evoluciones pueden considerarse cualitativamente similares y muestran, a excepción de los períodos indicados, variaciones suaves ligadas a la secuencia normal de los riegos y a los episodios de lluvias. Después del mínimo absoluto en el estiaje de 1995 los niveles se recuperaron con relativa rapidez, situándose hacia finales de 1997 en posiciones similares a las anteriores al período de sequía, evolución coincidente con la observada en los más de 40 piezómetros existentes en el casco urbano de Murcia y sus alrededores.

En el período de sequía 1992-1995 se produjo una notable disminución de la recarga al acuífero (muy significativa reducción del volumen de agua aplicada al riego y casi nula aportación pluviométrica) y se incrementaron fuertemente los bombeos. El período más crítico correspondió al año hidrológico 1994/95 en el que la recarga, casi exclusivamente por retornos de riegos, supuso unos 11 hm³. En el mismo período las salidas por bombeo fueron de 24 hm³, concentradas mayoritariamente en el primer nivel de gravas del

acuífero profundo, aunque también hay que tener en cuenta aquellas otras que tienen lugar en el superficial y cuyo objeto son los sistemas de refrigeración y el drenaje de sótanos en algunos edificios de la ciudad. El balance hídrico resultante, claramente deficitario, se tradujo en un notable descenso de los niveles freáticos de las formaciones limo-arcillosas del tramo superior, cuya evolución ya venía evidenciando con claridad los balances deficitarios de años anteriores, originando un proceso de consolidación del terreno y dando lugar a asentamientos diferenciales de edificaciones, produciéndose en gran número de ellas desperfectos importantes (ITGE-CPTOP, 2000); la recuperación de niveles se produjo durante el período 1996-1998. Hay que resaltar que a partir de finales de 1998 vuelve a producirse una situación de precariedad en la disponibilidad de recursos, por lo que de nuevo se incrementan las extracciones del acuífero hasta principios de 2001, lo que tiene su reflejo inmediato en la evolución piezométrica, nuevamente descendente si bien no con la magnitud del período anterior debido a un menor desequilibrio entre la recarga y la descarga (figura 6b). Durante el año 2001 se inicia otra vez una recuperación del sistema.

Los descensos piezométricos producidos en la ciudad de Murcia como consecuencia del período de sequía 1992-1995 se sitúan entre 5 y 8 metros, con una media que ligeramente supera los 6 metros, aunque en algunos puntos del resto de la Vega se han llegado a registrar valores máximos cercanos a los 15 metros (figura 6).

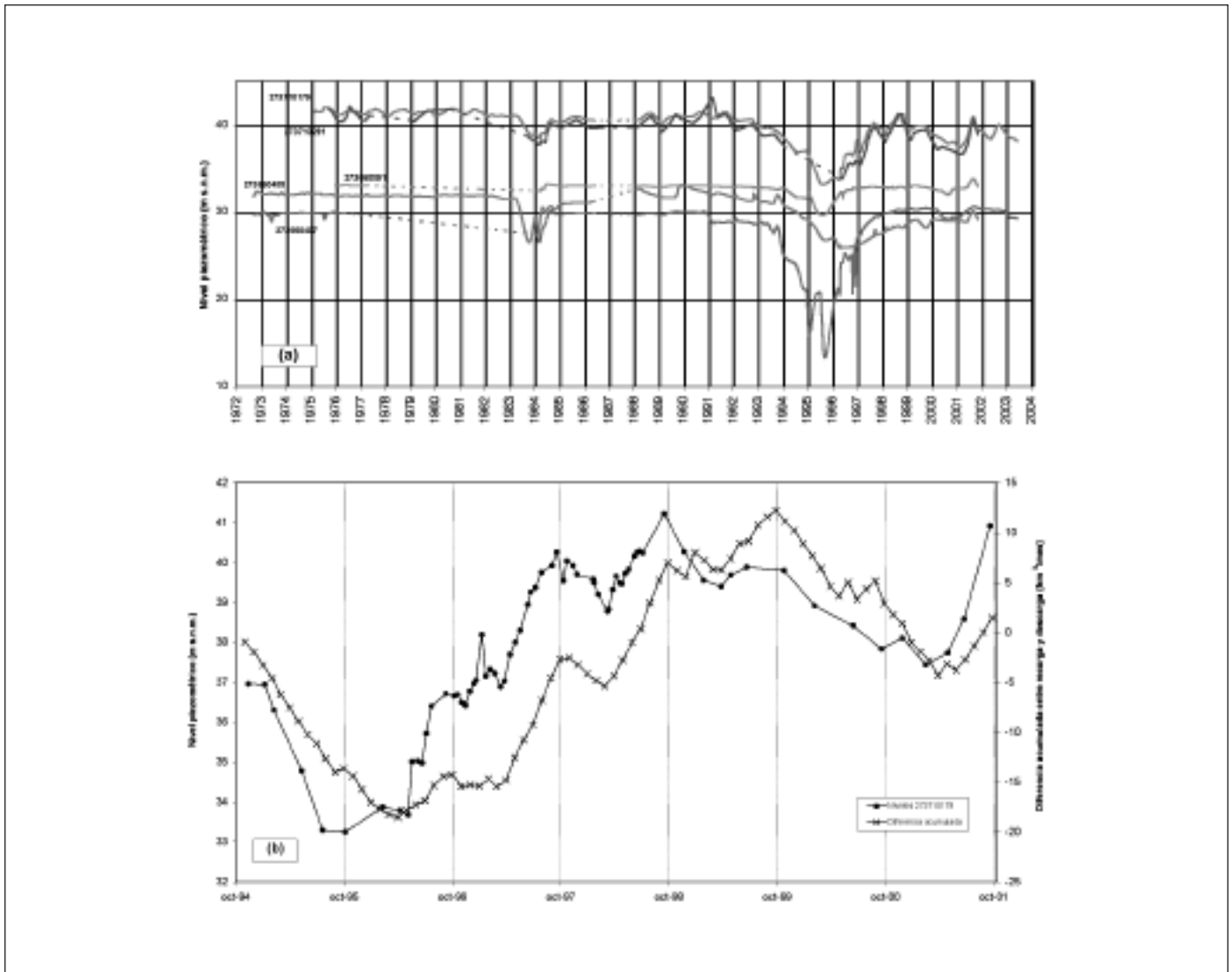


Fig. 6. Evolución histórica de niveles piezométricos en la Vega Media del Segura (a) y comparación entre un piezómetro representativo de la evolución en la ciudad de Murcia y el balance del acuífero para el período analizado (b). La situación de los puntos de observación de los niveles piezométricos puede observarse en la figura 1

Fig. 6. Historical evolution of piezometrics levels in the Vega Media of Segura (a), and comparison between a representative piezometer of the evolution in the city of Murcia and groundwater balance for the analyzed period (b). The situation of the piezometrics levels observing points is shown in figure 1

Impacto en las edificaciones

La subsidencia que ha tenido lugar en Murcia puede atribuirse a dos situaciones hidrológicas relacionadas, como son la sequía (menor recarga) y la extracción de agua fundamentalmente de los niveles de gravas, que dan lugar a un descenso del nivel freático en los niveles arcillosos superiores y a una depresión de la altura piezométrica en las gravas profundas.

Desde el punto de vista geotécnico, el tramo somero es el que constituye la unidad en la que se produce la subsidencia por compactación de los sedi-

mentos blandos cohesivos, mientras que el profundo se considera prácticamente incompresible.

El análisis de la subsidencia del terreno se ha basado en el principio de Terzaghi, que relaciona la variación de las tensiones efectivas con las variaciones de las presiones intersticiales, y por tanto con las oscilaciones piezométricas. Los asentamientos del terreno se han calculado mediante modelación numérica, en función de las características del medio físico y el descenso del nivel freático, utilizando el programa Zsoil V.4, que permite la evaluación de la deformación con acoplamiento hidráulico (IGME-

COPOT, 2001; Mulas *et al.*, 2003). El orden de magnitud obtenido es moderado, con asientos máximos teóricos de 8 cm en algunos sectores del casco urbano. Sin embargo, los daños producidos en las edificaciones han sido considerables, repartidos por casi todas las zonas de la ciudad, por lo que puede concluirse que las moderadas subsidencias han afectado a los edificios en función de sus propios problemas estructurales o de cimentación, localmente agravados por bombeos puntuales para drenaje de sótanos, aparcamientos, etc. (ITGE-COPOT, 2000).

Hay que indicar que existe una limitación en la cuantificación real del proceso de subsidencia, aspecto éste que se está tratando de remediar con la explotación de los datos aportados por la red de control de asentamientos instalada en la zona sureste de la ciudad en el año 2001, que está sirviendo para calibrar el modelo geotécnico teórico realizado y contrastar con las observaciones piezométricas efectuadas. Esta red está compuesta de 7 bases topográficas de referencia, 628 hitos de nivelación y 22 extensómetros de dos tipos: 7 de tipo incremental y 15 de varilla. En la actualidad se ha propuesto su ampliación al casco urbano de Murcia y a otras zonas de la Vega.

Orientaciones para una explotación sostenible del acuífero de la Vega Media

Aunque las demandas de agua de esta zona son atendidas en su mayor parte con recursos externos a la misma, la frecuencia de situaciones de sequía en la Vega Media derivadas, fundamentalmente, de la insuficiencia de disponibilidades de recursos superficiales regulados por los embalses de cabecera de la cuenca y, en menor medida, de la escasez de precipitaciones en la propia zona de riego, hace aconsejable plantear unas medidas de actuación con el objetivo de conseguir una explotación sostenible de sus recursos hídricos subterráneos, que sea a su vez compatible con la utilización controlada de sus reservas para paliar los efectos adversos de futuras sequías.

Este planteamiento debe partir del análisis de la situación registrada anteriormente. A tal fin, se ha adoptado el período 1967-2000, por ser el de mayor duración ininterrumpida para el que se ha conseguido suficiente información (tabla 1).

Hay que precisar que para la estimación de la evolución de la demanda anual de agua para riego se ha partido de la evaluación realizada para el año 2000, y se ha considerado que representa el final de una disminución uniforme del 10% desde el año 1980, a razón de un 0,5% anual; a partir de 1980, hacia atrás,

se ha supuesto que se mantuvo estable. Dichas hipótesis se basan en el estudio por teledetección de las superficies de cultivos existentes en determinados años y en la información recopilada. No obstante, al no haberse podido conseguir una evaluación anual precisa de la reducción realmente registrada durante las dos últimas décadas (período en el que ha tenido lugar la mayor parte de la producida en la segunda mitad del siglo XX), el valor calculado para la recarga por retorno de riegos es orientativo, en especial en su distribución anual. Esta es la razón por la que no existe una coincidencia plena en aquellos años para los que se dispone de datos reales, como es el caso del período 1994-2000. Pero a los efectos de la valoración del papel que pueden desempeñar las aguas subterráneas de este acuífero para paliar los efectos de las sequías, esta leve discrepancia carece de importancia.

De acuerdo con los resultados del análisis efectuado para el período 1968-2000, cuyos resultados se indican en la tabla 1, en el sector acuífero de la Vega Media existen recursos subterráneos suficientes (si se considera no sólo la recarga por lluvia sino también por retorno de riego) para reducir significativamente, o incluso anular en algunos casos, la infratación de los cultivos en épocas de insuficiente disponibilidad de agua superficial regulada por los embalses de la cuenca. Sin embargo, la deficiente calidad que en ocasiones presentan las aguas subterráneas hará necesaria su desalación mediante los oportunos tratamientos.

El análisis de la utilización sostenible de los recursos y reservas hídricas del acuífero deberá contemplar una optimización de la localización de las obras de captación y del régimen de bombeo, tarea que se debe llevar a cabo apoyándose en los resultados de las oportunas simulaciones mediante el modelo numérico del flujo subterráneo elaborado. Además, habría que contar con las posibilidades de modulación de los bombeos de explotación al hacer intervenir la utilización de aguas residuales disponibles. Sin embargo, hay dos condicionantes de gran importancia, que deben ser introducidos en las tareas de simulación y optimización: la necesidad de limitar los descensos piezométricos en áreas urbanas hasta donde los criterios geotécnicos lo impongan, y la distribución espacial de la calidad del agua subterránea. La incorporación de ambos condicionantes enlaza con la evidente necesidad de introducir aspectos económicos muy relevantes, como son los relativos a las necesidades de inversión en plantas desaladoras (si se quiere utilizar aguas de inadecuada calidad), y otros costes muy diversos de implantación y explotación.

AÑO	DEMANDA DE AGUA PARA RIEGO (hm ³ /a) (a)	DOTACIÓN DE AGUA SUPERFICIAL REGULADA POR LA CHS (hm ³ /a) (b)	DEMANDA DE RECURSOS COMPLEMENTARIOS (aguas subterráneas, residuales, etc.) (hm ³ /a) (c)=(a)-(b)	RECARGA HIDROGEOLÓGICA (infiltración de lluvia) (hm ³ /a) (d)	RECARGA AGRÍCOLA (retorno de riesgos) (hm ³ /a) (e)	DÉFICIT HÍDRICO (hm ³ /a) (c)-(d)-(e)
1968	83,43	83,43	0,00	12,60	17,00	0,00
1969	83,43	83,43	0,00	1,27	17,00	0,00
1970	83,43	83,43	0,00	14,60	17,00	0,00
1971	83,43	83,43	0,00	3,70	17,00	0,00
1972	83,43	83,43	0,00	9,71	17,00	0,00
1973	83,43	83,43	0,00	38,57	17,00	0,00
1974	83,43	83,43	0,00	12,79	17,00	0,00
1975	83,43	83,43	0,00	14,19	17,00	0,00
1976	83,43	83,43	0,00	10,80	17,00	0,00
1977	83,43	83,43	0,00	3,83	17,00	0,00
1978	83,43	83,43	0,00	3,16	17,00	0,00
1979	83,43	83,43	0,00	0,00	17,00	0,00
1980	83,43	83,43	0,00	26,94	16,83	0,00
1981	83,02	83,02	0,00	0,83	16,75	0,00
1982	82,60	97,65	0,00	0,25	16,67	0,00
1983	82,19	34,10	48,09	3,79	16,58	27,72
1984	81,78	34,10	47,68	1,46	16,50	29,72
1985	81,38	54,10	27,28	12,23	16,42	0,00
1986	80,97	60,00	20,97	8,42	16,34	0,00
1987	80,57	35,34	45,23	32,76	16,26	0,00
1988	80,17	82,46	0,00	29,43	16,18	0,00
1989	79,77	72,85	6,92	23,42	16,10	0,00
1990	79,37	60,00	19,37	11,07	16,02	0,00
1991	78,98	60,00	18,98	26,64	15,94	0,00
1992	78,58	35,34	43,24	12,52	15,86	14,87
1993	78,19	47,20	30,99	13,69	15,78	1,53
1994	77,80	33,60	44,20	0,15	15,70	28,36
1995	77,42	12,00	65,42	0,52	15,62	49,28
1996	77,03	30,54	46,50	1,50	15,54	29,46
1997	76,65	30,54	46,11	6,49	15,47	24,16
1998	76,27	40,76	35,51	1,31	15,39	18,81
1999	75,89	66,34	9,55	4,31	15,31	0,00
2000	75,51	39,68	35,83	0,00	15,24	20,59
Promedios	80,9	63,5	17,9	10,4	16,4	7,4

Tabla 1. Evolución de la disponibilidad de agua en la Vega Media. Período 1968-2000

Table 1. Water availability evolution in the Vega Media. 1968-2000 period

Conclusiones

En conclusión, y de cara a una correcta gestión de este acuífero que trate de compatibilizar los intereses de sus usuarios con los del resto de la sociedad y de minimizar los efectos adversos de su aprovechamiento, conviene poner de manifiesto que la respuesta de la Vega Media (en especial del nivel freático del acuífero superficial) frente a la variación de los bombeos, la recarga y, fundamentalmente, por la acción combi-

nada de ambas acciones, implica una acusada modificación de las características geotécnicas de las formaciones más someras. Al ser éstas las que constituyen la base de cimentación de buena parte de las edificaciones de la ciudad, se comprende que cualquier política de aprovechamiento de recursos hídricos en esta zona debe tener en cuenta el funcionamiento del acuífero para evitar que se repitan en el futuro los efectos negativos que recientemente han tenido lugar. Por tanto, es imprescindible seleccionar

las áreas en principio con menor grado de susceptibilidad a la subsidencia (en general, las alejadas del sector central de la Vega), y con el modelo numérico de flujo subterráneo estimar la incidencia hidrodinámica de las extracciones de aguas subterráneas, así como el régimen de bombeo con objeto de que los descensos piezométricos inducidos en las áreas urbanas no superen los valores a partir de los cuales, según su simulación en el modelo geotécnico, se generen asentamientos del terreno con posible incidencia en las edificaciones. Es evidente que se debería realizar un control detallado de la evolución del nivel piezométrico y de los movimientos del terreno.

La previsión y prevención de futuras subsidencias aconseja además establecer una serie de medidas entre las que cabría mencionar la elaboración de ordenanzas referentes a cimentaciones por pilotaje con consideración del rozamiento negativo y un adecuado empotramiento en el sustrato de gravas, así como aquellas de buena práctica general referentes a saneamientos y servicios y a limitación de drenajes, agotamientos y bombeos desde excavaciones. En las épocas de sequía, el régimen de los bombeos suplementarios de emergencia debe establecerse de manera que el descenso inducido no supere una profundidad de seguridad fijada con arreglo a criterios geotécnicos y constructivos. También sería conveniente analizar la viabilidad de la recarga artificial con aguas residuales depuradas, que para una mayor eficacia debería realizarse en los tramos de gravas del acuífero profundo.

Agradecimientos

El presente trabajo forma parte del "Estudio hidrogeológico de la unidad de las vegas Media y Baja del Segura", proyecto realizado por el Instituto Geológico y Minero de España en convenio con la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas (Confederación Hidrográfica del Segura) y la Consejería de Turismo y Ordenación del Territorio de Murcia, organismos a los que se agradece su financiación y las facilidades prestadas.

Referencias

- Aragón, R. 2003. Las aguas subterráneas de la cuenca del Segura: problemática y oportunidades. *Hidropres*, 39, 52-62.
- Gumiel, J.C., García-Aróstegui, J.L., Hornero, J., Aragón, R., Fabregat, V., Fernández-Grillo, A.I. y Moreno, M. 2001. Evaluación mediante teledetección de superficies agrícolas y estimación de demandas de agua en la Vega Media del Segura (Murcia). En: VII Simposio de Hidrogeología. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XXIII, 71-81. AEH-IGME. Madrid.
- IGME. 1978. *Las Vegas Media y Baja del Segura*. En: Investigación hidrogeológica de la cuenca baja del Segura. Plan Nacional de Investigación de las Aguas Subterráneas. Informe inédito.
- IGME-CHS-CTOT. 2002. *Estudio hidrogeológico de la unidad Vega Media y Baja del Segura*. Informe inédito.
- IGME-COPOT. 2001. *Estudio geotécnico del subsuelo del área metropolitana de Murcia. Análisis de la subsidencia por descenso del nivel freático. Modelos Geotécnicos del terreno y diagnóstico del problema*. Informe inédito.
- ITGE. 1990. *Racionalización y optimización de las redes de control hidrogeológico de la cuenca del Segura*. Informe inédito.
- ITGE-CPTOP. 2000. *Estudio geotécnico e hidrogeológico para el análisis, prevención y corrección de la patología derivada de los cambios en el subsuelo de la ciudad de Murcia*. Informe inédito.
- McDonald, M.C. y Harbaugh, A.W. 1988. *Modflow, a modular three-dimensional finite difference groundwater flow model*. U.S. Geological Survey. Open-file report 83-875, Chapter A1. Washington, D.C.
- Mulas, J., Aragón, R., Martínez, M., Lambán, J., García-Aróstegui, J.L., Fernández Grillo, A.I., Hornero, J., Rodríguez, J. y Rodríguez, J.M. 2003. Geotechnical and hydrogeological analysis of land subsidence in Murcia (Spain). In: Proc. 1st International Conference on Groundwater in Geological Engineering. Bled (Slovenia). Petric M., Pezdic, J., Trcek, B., Veselic, M. (eds). RMZ. *Materials and Geoenvironment. Groundwater in Geological Engineering*; Vol. 50 (1), 249-252. Ljubljana (Slovenia).

Recibido: octubre 2005

Aceptado: julio 2006