

# Recarga natural y simulación de alternativas de gestión mediante el modelo "ERAS". Aplicación al acuífero de Peñarrubia (Alicante)

J.M. Murillo y F.J. Roncero

Instituto Geológico y Minero de España. c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.  
E-mail: jm.murillo@igme.es

## RESUMEN

En el presente artículo se exponen los fundamentos matemáticos y conceptuales de un modelo matemático unicelular que se ha denominado ERAS (Estimación Recarga Acuíferos Sobreexplotados). El modelo se aplica al acuífero de Peñarrubia (Alicante) con objeto de estimar la recarga natural y simular la evolución de sus niveles piezométricos ante distintas cuantías de explotaciones del acuífero y diferentes tipos de series climáticas. El modelo precisa para su construcción y calibración de datos geométricos, hidrodinámicos, termoplúviométricos, de extracciones y de evolución piezométrica.

El acuífero de Peñarrubia es permeable por fisuración y karstificación y está formado por calizas del Jurásico Superior, calcarenitas del Portlandiense-Barremiense y calizas terciarias. Geográficamente se ubica entre las poblaciones de Sax y Biar, en la comarca del Alto Vinalopó (Alicante) y sus recursos hídricos se aprovechan tanto para abastecimiento urbano como para regadío. El acuífero se encuentra desde hace tiempo sometido a una explotación intensiva de sus recursos que ha propiciado que la evolución de sus piezómetros refleje una situación caracterizada por un descenso continuo de los niveles.

Teniendo en cuenta la próxima puesta en funcionamiento del trasvase Júcar-Vinalopó cabe indicar que el modelo puede constituir una herramienta de apoyo a la toma de decisiones adecuadas que planteen un uso sostenible de este acuífero. Los resultados que arroja el mismo, tras simular diferentes hipótesis de gestión, avalan esta idea y seguramente servirán de ayuda en la planificación hidrológica del acuífero. En este sentido es menester indicar que las simulaciones realizadas hasta la fecha ponen de manifiesto que a partir de un bombeo superior a 1 hm<sup>3</sup>/a se prolonga muchísimo el tiempo que tardan los niveles piezométricos en alcanzar la cota que tenían cuando el acuífero funcionaba en régimen natural. En caso de que estos bombeos fuesen ligeramente superiores a 4,5 hm<sup>3</sup>/a el acuífero no se recuperaría nunca.

Palabras clave: acuífero de Peñarrubia, Alicante, generación de series, modelo matemático, recarga natural

## ***Natural recharge and simulation of the management using the model "ERAS". Application to the Peñarrubia aquifer (Alicante)***

### ABSTRACT

*This paper describes the mathematical and conceptual principles underlying the unicellular mathematical model termed ERAS (Estimation Recharge Aquifer Overexploitation). This model was applied to the aquifer of Peñarrubia (province of Alicante, Spain) in order to evaluate its natural recharge and to simulate the evolution of piezometric levels with respect to different rates of water extraction from the aquifer, for various climate series. In order to construct and calibrate the model, geometric and thermoplúviometric data were required, as well as values for extraction rates and piezometric-level variations.*

*The Peñarrubia aquifer is constituted of Upper Jurassic limestones, of Portland-Barremian calcarenites and of Tertiary limestones. It is permeable by fissuring and by karstification. It is situated between the towns of Sax and Biar, in the Alto Vinalopó area (province of Alicante), and the aquifer water is exploited both for urban supply and for crop irrigation. The aquifer has long been subjected to intensive exploitation and thus piezometric levels have fallen continuously.*

*Taking into account the forthcoming startup of the Júcar-Vinalopó water transfer plan, the model could provide a useful tool for decision taking to achieve a sustainable exploitation pattern for the aquifer. The results obtained from application of the model, on the basis of different management hypotheses, support this notion and will be of assistance in planning the optimum exploitation of the aquifer. It should be noted that the simulations made to date reveal that an extraction rate of over 1 hm<sup>3</sup> per year causes a great extension in the time needed for piezometric levels to return to the levels measured with the aquifer functioning under a natural regime. At pumping rates of slightly over 4.5 hm<sup>3</sup> per year, the aquifer would never recover its original piezometric levels.*

*Key words: Alicante, generation of series, mathematical model, natural recharge, Peñarrubia aquifer*

## Introducción

Se denomina recarga al proceso por el que se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del contorno que lo limita (Custodio, 1997-a; Custodio, 1998). Otros autores (Freeze y Cherry, 1979) definen este fenómeno como un proceso por el cual el exceso de infiltración sobre la evapotranspiración drena desde la zona radicular y continúa circulando en dirección descendente a través de la zona no saturada hasta la capa freática.

La recarga natural a los acuíferos es un término básico del balance hídrico y su conocimiento y evaluación constituyen un problema extremadamente complejo que requiere identificar los mecanismos a través de los cuales tiene lugar dicho proceso, así como el tipo y distribución espacial de las diferentes fuentes de agua que intervienen en cada evento de recarga (Custodio, 1997-b).

Cada uno de los mecanismos o formas en que se produce la recarga a los acuíferos requiere de una metodología de estudio diferente. De igual forma hay que identificar y establecer las distintas fuentes de agua que intervienen en dicho proceso. A este respecto pueden establecerse los siguientes métodos de cálculo de la recarga a los acuíferos (Lerner *et al.*, 1990):

- Métodos de medición directa.
- Métodos de balance de agua.
- Métodos hidrodinámicos.
- Métodos hidroquímicos, isotópicos y de aplicación de técnicas de trazadores.
- Métodos empíricos y térmicos.

Por lo que respecta a los métodos de balance de agua cabe indicar que la posibilidad de utilizar un determinado modelo depende de la cantidad y calidad de la información disponible, por eso los modelos complejos, que parecen en principio más adecuados para proporcionar mejores resultados, no lo son tanto en la práctica debido a la incertidumbre que se detecta en la información que se posee y al desconocimiento que se tiene sobre el valor que adquieren ciertos parámetros, que intervienen en el modelo, para el ámbito del área de trabajo.

Estas consideraciones de orden práctico implican que en ocasiones pueda resultar adecuado o conveniente, por el equilibrio que existe entre la calidad y la cantidad de la información disponible y la que se precisa para poder aplicar un determinado modelo, utilizar aplicaciones sencillas de pocos parámetros. Una de estas aplicaciones podrían constituirlos aquellos acuíferos, como es el caso tratado en el presente artículo, que, catalogados como sobreexplotados, reaccionan ante la recarga de un modo rápido.

En relación con la terminología "sobreexplotado" cabe indicar, aunque en la actualidad existe una tendencia generalizada a sustituir dicho vocablo por la expresión desarrollo intensivo de las aguas subterráneas (Llamas y Custodio, 2002) que se considera más concreta y menos peyorativa, que en el presente artículo se ha decidido conservar dicho término, aunque con una cierta matización que limita su uso únicamente a aquellos acuíferos que tras sufrir una explotación intensiva y continuada de sus recursos hídricos presentan un estado en el que se conjuga por un lado que han desaparecido las descargas naturales del mismo y, por otro, que el período de recuperación de sus niveles piezométricos, una vez cese todo tipo de explotación, se evalúa en un tiempo superior al de una generación (como mínimo varias décadas).

La finalidad del presente trabajo es evaluar la recarga natural al acuífero de Peñarrubia, así como prever la evolución del mismo ante diferentes alternativas de gestión. Para alcanzar estos objetivos se ha empleado un modelo matemático unicelular de tipo depósito, que ya ha sido utilizado en el estudio de otros acuíferos kársticos con éxito, como es el caso del acuífero jurásico de Cabezón de Oro (Murillo y De la Orden, 1996), el acuífero de Orba (Armador *et al.*, 2001) y el acuífero de Ventós-Castellar (Andreu *et al.*, 2001) que se localizan en la provincia de Alicante.

## Metodología de trabajo

El modelo matemático que a continuación se expone tiene su fundamento en el modelo MEDA (Iglesias, 1984) que a su vez es fruto del estudio del manantial de Alomartes (Castillo, 1981 en Martín *et al.*, 1992).

La recarga natural al acuífero se calcula en el modelo como una fracción de la lluvia útil que viene determinada a través de la expresión:

$$Llu_i = P_i - T_i^\beta \quad (1)$$

donde  $P_i$  y  $T_i$  son la precipitación y la temperatura en el mes  $i$  y  $\beta$  un parámetro de calibración cuyo valor medio aproximado es 1,4 pero que puede variar entre 1,3 y 1,6 dependiendo de las características climáticas de la zona en estudio. Experimentalmente se ha comprobado que los valores altos de  $\beta$  son adecuados para zonas cálidas y los bajos para aquellas que son más frías (Iglesias, 1984).

La expresión (1) se ha deducido a partir de la publicación titulada "Evapotranspiraciones potenciales y balances de agua en España" (Eliás y Giménez, 1965). En la misma se muestran diversos datos de evapo-

transpiración y balances de agua en España que se obtuvieron mediante la aplicación de diversos métodos de cálculo (Turc, Thornthwaite, Blaney-Criddle y Penman) para un cierto número de estaciones termopluviométricas de primer orden de importancia situadas a lo largo de la geografía española.

La recarga natural al acuífero para el mes  $i$  viene dada por la expresión:

$$R_i = M \cdot (P_i - T_i^\beta)^N \quad (2)$$

donde  $R_i$  es la recarga natural que se produce en el período  $i$ , y  $M$  y  $N$  parámetros adimensionales de una correlación lineal el primero y potencial el segundo que están sujetos a calibración.

La variación del almacenamiento que tiene lugar en el período "i" se puede evaluar mediante la expresión:

$$V_{Ai} = \Delta h_i \cdot FAG_i \quad (3)$$

donde  $V_{Ai}$  es la variación de almacenamiento que tiene lugar en el período "i";  $\Delta h_i$  es la variación del nivel piezométrico durante el período "i" y  $FAG_i$  es un factor que se ha llamado de almacenamiento global, cuyo valor es igual al producto del coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) por el área del embalse subterráneo ( $A_i$ ), ya que cada uno de estos factores puede adoptar valores diferentes para cada paso de tiempo, aunque en la práctica se consideren constantes y conocidos.

La variación del almacenamiento también se puede expresar como:

$$V_{Ai} = R_i - B_i \quad (4)$$

donde  $B_i$  es la cantidad de agua bombeada durante el período "i".

Igualando las expresiones (3) y (4) se obtiene una expresión que relaciona las variables "variación del nivel piezométrico" con "recarga" y "extracción por bombeo" para un determinado período "i":

$$R_i - B_i = \Delta h_i \cdot FAG$$

$$\Delta h_i = (R_i - B_i) / FAG$$

$$\Delta h_i = [ M \cdot (P_i - T_i^\beta)^N - B_i ] / FAG \quad (5)$$

En la expresión (5) el factor de almacenamiento global se considera constante.

La principal ventaja que aporta el modelo expuesto, dado que se trata de un método que evalúa la recarga por contraste con las oscilaciones de la

superficie freática, es su independencia del mecanismo de desplazamiento del agua en el suelo y en la zona no saturada. Esto implica evitar la difícil estimación y calibración de los parámetros y variables que intervienen en dichos procesos. En contrapartida el modelo únicamente tiene aplicación en acuíferos que reaccionan ante la recarga de un modo rápido independientemente de que su agotamiento sea lento. La validez de la expresión (5) se sustenta en el hecho de que la respuesta freática de un acuífero o de sus caudales de descarga, ante un evento de recarga, están regidos por efectos hidráulicos y no suponen necesariamente un movimiento físico del agua.

La expresión (5) se puede generalizar al objeto de contemplar otras fuentes de recarga tales como las que se enumeran a continuación: 1) pérdidas de agua que tienen lugar en las redes de distribución y saneamiento ( $R_{ds}$ ); 2) recarga que tiene lugar a través del lecho de ríos permanentes, estacionales o efímeros ( $R_r$ ); 3) recarga procedente de otros acuíferos y acuitardos ( $R_a$ ); 4) recarga ligada a las pérdidas por infiltración que tienen lugar en embalses, depósitos y balsas ( $R_e$ ); 5) recarga que tiene lugar por excedentes y retornos de riego ( $R_{er}$ ); 6) recarga que se produce a partir del agua embalsada en lagos, lagunas o cualquier otra zona húmeda ( $R_h$ ) y 7) recarga artificial e inducida ( $R_{ai}$ ). Asimismo también es posible contemplar otras salidas de agua en el acuífero, distintas de los bombeos, tales como la evapotranspiración que tiene lugar desde el acuífero ( $ET_a$ ) o el flujo subterráneo de descarga ( $Q_s$ ) que viene determinado por la expresión

$$Q_s = Q_{s0} e^{-\alpha \Delta t} \quad (6)$$

donde  $Q_{s0}$  y  $Q_s$  son los caudales de descarga en los tiempos  $t_0$  y  $t$ ,  $\alpha$  el coeficiente de agotamiento y  $\Delta t = (t - t_0)$  el intervalo de tiempo entre los instantes  $t_0$  y  $t$ .

Si se contemplan todas las variables anteriormente enunciadas la expresión (5) se transforma en la siguiente

$$\Delta h_i = [ M(P_i - T_i^\beta)^N + (R_{ds})_i + (R_r)_i + (R_a)_i + (R_e)_i + (R_{er})_i + (R_h)_i + (R_{ai})_i - B_i - (ET_a)_i - (Q_s)_i ] / FAG \quad (7)$$

La correcta aplicación de la expresión (5) exige que cualquier recarga distinta de la natural por infiltración directa del agua de lluvia sea nula. Asimismo también exige que no exista ni evapotranspiración desde el acuífero ni flujo subterráneo de descarga.

Por último indicar que el programa de cálculo que desarrolla la expresión (5) se ha realizado mediante programación sobre una hoja de cálculo EXCEL, por lo que su manejo es muy sencillo.

## Aplicación al acuífero de Peñarrubia (Alicante-España)

La elaboración del modelo se ha estructurado según cuatro etapas que se han denominado: modelo conceptual, datos de partida a introducir en el modelo matemático, calibración y validación del modelo, y análisis de sensibilidad.

### Modelo conceptual

El acuífero de Peñarrubia, que se extiende a lo largo de una superficie de unos 41,5 km<sup>2</sup> aproximadamente, se sitúa entre las poblaciones de Sax y Biar (Alicante), ambas pertenecientes a la comarca del Alto Vinalopó (figura 1).

Desde el punto de vista fisiográfico se encuentra surcado por la Sierra de Peñarrubia cuya altitud oscila entre 1.042 m s.n.m. en Peñarrubia y 500 m s.n.m. en el sector occidental.

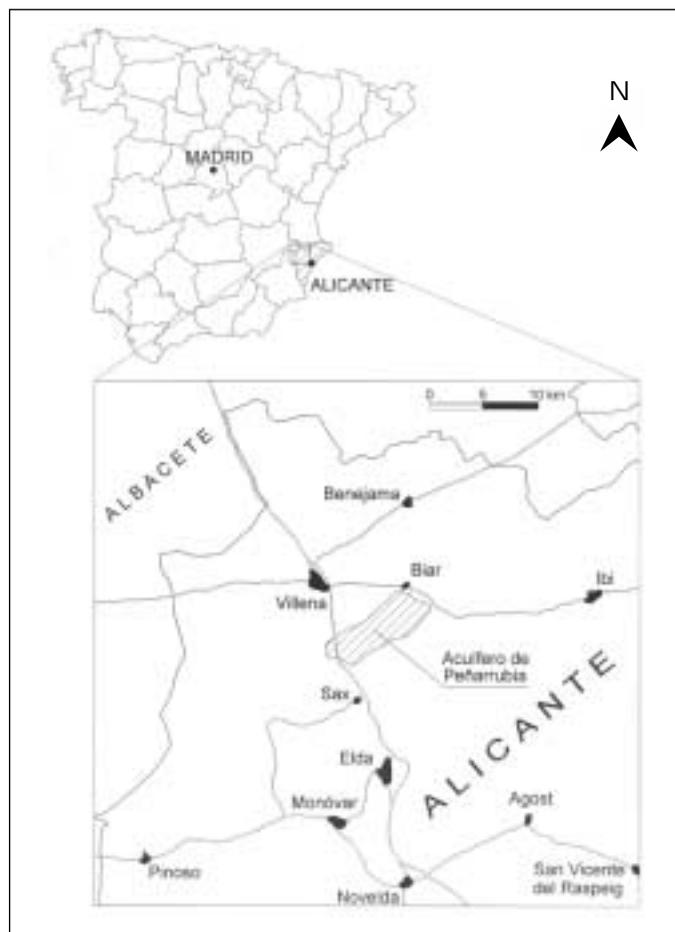


Fig. 1. Localización del área de estudio  
Fig. 1. Situation of the study area

Litológicamente está constituido por calizas del Jurásico Superior, calcarenitas del Portlandiense-Barremiense y calizas terciarias. Estas formaciones son permeables por fisuración y karstificación y tienen un espesor medio de unos 500 metros (DPA-IGME, 1982).

En el acuífero de Peñarrubia se considera que las únicas entradas de agua que tienen lugar en el mismo provienen de la recarga a que da lugar la infiltración de la lluvia útil. Ésta, al igual que en el resto de los acuíferos de valle del Vinalopó, está muy influenciada por la escasez e irregularidad de la precipitación (Rico, 1994). Las salidas de este sistema hídrico se realizan exclusivamente por bombeos en los pozos y sondeos utilizados en abastecimiento urbano, industria y agricultura. El flujo subterráneo en el acuífero se corresponde con una dirección aproximada de NE-SO y se dirige hacia el extremo suroccidental que es donde se realizan las mayores extracciones. Los valores más representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero se encuentran comprendidos entre el 1% y el 2% (DPA-IGME, 1982).

El acuífero se encuentra incluido en el "Catálogo de acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización" que ha elaborado la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas (DGOH-CA) en colaboración con el Instituto Tecnológico Geominero de España (DGOHCA-ITGE, 1998).

El modelo conceptual que se ha descrito anteriormente es aplicable a un modelo matemático de tipo unicelular, como el que se expone en el presente artículo, que se ha denominado ERAS en alusión a las siglas del objetivo que pretende determinar que es la estimación de la recarga en acuíferos sobreexplotados.

### Datos de partida

El modelo precisa como datos de partida para su construcción y calibración los siguientes: precipitaciones, temperaturas, bombeos, variaciones de nivel piezométrico, área de embalse y coeficiente de almacenamiento. Estos datos se operan según un paso de tiempo mensual.

### Climatología

De cara a la introducción de los datos de pluviometría y temperatura en el modelo matemático de simulación se ha elegido como estación meteorológica más representativa del sistema hídrico la número 8007

(Villena), por ser ésta la más cercana al acuífero de Peñarrubia. En dicha estación termopluviométrica faltan 13 datos de temperaturas que corresponden a la totalidad del año 1994 y al mes de diciembre del año 1992. El completado de estos huecos se ha realizado a partir de datos correspondientes a la estación meteorológica número 80061 (Villena-La Vereda).

### Niveles piezométricos

Sólo hay datos históricos de nivel piezométrico en dos puntos de control que se identifican con el siguiente número de inventario del IGME:

- 2833-1-0019
- 2833-1-0035

En el punto acuífero 2833-1-0019 se han realizado únicamente 11 medidas de nivel que abarcan desde febrero de 1984 a abril de 1991, mientras que en el punto acuífero 2833-1-0035 se tiene 34 que se concentran casi todas ellas en el período que va de septiembre de 1988 a junio de 1999. En ambos casos es preciso indicar que la serie de medidas es escasa y presenta una periodicidad de control notablemente discontinua, por lo que no resulta del todo adecuada para proceder a una correcta calibración del modelo matemático. El piezómetro 2833-1-0035, por su mayor número de datos, se ha elegido como elemento de contraste en la etapa de calibración, mientras que el piezómetro 2833-1-0019 se ha reservado para realizar, con los mismos parámetros que se han obtenido en la etapa de calibración, una nueva comparación de niveles en un período de tiempo diferente. A este proceso se le ha denominado validación.

### Extracciones

Los datos de extracciones son incompletos, dispersos y de periodicidad anual hasta 1989, como se muestra en la Tabla 1 que se ha elaborado a partir de DPA-IGME (1982), DGOHCA-ITGE (1998) y (DPA-IGME, 2003-a). Posteriormente, durante los años 1989, 1994, 1995 y 1996, la Diputación Provincial de Alicante tomó y archivó datos de extracciones mensuales (Tabla 2) en su sistema de Telemedida y Control de Recursos Hídricos e Infraestructuras Hidráulicas. El análisis realizado sobre estos datos ha puesto de manifiesto que la serie a la que dan origen no presenta continuidad, no es suficientemente larga y representativa y no es totalmente coincidente con el período en que existen datos de control piezométrico. Además, sí se comparan las Tablas 1 y 2, se observa una importante discrepancia en el valor asignado a la

extracción para el año 1989, que genera un cierto grado de incertidumbre sobre los datos a introducir en el modelo matemático.

Las consideraciones enunciadas anteriormente limitan la validez del modelo que se pretende aplicar y los valores de la extracción contenidos en las tablas 1 y 2 no se han empleado en la construcción del mismo, aunque si se han utilizado como una magnitud de referencia. Los datos de extracción que se han introducido en el presente modelo matemático proceden del trabajo titulado "Posibilidades de almacenamiento de las aguas del trasvase Júcar-Vinalopó en los embalses subterráneos provinciales mediante recarga artificial. Simulación de la Gestión de los recursos hídricos en el Alto Vinalopó" (IGME-DPA, 2002). Dichos datos (tabla 3) son el producto de una serie sintética elaborada a partir de encuestas realizadas por el Instituto Geológico y Minero de España, la Diputación Provincial de Alicante y la Comunidad General de Usuarios del Alto Vinalopó (ITGE-DPA, 2000).

Período Totales (hm <sup>3</sup> /a)	Extracciones e Industria (hm <sup>3</sup> /a)	Abastecimiento (hm <sup>3</sup> /a)	Regadío
1972-1975	9,5	-	-
1977	10,6	7,4	3,2
1980-1983	12,6	-	-
1988	7,5	4,95	2,55
1989	5,7	2,3	3,4

Tabla 1. Datos anuales de extracción en el acuífero de Peñarrubia  
Table 1. Annual exploitation data for the Peñarrubia aquifer

	1989	1994	1995	1996
Ene	144.548	339.000	331.592	294.005
Feb	155.335	630.800	542.400	366.409
Mar	157.492	610.800	486.000	563.111
Abr	491.194	122.000	514.128	507.556
May	198.453	775.600	1.111.014	1.109.363
Jun	545.718	638.400	977.498	798.575
Jul	906.221	497.009	600.025	702.459
Ago	603.348	680.340	622.350	451.252
Sep	198.484	716.291	588.164	909.584
Oct	176.909	436.600	543.645	579.901
Nov	157.492	240.813	263.946	308.583
Dic	135.918	322.400	282.040	311.229
Total	4.103.018	6.010.053	6.862.802	6.902.027

Tabla 2. Datos mensuales de explotación en el acuífero de Peñarrubia para los años 1989, 1994, 1995 y 1996 expresados en m<sup>3</sup>  
Table 2. Monthly exploitation data (m<sup>3</sup>) for the Peñarrubia aquifer for the years 1989, 1994, 1995 and 1996

Año	En	Fe	Ma	Ab	Ma	Ju	Ju	Ag	Se	Oc	No	Di	Total
1988	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	0.8	0.7	0.6	0.4	0.5	5.9
1989	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.5	0.4	0.4	0.5	5.7
1990	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	0.9	1.0	0.7	0.4	0.4	0.5	6.0
1991	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.7	1.1	1.0	0.7	0.5	0.4	0.6	6.5
1992	0.5	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	1.1	1.0	0.7	0.5	0.5	0.5	6.5
1993	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	1.1	1.0	0.7	0.5	0.4	0.5	6.3
1994	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4	0.7	1.1	1.0	0.6	0.4	0.4	0.5	6.3
1995	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.7	1.1	1.0	0.7	0.4	0.5	0.5	6.4
1996	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	1.1	1.0	0.6	0.5	0.4	0.5	6.2
1997	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	0.8	0.5	0.6	0.4	0.5	5.7
1998	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.7	1.1	0.8	0.7	0.6	0.4	0.5	6.3
1999	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.7	1.1	0.8	0.6				

Tabla 3. Datos mensuales de extracción ( $hm^3$ ) en el acuífero de Peñarrubia (IGME-DPA, 2002)  
 Table 3. Monthly exploitation data ( $hm^3$ ) for the Peñarrubia aquifer (IGME-DPA, 2002)

### Otros datos

Se ha considerado un área de embalse de  $41.5 km^2$  (DPA-IGME, 1982) y un coeficiente de almacenamiento comprendido entre el 1% y el 2% (DPA-IGME, 1982).

### Calibración y validación del modelo

Durante la fase de calibración se han variado los parámetros M, N y S en la expresión matemática (5) realizando un proceso iterativo que busca que la diferencia entre los resultados modelados y los medidos esté por debajo de un valor de cierre que es el error asumido. Se ha escogido como intervalo de calibración el período que abarca desde septiembre de 1988 a junio de 1999. Los valores de M, N y S que han proporcionado un mejor ajuste han sido los siguientes:

- M = 4,35
- N = 0,875
- S = 0,018

En la figura 2 se muestra la representación gráfica de la evolución piezométrica de los niveles medidos y simulados cuando se opera con los anteriores valores de M, N y S. En la misma se observa un escaso número de medidas piezométricas (media de 3 medidas al año) que no permiten abordar la etapa de calibración con garantía. Por esta razón, durante el proceso de calibración, se ha dado prioridad a la minimización del error que se comete al ajustar los valores medidos y los simulados durante el período de tiempo comprendido entre los años 1997 y 1998. Se ha elegido dicho período porque en el mismo se han realizado las encuestas más fiables de extracción de agua en el acuífero.

El siguiente paso en la elaboración del modelo ha sido la validación del mismo con los parámetros obtenidos en el proceso de calibración, pero utilizando un piezómetro y un período de tiempo diferente. En la figura 3 se muestra la representación gráfica de la evolución de los niveles piezométricos medidos y simulados para la etapa de validación. En dicha figura se observa al igual que ocurría en el gráfico de calibración un escaso número de medidas piezométricas (media de 1 medida cada 8 meses) que no permiten confirmar los resultados obtenidos durante la etapa de calibración. Sin embargo, si se realiza una corrección en la altitud de la cota topográfica del piezómetro que se ha utilizado durante la etapa de validación, que puede tener un error de  $\pm 20 m$ , ya que dicha referencia se dedujo (DPA-IGME, 1982) de un mapa topográfico a escala 1:50.000, se obtiene un ajuste muy preciso entre los valores medidos y los simulados para el período de tiempo comprendido entre los años 1989 y 1991.

### Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad tiene por objeto evaluar la posibilidad, si existe, de obtener un ajuste de las medidas observadas, tan bueno o mejor que el realizado durante la etapa de calibración, utilizando un valor de los parámetros que intervienen en la construcción del modelo diferente al empleado en la etapa de calibración. La metodología que se emplea para realizar esta operación consiste en variar los parámetros uno a uno o por grupos y evaluar cómo cambia el resultado del modelo y el rango en que se puede variar cada parámetro sin alterar significativamente el resultado.

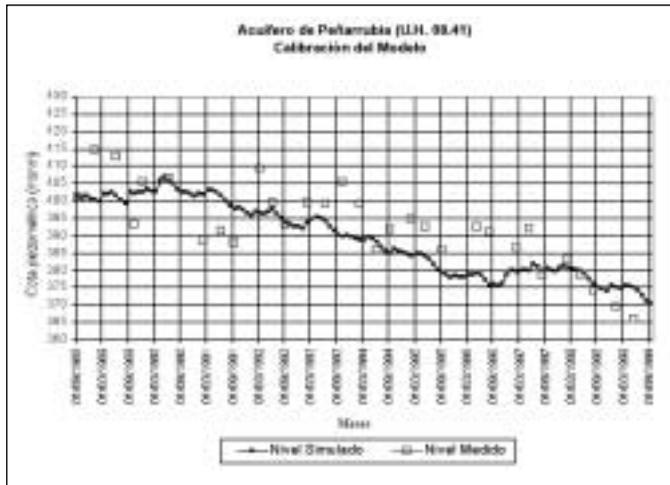


Fig. 2. Calibración del modelo con  $M = 4,35$ ,  $N = 0,875$  y  $S = 0,018$   
 Fig. 2. Calibration of the model with  $M = 4.35$ ,  $N = 0.875$  and  $S = 0.018$



Fig. 3. Validación del modelo con el valor de los parámetros de  $M$ ,  $N$  y  $S$  que proporcionan un mejor ajuste en la etapa de calibración  
 Fig. 3. Validation of the model with the values of parameters  $M$ ,  $N$  and  $S$  that provide the best fit during the calibration stage

En el caso del parámetro "M" se ha operado con los valores:  $M = 2,50$ ,  $M = 3,00$ ,  $M = 4,00$ ,  $M = 5,00$  y  $M = 5,70$  aparte del valor de  $M = 4,35$  que ha sido el utilizado en la calibración del modelo. En el análisis realizado los valores de  $N$  y  $S$  han permanecido fijos en los valores de calibración del modelo ( $N = 0,875$  y  $S = 0,018$ ). Los resultados de este análisis de sensibilidad se observan gráficamente en la figura 4. En la misma se puede ver que para valores de  $M$  de  $5,00$  y de  $5,70$  los resultados que se obtienen se ajustan bien a los valores medidos en la red piezométrica entre 1993 y 1997, pero se apartan notablemente de los controles realizados en esta red entre 1998 y 2000 que es el período donde se tienen datos de extracciones más fiables. En esta época (1998-2000) se obtiene un mejor ajuste cuando se emplean valores de  $M$  situados entorno a  $4,35$ . Por último indicar que para valores de  $M$  inferiores a  $4,00$  se obtienen unos resultados que no se ajustan a los valores medidos en la red de observación y difieren bastante de los obtenidos en la etapa de calibración ( $M = 4,35$ ). Por consiguiente se puede concluir que fuera del intervalo definido por  $4,35 > M > 4$  se obtienen unos resultados que se alejan notablemente de los medidos en la red de observación.

En el caso del parámetro "N" se ha realizado el análisis de sensibilidad aplicando los valores:  $N = 0,855$ ,  $N = 0,865$  y  $N = 0,880$ ,  $N = 0,885$ ,  $N = 0,890$ ,  $N = 0,900$  y  $N = 0,910$ , aparte del valor de  $N = 0,875$ , que ha sido el utilizado en la calibración del modelo. En el análisis de sensibilidad de este parámetro se han mantenido los parámetros  $M$  y  $S$  fijos en los valores de calibración del modelo ( $M = 4,35$  y  $S = 0,018$ ). Los

resultados que se obtienen se muestran gráficamente en la figura 5. En la misma se puede observar, análogamente a lo que ocurría para el parámetro  $M$ , que existen unos valores de  $N$  comprendidos entre  $0,890$  y  $0,900$  que permiten realizar un mejor ajuste de los datos tomados entre 1993 y 1997. En general se puede indicar que para valores de  $N$  fuera del intervalo definido por  $0,880 > N > 0,865$  se obtienen unos resultados que se apartan notablemente de los obtenidos en la etapa de calibración.

El análisis de sensibilidad en el caso del parámetro "S" se ha realizado con los valores:  $S = 0,01$ ,  $S = 0,015$ ,  $S = 0,02$ ,  $S = 0,03$  y  $S = 0,04$ , aparte del valor de  $S = 0,018$  que es el correspondiente a la calibración del modelo. En todos los supuestos los valores de  $M$  y  $N$  se han dejado fijos en los valores de calibración del modelo ( $M = 4,35$  y  $N = 0,875$ ). Los resultados del análisis de sensibilidad para este parámetro se pueden ver gráficamente en la figura 6. En dicha figura se observa como en el caso de valores de  $S$  ligeramente superiores a  $0,018$  los niveles simulados se ajustan a los medidos en el período comprendido entre los años 1993 y 1997, pero se alejan de las últimas medidas tomadas en el acuífero (1997-2000). El valor de calibración  $0,018$  permite obtener un mejor ajuste a las medidas tomadas en el año 1998, finales de 1997 y comienzos de 1999, que es el período donde se poseen los datos de extracciones más fiables, como se ha comentado en el apartado donde se analiza la calibración y la validación del modelo. Por último indicar que para valores de  $S$  inferiores a  $0,015$  se obtienen unos resultados que difieren marcadamente de los medidos en la red de observación y de los

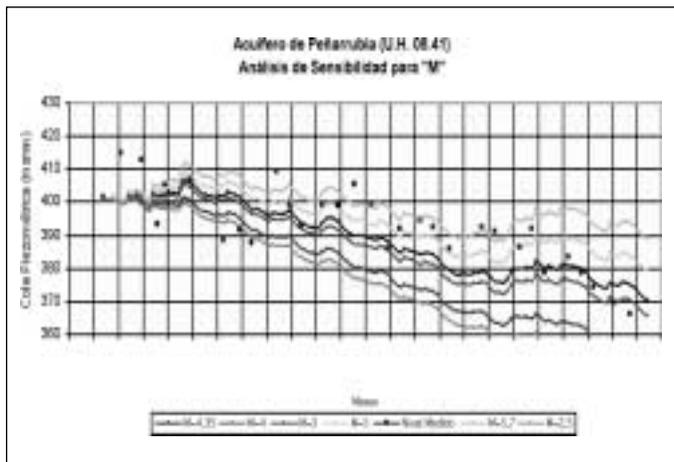


Fig. 4. Análisis de sensibilidad para el parámetro "M"  
 Fig. 4. Sensibility analysis for the M parameter

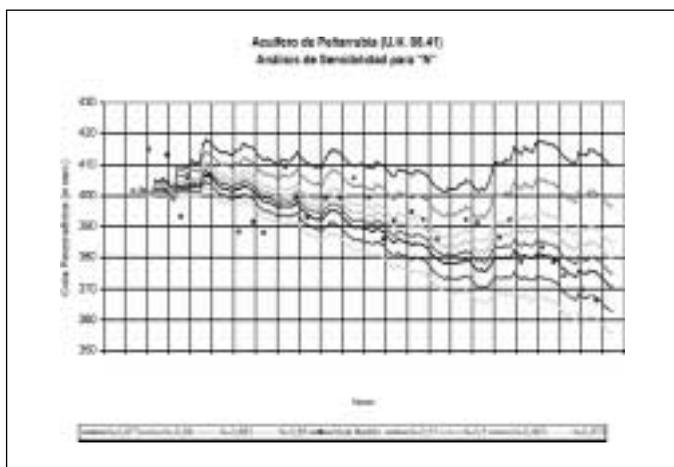


Fig. 5. Análisis de sensibilidad para el parámetro "N"  
 Fig. 5. Sensibility analysis for the N parameter



Fig. 6. Análisis de sensibilidad para el parámetro "S"  
 Fig. 6. Sensibility analysis for the S parameter

obtenidos en la etapa de calibración ( $S = 0,018$ ). Por consiguiente se puede concluir que fuera del intervalo determinado por  $0,02 > S > 0,015$  se llega a unos resultados que se alejan bastante de los medidos en el punto de observación.

### Estimación de la recarga natural

Una vez realizada la calibración del modelo matemático, así como su posterior validación, se han obtenido unos valores de los parámetros M y N que permiten estimar la recarga natural del acuífero en todos aquellos años hidrológicos en los que se tienen datos de precipitaciones y temperaturas. En la tabla 4 se muestra, por razones de espacio ya que el paso de tiempo del modelo es el mes, el valor de la recarga natural anual para período 1960-1999. La tipología del año climático que figura en dicha tabla se ha calculado a partir de la función de distribución de Goodrich. En la tabla 5 se indica los porcentajes de lluvia útil y recarga al acuífero sobre la precipitación acaecida y el porcentaje de recarga al acuífero sobre la lluvia útil acaecida.

Los datos contenidos en las tablas 4 y 5 proporcionan las siguientes pautas acerca del comportamiento del acuífero durante el período 1960-1999:

- El total de lluvia caída sobre el sistema ha sido de 14.513,05 mm, lo que supone un total de 602.436.706 m<sup>3</sup>. La fracción de esa lluvia que se ha convertido en lluvia útil ha sido de 257.083.234 m<sup>3</sup>. El valor medio anual del porcentaje de lluvia útil sobre la lluvia total caída en el acuífero para el período tratado es de 40,21%. Este porcentaje guarda un orden de magnitud muy similar al que se obtiene para otros acuíferos de la zona. Así en el acuífero de Solana dicho porcentaje es de 42,72% (DPA-IGME, 2003-b y Murillo *et al.*, 2004) y en el acuífero de Serral-Salinas de 40,21% (Corral *et al.*, 2004)
- La recarga natural del acuífero durante el período estudiado ha sido de 183.756.184 m<sup>3</sup>. La recarga media anual para el intervalo 1960 a 1999 ha sido de 4.711.697 m<sup>3</sup>/a. El valor máximo de la recarga anual fue de 9.105.829 m<sup>3</sup> en el año hidrológico 1996-97 (año húmedo), mientras que el mínimo fue de 1.139.099 m<sup>3</sup> en el año 1977-78 (año seco). El valor de la recarga media anual que se ha calculado mediante la aplicación del presente modelo matemático es muy parecido al que aportan otros trabajos. Así en el trabajo titulado "Mapa del Agua de la Provincia de Alicante" (DPA, 1992) se evalúan los recursos hídricos del acuífero de Peñarubia en 5 hm<sup>3</sup>/a y en el trabajo titulado "Las aguas subterráneas de la provincia de Alicante"

Año Hidrológico	Lluvia (mm)	Lluvia (m³)	Lluvia útil (m³)	Recarga Natural (m³)	Tipo de año
1960-61	368,1	15.279.831	6.295.691	4.618.256	Medio
1961-62	520,2	21.593.502	10.867.345	7.465.784	Húmedo
1962-63	500,2	20.763.302	9.319.808	6.875.776	Húmedo
1963-64	430,7	17.878.357	9.090.580	6.300.032	Húmedo
1964-65	333,1	13.826.981	6.050.502	4.062.663	Medio
1965-66	439,3	18.235.343	6.426.304	4.714.651	Húmedo
1966-67	351	14.570.010	7.230.434	4.972.778	Medio
1967-68	324,5	13.469.995	6.603.252	4.885.767	Medio
1968-69	324,2	13.457.542	4.398.560	3.536.038	Medio
1969-70	225	9.339.750	4.121.691	3.095.209	Seco
1970-71	473,8	19.667.438	11.934.201	8.486.623	Húmedo
1971-72	544,1	22.585.591	12.883.411	9.039.521	Húmedo
1972-73	549,3	22.801.443	13.137.017	8.875.694	Húmedo
1973-74	466	19.343.660	10.128.926	7.019.523	Húmedo
1974-75	471,05	19.553.286	9.835.712	6.775.955	Húmedo
1975-76	411,7	17.089.667	6.727.231	4.980.175	Medio
1976-77	448,6	18.621.386	7.243.228	5.173.505	Húmedo
1977-78	222,2	9.223.522	1.389.036	1.139.099	Seco
1978-79	231,5	9.609.565	1.368.159	1.155.410	Seco
1979-80	394,5	16.375.695	8.879.120	6.369.853	Medio
1980-81	233,5	9.692.585	2.907.010	2.152.633	Seco
1981-82	226,5	9.402.015	3.039.086	2.376.868	Seco
1982-83	412,5	17.122.875	7.822.682	5.061.043	Medio
1983-84	332,5	13.802.075	4.715.156	3.639.903	Medio
1984-85	301,5	12.515.265	5.629.154	3.906.421	Seco
1985-86	369,7	15.346.247	4.365.168	3.220.467	Medio
1986-87	243,5	10.107.685	1.991.805	1.636.498	Seco
1987-88	516	21.419.160	11.083.821	7.649.444	Húmedo
1988-89	522,7	21.697.277	9.934.570	6.723.775	Húmedo
1989-90	384,2	15.948.142	8.206.903	5.822.276	Medio
1990-91	238	9.879.380	3.449.044	2.657.756	Seco
1991-92	291,6	12.104.316	4.671.606	3.531.169	Seco
1992-93	359,5	14.922.845	4.919.642	3.638.183	Medio
1993-94	259,4	10.767.694	2.540.717	1.977.266	Seco
1994-95	297,1	12.332.621	3.062.565	2.305.654	Seco
1995-96	361,3	14.997.563	4.874.261	3.855.844	Medio
1996-97	609,6	25.304.496	13.008.155	9.105.829	Húmedo
1997-98	259,8	10.784.298	2.873.160	2.105.448	Seco
1998-99	265,1	11.004.301	4.058.523	2.847.395	Seco
Total	14.513	602.436.706	257.083.234	183.756.184	
Promedio	372,1	15.447.095	6.591.878	4.711.697	

Tabla 4. Series históricas de la recarga natural del acuífero de Peñarrubia  
 Table 4. Historical series for natural recharge into the Peñarrubia aquifer

(DPA-IGME, 1982) se cuantifica la recarga natural procedente del agua de lluvia en 4 hm<sup>3</sup>/a, si bien se menciona en dicho trabajo que los recursos hídricos del acuífero de Peñarrubia deben ser mayores, pues existen aportes laterales procedentes del acuífero de Sierra Mariola que no han sido cuantificados.

- El porcentaje promedio anual de la recarga al acuífero sobre la precipitación acaecida y de la recarga al acuífero sobre la lluvia útil acaecida han sido de 29% y 73,18% respectivamente. Estos porcentajes difieren notablemente de los que se obtiene para el acuífero de Serral-Salinas que son de 13,06% para la recarga al acuífero sobre la llu-

via útil y de 4,72% para la recarga al acuífero sobre la precipitación acaecida (Corral *et al.*, 2004). Este último porcentaje es del mismo orden de magnitud que el obtenido en el acuífero de Ventós-Castellar (Andreu *et al.*, 2001) que se ha estimado, para el período 1997-2000, entre el 1% y el 4%, e

inferior al calculado en el acuífero de Cabezón de Oro que se ha estimado, para el período 1963-1994, en 17% (Murillo y De la Orden, 1996). No obstante, en el acuífero de Solana se obtienen porcentajes que son sólo ligeramente inferiores a los calculados en el acuífero de Peñarrubia. Así para la

Año hidrológico	% de lluvia útil sobre la precipitación acaecida	% de recarga al acuífero sobre la precipitación acaecida	% de recarga al acuífero sobre la lluvia útil acaecida	Tipo de año
1960-61	41,20	30,22	73,36	Medio
1961-62	50,33	34,57	68,70	Húmedo
1962-63	44,89	33,12	73,78	Húmedo
1963-64	50,85	35,24	69,30	Húmedo
1964-65	43,76	29,38	67,15	Medio
1965-66	35,24	25,85	73,36	Húmedo
1966-67	49,63	34,13	68,78	Medio
1967-68	49,02	36,27	73,99	Medio
1968-69	32,68	26,28	80,39	Medio
1969-70	44,13	33,14	75,10	Seco
1970-71	60,68	43,15	71,11	Húmedo
1971-72	57,04	40,02	70,16	Húmedo
1972-73	57,61	38,93	67,56	Húmedo
1973-74	52,36	36,29	69,30	Húmedo
1974-75	50,30	34,65	68,89	Húmedo
1975-76	39,36	29,14	74,03	Medio
1976-77	38,90	27,78	71,43	Húmedo
1977-78	15,06	12,35	82,01	Seco
1978-79	14,24	12,02	84,45	Seco
1979-80	54,22	38,90	71,74	Medio
1980-81	29,99	22,21	74,05	Seco
1981-82	32,32	25,28	78,21	Seco
1982-83	45,69	29,56	64,70	Medio
1983-84	34,16	26,37	77,20	Medio
1984-85	44,98	31,21	69,40	Seco
1985-86	28,44	20,99	73,78	Medio
1986-87	19,71	16,19	82,16	Seco
1987-88	51,75	35,71	69,01	Húmedo
1988-89	45,79	30,99	67,68	Húmedo
1989-90	51,46	36,51	70,94	Medio
1990-91	34,91	26,90	77,06	Seco
1991-92	38,59	29,17	75,59	Seco
1992-93	32,97	24,38	73,95	Medio
1993-94	23,60	18,36	77,82	Seco
1994-95	24,83	18,70	75,29	Seco
1995-96	32,50	25,71	79,11	Medio
1996-97	51,41	35,99	70,00	Húmedo
1997-98	26,64	19,52	73,28	Seco
1998-99	36,88	25,88	70,16	Seco
Promedio	40,21	29,00	73,18	

Tabla 5. Porcentajes de lluvia útil y recarga al acuífero sobre la precipitación acaecida y porcentaje de recarga al acuífero sobre la lluvia útil acaecida

Table 5. Useful rainfall and aquifer recharge as percentage of total precipitation, and aquifer recharge as percentage of useful rainfall

recarga al acuífero sobre la precipitación acaecida se obtiene un porcentaje de 25,44% y para la recarga al acuífero sobre la lluvia útil de 60,24% (DPA-IGME, 2003-b y Murillo *et al.*, 2004). Este último porcentaje es para la cuenca del río Júcar, cuenca a la que pertenecen administrativamente los acuíferos mencionados en el presente artículo, del 63% (Navarro *et al.*, 1993).

- Las cifras anteriormente expuestas parecen indicar, para el acuífero de Peñarrubia, un valor excesivamente elevado del porcentaje promedio de recarga al acuífero sobre la precipitación total acaecida. Este resultado se debe a que en la expresión (7) no son nulos los términos ( $R_r$ ) y ( $R_a$ ), que representan la recarga al acuífero que tiene lugar a través del lecho de ríos permanentes, estacionales o efímeros y la recarga acuífero que tiene lugar por aportación lateral de otros acuíferos o por goteo desde los acuitardos. Esta consideración implica que la expresión (5) no represente la recarga natural que tiene lugar al acuífero por infiltración directa del agua de lluvia, sino la recarga natural que tiene lugar en el acuífero por todos aquellos fenómenos directamente relacionados con la precipitación. En el caso concreto del acuífero de Peñarrubia las cifras y porcentajes de recarga contenidos en las tablas 4 y 5 incluyen, por un lado, la recarga lateral procedente del acuífero de Sierra Mariola y, por otro, la recarga debida a una parte de la escorrentía superficial que se infiltra en el acuífero, dado el carácter altamente permeable por fisuración y karsificación que tiene este, a través de cursos superficiales efímeros (no existen cursos superficiales permanentes) como son las ramblas, barranqueras y regueros que atraviesan dicho acuífero.
- Desglosando las cifras que figuran en las tablas 4 y 5, según la tipología climática del año hidrológico, se pueden extraer los siguientes datos:
  - Años Secos. La recarga media para este tipo de años ha sido de 2.375.910 m<sup>3</sup>/a. Esta cifra supone un tanto por ciento medio de recarga, sobre el total de lluvia caída en el acuífero, del 22,38%. Los valores máximo y mínimo de la recarga fueron de 3.906.421 m<sup>3</sup> en el año

1984-85, y 1.139.099 m<sup>3</sup> en el año 1977-78 respectivamente.

- Años de tipo Medio. Para este tipo de años se ha cifrado una recarga media de 4.512.557 m<sup>3</sup>/a aunque la misma oscila entre un valor máximo de 6.369.853 m<sup>3</sup> en el año 1979-80 y otro mínimo de 3.220.467 m<sup>3</sup> en el año 1985-86. El porcentaje de recarga, para los años de tipo medio, ha sido del 29,83% sobre el total de la precipitación.
- Años Húmedos. Los años asignados a esta tipología climática son los que presentan un mayor valor medio de la recarga natural al sistema que se cifra en 7.246.624 m<sup>3</sup>/a. Los valores límite fueron de 9.105.829 m<sup>3</sup> en el año 1996-97 y de 4.714.651 m<sup>3</sup> en 1965-66. El valor medio de la recarga natural para los años muy húmedos ha supuesto un 34,79% sobre el total de la precipitación.

Por último, con objeto de tener una visión más amplia de la forma en que se distribuye la recarga a lo largo de períodos de tiempo mayores al año natural, se ha analizado el comportamiento de esta por décadas.

En la tabla 6 se presentan los datos de climatología y recarga natural para las décadas de 1960/70, 1970/80, 1980/90 y 1990/99. Hay que hacer constar que a la década de los años 90 le falta el último año hidrológico (1999-2000).

Como se observa a la vista de los datos de la tabla 6 se aprecia cierta variabilidad de la pluviometría. Así la década de los 80 es más seca que las décadas de los 70 y los 60, mientras que la década de los 90 es la más seca de las cuatro. En cuanto a la temperatura media cabe indicar que la variabilidad existente es menos significativa que la que presenta la pluviometría. Sin embargo, parece que la década de los 70, como media, es algo más fría que el resto. A esta década se le asocia la mayor pluviometría. En la década de los 60 también se presenta la interrelación baja temperatura y alta pluviometría, aunque en esta década la temperatura es algo más alta que en la década de los 70 y la pluviometría también algo más baja. En la década de los 90 se tiene una alta tempe-

Década	Lluvia total (mm)	Precipitación media anual (mm/a)	Temperatura media (C)	Recarga total (m <sup>3</sup> )	Recarga media anual (m <sup>3</sup> /a)
1960-70	3.816,3	381,6	14,20	50.526.954	5.052.695
1970-80	4.212,8	421,3	13,97	59.015.359	5.901.536
1980-90	3.542,6	354,3	15,46	42.189.328	4.218.933
1990-99	2.941,4	326,8	15,23	32.024.543	3.558.283

Tabla 6. Análisis de la recarga al acuífero de Peñarrubia por décadas  
 Table 6. Recharge of the Peñarrubia aquifer by decades

ratura con una baja pluviometría y en la década de los 80 una temperatura media alta asociada a lluvias bajas.

En cuanto a los valores que toma la recarga natural se observa que están estrechamente asociados con los valores de pluviometría. Así se observa que durante la década de los 70 (la más fría y lluviosa de las cuatro) la recarga media fue de 5,90 hm<sup>3</sup>/a. Por el contrario, la década de los 90 fue la más negativa para la recarga del acuífero, puesto que sólo se produjo una recarga media de 3,56 hm<sup>3</sup>/a.

### Simulación de alternativas al objeto de estimar el tiempo de recuperación del acuífero ante una disminución de las explotaciones

En este apartado se exponen las diferentes simulaciones que se han realizado bajo distintas condiciones de extracción y régimen de lluvias en el acuífero. Las hipótesis que se han formulado responden a las directrices que se han venido barajando en los distintos borradores del Plan Hidrológico y señalan la necesidad de recuperar el estado de equilibrio que tenía el acuífero antes de que tuviera lugar en el mismo una explotación descontrolada.

Las alternativas que se han simulado se han elaborado teniendo presente la próxima realidad que puede representar el trasvase de aguas procedentes del río Júcar hasta la cuenca del río Vinalopó. Esta infraestructura hidráulica pretende subsanar el déficit hídrico que ha sufrido la comarca del Vinalopó, especialmente a partir del desarrollo de nuevos regadíos, en la segunda mitad del siglo XX. El volumen anual que se prevé trasvasar es de 80 hm<sup>3</sup>. De este volumen un total de 17,5 hm<sup>3</sup> será gestionado por la Comunidad General de Usuarios del Alto Vinalopó (Selva, 1999). En el acuífero de Peñarrubia se ha calculado (IGME-DPA, 2002) que el volumen mínimo de agua subterránea a extraer, después de la realización del citado trasvase, será de 0,2 hm<sup>3</sup>/a y el máximo de 4,5 hm<sup>3</sup>/a. Este intervalo de variación dependerá de que se bombee más o menos cantidad de agua en otras unidades acuíferas del Alto Vinalopó (fundamentalmente del acuífero de Solana).

Las hipótesis de explotación que se han ensayado han sido las siguientes:

- Tendencia climática seca (ciclo idéntico al acaecido entre los años 1980-1990): 0,2 hm<sup>3</sup>/a, 0,5 hm<sup>3</sup>/a, 1 hm<sup>3</sup>/a, 1,5 hm<sup>3</sup>/a, 2 hm<sup>3</sup>/a, 2,5 hm<sup>3</sup>/a, 3 hm<sup>3</sup>/a, 3,65 hm<sup>3</sup>/a y 4,02 hm<sup>3</sup>/a.
- Tendencia climática húmeda (ciclo idéntico al acaecido entre los años 1960-1979): 0,2 hm<sup>3</sup>/a, 0,5 hm<sup>3</sup>/a, 1 hm<sup>3</sup>/a, 1,5 hm<sup>3</sup>/a, 2 hm<sup>3</sup>/a, 2,5 hm<sup>3</sup>/a, 3 hm<sup>3</sup>/a, 3,5 hm<sup>3</sup>/a y 4,2 hm<sup>3</sup>/a.

- Ciclo termopluviométrico que alterna décadas húmedas con décadas secas: 0,2 hm<sup>3</sup>/a, 0,6 hm<sup>3</sup>/a, 1 hm<sup>3</sup>/a, 1,5 hm<sup>3</sup>/a, 2 hm<sup>3</sup>/a, 2,5 hm<sup>3</sup>/a, 3 hm<sup>3</sup>/a, 3,5 hm<sup>3</sup>/a, 4 hm<sup>3</sup>/a, 4,25 hm<sup>3</sup>/a, 4,5 hm<sup>3</sup>/a y 4,7 hm<sup>3</sup>/a. El período termopluviométrico que se ha contemplado en esta simulación se ha diseñado teniendo en cuenta las condiciones termopluviométricas que han ocurrido desde 1960 hasta 1999, en el siguiente orden: en primer lugar la década de 1980, en segundo la década de 1970, en tercero la década de 1990 y por último la década de 1960.

El reparto mensual de estos bombeos se ha realizado de acuerdo a la distribución porcentual que figura en la tabla 3. En todas las simulaciones se ha partido de la cota 370,59 m s.n.m. que corresponde al último valor que se ha obtenido durante la etapa de calibración del modelo (mes de septiembre de 2002).

La forma en que se han operado los datos de precipitación y temperatura en las simulaciones realizadas, dado que sólo se ha tenido acceso a cuatro décadas de valores de estas variables, ha consistido en repetirlos tantos ciclos como ha sido necesario hasta que el acuífero ha recuperado el nivel por el cual drenaba de forma natural. Este se encontraba a la cota de 500 m s.n.m. y se localizaba en la zona SO del acuífero próximo al cauce del río Vinalopó en el contacto con los afloramientos triásicos impermeables del Keuper.

El resultado gráfico de algunas de las simulaciones realizadas se observan en las figuras 7, 8 y 9. En las mismas se puede ver, para las diferentes explo-

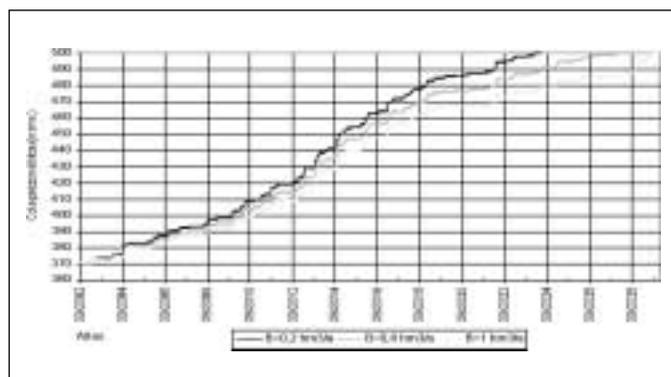


Fig. 7. Evolución de los niveles piezométricos en el acuífero de Peñarrubia ante diferentes alternativas de explotación del acuífero (0,2 hm<sup>3</sup>/a, 0,6 hm<sup>3</sup>/a y 1 hm<sup>3</sup>/a). Secuencia climática definida según la climatología acaecida en las siguientes décadas: 1980, 1970, 1990 y 1960

Fig. 7. Evolution of piezometric levels in the Peñarrubia aquifer for different patterns of exploitation of the aquifer (0,2 hm<sup>3</sup>/y, 0,6 hm<sup>3</sup>/y and 1 hm<sup>3</sup>/y). Climate sequence defined by the actual climate recorded for the following decades: 1960s, 1970s, 1980s and 1990s

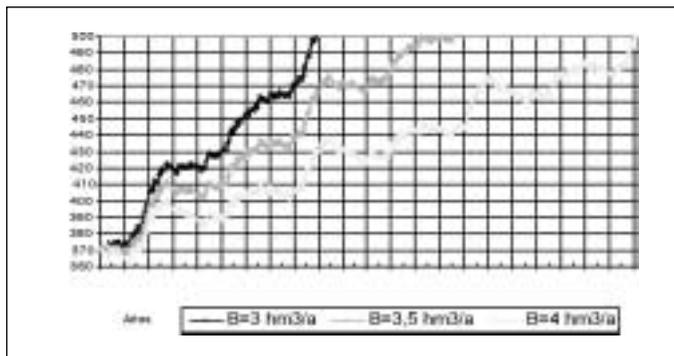


Fig. 8. Evolución de los niveles piezométricos en el acuífero de Peñarrubia ante diferentes alternativas de explotación del acuífero (3 hm³/a, 3,5 hm³/a y 4 hm³/a). Secuencia climática definida según la climatología acaecida en las siguientes décadas: 1980, 1970, 1990 y 1960

Fig. 8. Evolution of piezometric levels in the Peñarrubia aquifer for different patterns of exploitation of the aquifer (3 hm³/y, 3,5 hm³/y and 4 hm³/y). Climate sequence defined by the actual climate recorded for the following decades: 1960s, 1970s, 1980s and 1990s

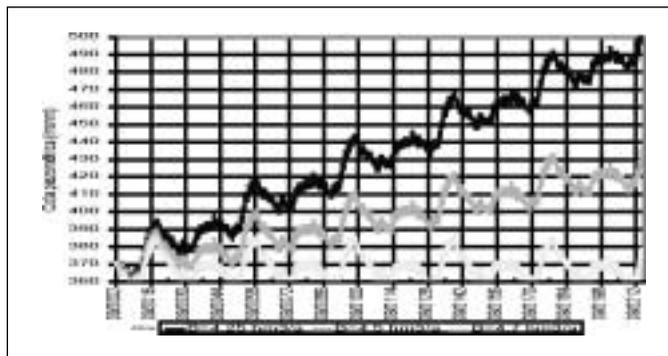


Fig. 9. Evolución de los niveles piezométricos en el acuífero de Peñarrubia ante diferentes alternativas de explotación del acuífero (4,25 hm³/a, 4,5 hm³/a y 4,7 hm³/a). Secuencia climática definida según la climatología acaecida en las siguientes décadas: 1980, 1970, 1990 y 1960

Fig. 9. Evolution of piezometric levels in the Peñarrubia aquifer for different patterns of exploitation of the aquifer (4,25 hm³/y, 4,5 hm³/y and 4,7 hm³/y). Climate sequence defined by the actual climate recorded for the following decades: 1960s, 1970s, 1980s and 1990s

Bombeo simulado (hm³/a)	Período termopluviométrico idéntico al ocurrido entre los años 1980 y 1999 (representa una situación con una tendencia climática seca)	Período termopluviométrico idéntico al ocurrido entre los años 1960 y 1979 (representa una situación con una tendencia climática húmeda)	Período termopluviométrico caracterizado por la secuencia climática referida a las siguientes décadas: 1º década de 1980, 2º década de 1970, 3º década de 1990 y 4º década de 1960 (representa una situación con una tendencia climática que alterna periodos secos y húmedos)
0,2	Febrero de 2029	Mayo de 2019	Mayo de 2024
0,5	Noviembre de 2030	Mayo de 2022	No se ha simulado
0,6	No se ha simulado	No se ha simulado	Febrero de 2028
1	Junio de 2034	Septiembre de 2024	Diciembre de 2029
1,5	Marzo de 2041	Junio de 2026	Septiembre de 2034
2	Marzo de 2051	Febrero de 2031	Octubre de 2038
2,5	Mayo de 2067	Octubre de 2034	Junio de 2050
3	Enero de 2099	Enero de 2039	Marzo de 2056
3,5	No se ha simulado	Octubre de 2053	Abril de 2090
3,65	Junio de 2259	No se ha simulado	No se ha simulado
4	No se ha simulado	No se ha simulado	Noviembre de 2134
4,02	Nunca se recupera	No se ha simulado	No se ha simulado
4,2		Abril de 2076	No se ha simulado
4,25			Octubre de 2214
4,5			Más de 300 años
4,7			Nunca se recupera

Tabla 7. Bombeos simulados y fecha aproximada en la que se alcanza la cota de 500 m s.n.m. en el acuífero de Peñarrubia para los distintos periodos climáticos que se han considerado en el presente artículo

Table 7. Simulated pumping and the approximate date at which the level of 500 m a.s.l. was attained in the Peñarrubia aquifer, for the different climatic periods considered in the present paper

taciones ensayadas, la fecha aproximada en que recuperaría el acuífero el nivel piezométrico de

500 m s.n.m. En la tabla 6 se muestra la fecha exacta en que esto ocurre.

## Conclusiones

En el presente artículo se han expuesto los fundamentos matemáticos y conceptuales de un modelo matemático unicelular que se ha denominado ERAS. Este se ha aplicado a la estimación de la recarga natural del acuífero de Peñarrubia (Alicante) y a la simulación de la evolución de sus niveles piezométricos ante distintas cuantías de explotaciones del acuífero y diferentes tipos de series climáticas. Los resultados que se han obtenido permiten formular las siguientes conclusiones:

1. El proceso de la recarga natural del acuífero se puede expresar mediante la ecuación:

$$R_i = 4,35 \cdot (P_i - T_i^{1,3})^{0,875}$$

que relaciona la recarga (R) con la precipitación (P) y la temperatura (T).

2. La recarga media anual del acuífero de Peñarrubia, para el período estudiado (1960-1999) se puede establecer en 4,7 hm<sup>3</sup>/año. El valor máximo de la recarga anual, para dicho período, fue de 9,1 hm<sup>3</sup> en el año hidrológico 1996-97 (año húmedo), mientras que el mínimo fue de 1,13 hm<sup>3</sup> en el año hidrológico 1977-78 (año seco).
3. Según la tipología climática del año hidrológico que tenga lugar se puede establecer el siguiente orden en la cuantía media de la recarga natural del acuífero de Peñarrubia:
  - Años secos: 2,4 hm<sup>3</sup>/a
  - Años medios: 4,5 hm<sup>3</sup>/a
  - Años húmedos: 7,2 hm<sup>3</sup>/a
4. Al análisis climático realizado por décadas, para establecer la cuantía de la recarga media al acuífero, pone de manifiesto la existencia de dos décadas donde la recarga media anual del acuífero fue menor que la recarga media anual de la serie histórica analizada en el presente estudio, así, para la década de 1980 se obtiene un valor de la recarga media anual de 4,2 hm<sup>3</sup>/a; es decir un valor ligeramente inferior al de la recarga media anual para el período completo estudiado. Igual pasa con la década de 1990 donde se obtiene una recarga media anual de 3,6 hm<sup>3</sup>/a que representa una cuantía bastante inferior al valor medio anual obtenido al analizar la serie completa. Por el contrario, las décadas de 1960 y 1970 presentan una recarga media superior a la determinada para todo el período analizado en el presente estudio.
5. Ante las directrices del Plan Hidrológico, que señalan la necesidad de recuperar los acuíferos que presenten sobreexplotación dentro de los dos horizontes definidos en el mismo, se han simulado

diferentes hipótesis de extracciones en el acuífero de cara a plantear su futura gestión. Estas hipótesis se han contemplado bajo tres ciclos termopluriométricos distintos, que representan una tendencia climática seca, una húmeda y una que alterna décadas húmedas con décadas secas. Los resultados que se obtienen muestran que cualquier alternativa de explotación que contemple un bombeo en el acuífero superior a 1 hm<sup>3</sup>/a dilataría muchísimo el tiempo que se precisa para recuperar el mismo. A este respecto cabe indicar que hipótesis de explotación superiores a 4,5 hm<sup>3</sup>/a supondrían que el acuífero no se recuperaría nunca. La recuperación del acuífero en un tiempo prudencial (20-25 años) implica probablemente la realización de una acción combinada que contemple bombeo en el acuífero, recarga artificial del mismo y sustitución de parte de los caudales bombeados en el acuífero por recursos provenientes del trasvase Júcar-Vinalopó, o bien el planteamiento de una alternativa que contemple una reducción drástica del aprovechamiento del acuífero, que lo mismo no puede ser asumida por los caudales de sustitución que contempla el trasvase Júcar-Vinalopó. A este respecto se señala que para los bombeos que se realizan en el Alto Vinalopó se contempla la sustitución de 30 hm<sup>3</sup>/a sobre un total bombeado de 100 hm<sup>3</sup>/a (IGME-DPA, 2002). En concreto para el acuífero de Peñarrubia dicho estudio prevé que es factible sustituir 3,2 hm<sup>3</sup>/a sobre un total bombeado en el acuífero de 4,5 hm<sup>3</sup>/a.

6. Se constata la utilidad del modelo para aumentar el conocimiento de ciertos acuíferos de los que se saben sus aspectos generales de funcionamiento, pero apenas se dispone de datos de seguimiento.

## Agradecimientos

Este artículo se ha efectuado dentro del marco del Convenio de Asistencia Técnica suscrito entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Excma. Diputación Provincial de Alicante (DPA) para el año 2002. Durante la ejecución de los trabajos ha tenido una especial participación D. Luis Rodríguez Hernández (DPA) que ha realizado numerosas sugerencias y recomendaciones. Los autores del presente artículo también quieren expresar un especial agradecimiento a la Comunidad General de Usuarios del Alto Vinalopó por la ayuda y facilidades prestadas para la obtención de los datos de explotación del acuífero.

## Referencias

- Andreu, J.M., Delgado, J., García-Sánchez, A., Pulido-Boch, A., Bellot, J., Chirino, E. y Ortiz de Urbina, J.M. 2001. Caracterización del funcionamiento y la recarga del acuífero del Ventós-Castellar (Alicante). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 14 (3-4). 247-254.
- Armador Cachero, J.L., de la Orden Gómez, J.A. y Murillo Díaz, J.M. 2001. Artificial recharge as a technique to alleviate the overexploitation of small aquifers located on the Spanish mediterranean coast. En: *3<sup>rd</sup> International Conference on Future Groundwater. Resources at Risk*. Lisboa-Portugal; Theme 8 Saltwater Intrusion, 8 pp.
- Corral Lledó, M.M., Murillo Díaz, J.M. y Rodríguez Hernández, L. 2004. Caracterización del funcionamiento de la unidad hidrogeológica de Serral-Salinas (Alicante) En: *VIII Simposio de Hidrogeología*. Zaragoza. (27). 53-63.
- Custodio Gimena, E. 1997-a. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. En: Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. (ed). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Grupo Español. Las Palmas de Gran Canaria. 19-39.
- Custodio Gimena, E. 1997-b. Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos. En: Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. (ed). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Grupo Español. Las Palmas de Gran Canaria. 83-109.
- Custodio Gimena, E. 1998. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. *Boletín Geológico y Minero*. 109 (4), 13-29.
- DGOHCA-ITGE. 1998. *Programa de ordenación de acuíferos sobreexplotados / salinizados. Formulación de estudios y actuaciones*. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas-Instituto Tecnológico Geominero de España. 66 pp.
- DPA. 1992. *Mapa del agua de la provincia de Alicante*. Diputación Provincial de Alicante. 42 pp y 1 mapa.
- DPA-IGME. 1982. Las aguas subterráneas de la provincia de Alicante. Diputación Provincial de Alicante e Instituto Geológico y Minero de España. Informe no publicado. 754 pp.
- DPA-IGME. 2003-a. Aplicación de un modelo matemático para simular la evolución de los recursos hídricos en el acuífero de Peñarrubia (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión. Diputación Provincial de Alicante e Instituto Geológico y Minero de España. Informe no publicado. 75 pp.
- DPA-IGME. 2003-b. Aplicación de un modelo matemático para simular la evolución de los recursos hídricos en el acuífero de Solana (Alicante) ante diferentes alternativas de gestión. Diputación Provincial de Alicante e Instituto Geológico y Minero de España. Informe no publicado. 74 pp.
- Elías Castillo, F. y Giménez, R. 1965. *Evapotranspiraciones potenciales y balances de agua en España*. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Agricultura. Madrid. 293 pp.
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall Ins. Englewood Cliffs. New Jersey. USA. 604 pp.
- Iglesias López, A. 1984. Diseño de un modelo para el estudio de descargas de acuíferos. Modelo Meda. *Boletín Geológico y Minero*. 95 (1). 52-57.
- IGME-DPA. 2002. Posibilidades de almacenamiento de las aguas del trasvase Júcar-Vinalopó en los embalses subterráneos provinciales mediante recarga artificial. Simulación de la Gestión de los recursos hídricos en el Alto Vinalopó. Instituto Geológico y Minero de España y Excma. Diputación Provincial de Alicante. Informe no publicado. 88 pp.
- ITGE-DPA. 2000. Posibilidades de almacenamiento de las aguas del trasvase Júcar-Vinalopó en los embalses subterráneos provinciales mediante recarga artificial. Estimación de los consumos de agua para usos agrícola y urbano en el Alto Vinalopó. Instituto Tecnológico Geominero de España y Excma. Diputación Provincial de Alicante. Informe no publicado. 150 pp.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. y Simmers, I. 1990. *Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge*. International Contributions to Hydrogeology. I.A.H. Verlag Heinz Heise. Hannover. (8) 345 pp.
- Llamas, R. y Custodio, E. 2002. *Intensively exploited aquifers. Main concepts, relevant facts and some suggestions*. UNESCO. IHP, Series on Groundwater (4). 16 pp.
- Martin Roldan, A., Arjona García-Borreguero, J., Hervás Maldonado, M., Mera Merino, A. e Iglesias López, A. 1992. Aplicaciones informáticas para estudios de descarga de acuíferos. Modelo Meda. *V Simposio de Hidrogeología*. Alicante. (17). 37-48.
- Murillo, J.M. y de la Orden, J.A. 1996. Sobreexplotación, alternativas de gestión y evaluación del efecto del cambio climático en la recarga natural del acuífero kimberidgiense de Cabezón de Oro (Alicante). En: *Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*. Vitoria. 73-88.
- Murillo, J.M., De la Orden, J.A y Roncero Pinar, F.J. 2004. El modelo ERAS. Una herramienta sencilla para estimar la recarga a los acuíferos que tienen una respuesta rápida. En: *XXXIII Congreso AIH y 7º Congreso ALHSUD*. Zacatecas. Mexico. Edición en CD-ROM.
- Navarro Alvargonzález, A., Fernández Uría, A. y Doblas Domínguez, J.A. 1993. *Las Aguas Subterráneas en España. Estudio de Síntesis*. Instituto Tecnológico Geominero de España. 591 pp.
- Rico Amorós, A.M. 1994. *Sobreexplotación de aguas subterráneas y cambios agrarios en el Alto y Medio Vinalopó (Alicante)*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. 276 pp.
- Selva, G. 1999. El papel de los usuarios en la administración del agua. *II Jornadas mediterráneas sobre el agua subterránea: El Valle del Vinalopó*. Villena. 23 pp.

Recibido: julio 2004

Aceptado: febrero 2005