

Clasificación de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética según la tasa de recarga

J.J. Durán⁽¹⁾, B. Andreo⁽²⁾, J. Vías⁽²⁾, J.A. López-Geta⁽¹⁾, F. Carrasco⁽²⁾ y P. Jiménez⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

E-mail: jj.duran@igme.es

(2) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA).

Facultad de Ciencias. Departamento de Geología. Universidad de Málaga. 29071 Málaga.

E-mail: andreo@uma.es

RESUMEN

Se ha llevado a cabo un análisis de ocho acuíferos carbonáticos representativos de la diversidad climática y geológica de la Cordillera Bética con el objetivo de realizar una clasificación para estimar la recarga media anual. En cada acuífero se ha calculado la tasa media de recarga anual utilizando métodos convencionales (Turc, Coutagne, Thornthwaite, Kessler y balance de cloruros). Los valores obtenidos indican que la tasa media de recarga anual en los acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética está comprendida entre un tercio de la precipitación y el 55% de la misma. A partir de una búsqueda bibliográfica se ha llevado a cabo una selección de variables que intervienen en la recarga, entre las cuales cabe citar: precipitación, evapotranspiración, altitud, pendiente, litología, formas de absorción preferencial y suelo. Un tratamiento mediante análisis multivariante ha permitido constatar (1) que las variables más influyentes en la recarga son la precipitación, la litología y las formas de absorción o infiltración preferencial y (2) que se pueden distinguir tres tipos de acuíferos según la tasa de recarga: acuíferos de recarga alta, moderada y baja. Así, conocidas las variables principales de un acuífero carbonático de la Cordillera Bética es posible hacer una estimación de la tasa media de recarga anual.

Palabras clave: acuíferos carbonáticos, análisis multivariante, Cordillera Bética, recarga

Classification of carbonate aquifers from the Betic Cordillera according to the recharge rate

ABSTRACT

An analysis of eight Andalusian carbonate aquifers has been done with the objective to realize a classification of the carbonate aquifers in order to know its average rate of annual recharge. The recharge of each aquifer has been estimated using conventional methods (Turc, Coutagne, Thornthwaite, Kessler and chloride balance). The average rates of recharge in the pilot aquifers vary between 33% and 55% of the rainfall. A bibliographical search permits choose the variables more important in the recharge: rainfall, evapotranspiration, altitude, slope, lithology, preferential infiltration areas and soil. A treatment using multivariate analysis demonstrated that (1) the variables with more influence in the rates of recharge are the rainfall, lithology and the preferential infiltration areas and (2) according to the rate of recharge three types of carbonate aquifer can be distinguished: aquifers with high, low and moderate rate of recharge. Therefore, with the prior knowledge of the main variables in a carbonate aquifer of the Betic Cordillera it is possible to estimate the rate of annual recharge.

Key words: Betic Cordillera, carbonate aquifers, multivariate analysis, recharge

Introducción

La recarga de un acuífero es la cantidad de agua de lluvia que entra en el mismo durante un determinado período de tiempo, aunque también se puede producir recarga a partir de aguas superficiales (ríos, lagos) o por transferencia de agua subterránea procedente de otro acuífero (Custodio, 1998). Dicha cantidad de agua se suele expresar en millones de m³/año o en

hm³/año, lo que generalmente se ha denominado entradas o recursos medios anuales, o bien en forma de porcentaje respecto a la precipitación, también llamada tasa de recarga o infiltración eficaz. Para un período suficientemente largo y en acuíferos en los que no hay explotación mediante bombeos, el valor medio anual de las entradas de agua suele ser equivalente al de las salidas. Conocer la recarga de un acuífero es importante porque permite cuantificar las

entradas o recursos de agua que alimentan a dicho acuífero, es decir, la cantidad de agua potencialmente aprovechable por el hombre, aspecto éste que es fundamental para una adecuada planificación hidrológica.

La recarga de los acuíferos es un tema que se trata en casi todos los manuales de Hidrogeología (Custodio y Llamas, 1976; Freeze y Cherry, 1979), aunque en unos se aborda con más detalle que en otros. Entre los antecedentes relativos a la recarga de acuíferos cabe señalar las recopilaciones de artículos realizadas por Lerner *et al.* (1990) y Sharma (1990) que incluyen información detallada sobre la estimación de la recarga en distintas circunstancias climáticas e hidrológicas. Otra referencia importante es el volumen 10(1) de la revista *Hydrogeology Journal*, un volumen especial titulado *Groundwater Recharge* en el que se abordan aspectos fundamentales de la recarga, cuestiones de recarga artificial, aplicación de técnicas para cuantificar la recarga, uso de la modelización e incluso aborda la temática de la recarga urbana. En la literatura hidrogeológica escrita en español, el antecedente más importante en materia de recarga a los acuíferos es la monografía publicada por Custodio *et al.* (1997) en el cual se incluyen varios trabajos sobre los procesos y los métodos de evaluación de la recarga de acuíferos. Algunos de esos artículos han sido publicados más tarde en el *Boletín Geológico y Minero* (Custodio, 1998; Samper, 1998).

De acuerdo con Samper (1998) la medida de la recarga puede abordarse aplicando diferentes métodos: determinación directa mediante lisímetros y medidores de filtración (*seepage meters*), métodos hidrodinámicos basados en la utilización de la ecuación de flujo, trazadores naturales químicos (balance de cloruros) o isotópicos (^{18}O , ^2H , ^3H y ^{14}C) y artificiales (colorantes orgánicos e inorgánicos), métodos de balance (entradas = salidas \pm Δ almacenamiento) y métodos basados en programas informáticos (como el denominado BALAN de Samper y García Vera, 1992) que permiten la simulación del flujo subterráneo en el acuífero.

La estimación de la recarga en gran parte de los acuíferos carbonáticos del Sur de España fue realizada por el IGME, durante la década de los 80, en el marco del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) y posteriormente ha sido publicada en los atlas hidrogeológicos de algunas de las provincias andaluzas y en el de la propia comunidad autónoma (ITGE, 1998). En algunos acuíferos, los cálculos originales han sido precisados en posteriores informes técnicos del IGME y en los trabajos de diferentes investigadores dentro del ámbito universitario, (IGME-Universidad de Granada, 1990; López Chicano,

1992; Cardenal, 1993; Pulido-Bosch, 1993; Andreo, 1997; Liñán, 2003, entre otros). En la mayoría de los casos, las estimaciones de recarga hechas en el PIAS, generalmente expresadas en forma de porcentaje respecto a la precipitación, se han aplicado de una manera indiscriminada cuando no existían otros argumentos, aunque no siempre con resultados satisfactorios. Y es que son numerosas las ocasiones en que no se dispone de estudios detallados pero es preciso realizar estimaciones de la recarga natural a los acuíferos carbonáticos con una herramienta sencilla.

En los acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética, las diferencias en la recarga responden, en primer lugar, a las notables variaciones que existen en los valores de precipitación sobre sus afloramientos. Además, intervienen factores topográficos (altitud y pendiente de las laderas), litológicos, desarrollo de la karstificación (formas exokársticas de absorción) y edafológicos (desarrollo del suelo).

En este trabajo se presentan resultados de un estudio (IGME-GHUMA, 2003) sobre la recarga en acuíferos carbonáticos representativos de la diversidad climática y geológica de la Cordillera Bética (Fig. 1). El objetivo fundamental es realizar una clasificación de acuíferos carbonáticos orientada a la estimación de la recarga.

Metodología

Para alcanzar el objetivo propuesto se han llevado a cabo cuatro tareas fundamentales: caracterización de los acuíferos seleccionados, evaluación de la tasa media de recarga anual e introducción en un Sistema de Información Geográfica (SIG) de las capas de información correspondientes a las variables que influyen en la recarga y, por último, un tratamiento de estas variables mediante Análisis de Componentes Principales.

De cada acuífero se ha efectuado una revisión actualizada de las características generales, especialmente de las variables que influyen en la recarga (climatología, topografía, litología, geomorfología y suelos), teniendo en cuenta los trabajos recientes que se han llevado a cabo en cada caso.

Una vez caracterizados los acuíferos, se ha evaluado la tasa media de recarga anual en los mismos mediante técnicas convencionales, como el método de balance (entradas = salidas \pm Δ almacenamiento). Para calcular las entradas en este método sólo la precipitación puede ser medida directamente, mientras que la evapotranspiración (ETP y ETR) debe ser estimada de forma indirecta a partir de fórmulas semiempíricas, como las de Thornthwaite (1948),

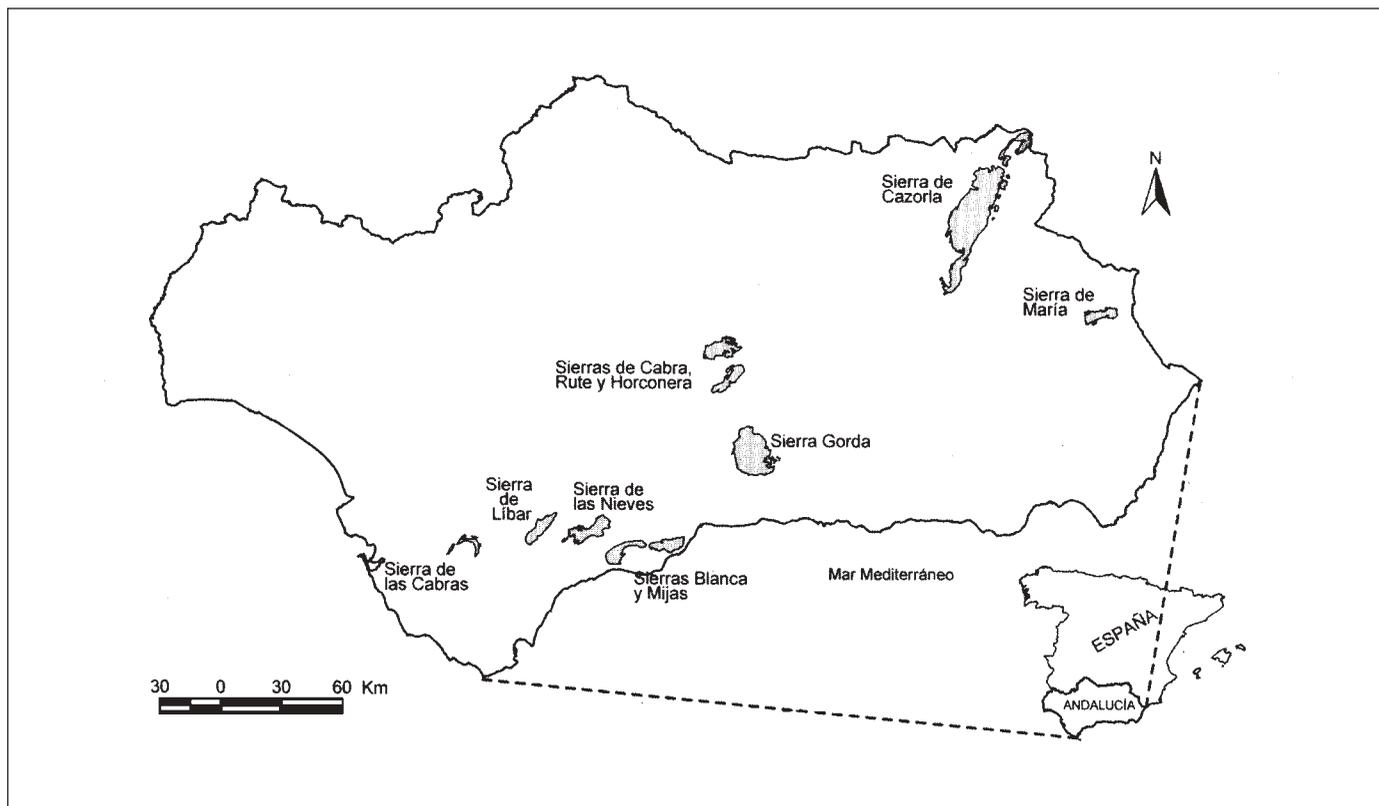


Fig. 1. Situación geográfica de los ocho acuíferos estudiados en este trabajo
Fig. 1. Geographical location of the eight aquifers studied in this work

Coutagne (1954) y Turc (1954). Así, en todos los acuíferos se ha aplicado el método de Thornthwaite, con capacidades de campo de 25 y 50 mm. En varios acuíferos se han obtenido valores de recarga a partir del balance de cloruros (Schoeller, 1962) y del método de Kessler (1967), cuya aplicabilidad ha sido contrastada en ciertos acuíferos del Sur de España (López-Vera y Sáiz, 1975; Andreo, 1997). Conviene destacar que en un mismo acuífero se han obtenido diferentes resultados en función del método utilizado y del autor consultado y que son distintos los porcentajes de infiltración del agua de lluvia obtenidos para los acuíferos carbonáticos de la región (Cardenal, 1993; Andreo, 1997; Liñán, 2003; entre otros). Siempre que ha sido posible se han comparado los datos obtenidos aplicando diferentes métodos y se han contrastado los valores de la recarga con series históricas de descargas, allí donde éstas existían.

Después de caracterizar los acuíferos y de estimar la recarga que en ellos se produce, se han introducido en un SIG las capas de información correspondientes a las variables que influyen en la recarga y que suelen estar disponibles en las bases de datos de los Organismos Públicos: precipitación, altitud, pen-

diente, litología, áreas de infiltración preferencial y suelos. La precipitación se ha estimado a partir de la planimetría de isoyetas trazadas cada 100 mm. El mapa de altitud se ha obtenido a partir del modelo digital de elevaciones (MDE) del Instituto de Cartografía de Andalucía, considerando un tamaño de celda de 100 m. El mapa de pendientes se ha establecido a partir del MDE, en Arcgis 8.2, trazando una red irregular de triángulos correspondientes a unidades homogéneas de los diferentes intervalos de pendiente. La cartografía litológica se ha digitalizado en Autocad 14, a partir del mapa geológico nacional, a escala 1:50.000, elaborado por el IGME; posteriormente se han utilizado Arcgis 8.2 y Arcview 3.2 para elaborar la capa de información. Por su parte, las áreas preferenciales de infiltración se han deducido de la cartografía geomorfológica, cuando ésta existía; en caso contrario, se han delimitado las zonas donde predominan las formas exocársticas de absorción mediante la superposición en Arcview 3.2 de los mapas de las dos variables anteriores y reconocimientos sobre fotos aéreas y/o de campo. Finalmente, el mapa de suelos se ha obtenido del Sistema de Información Ambiental de Andalucía

(Sinamb-A), se ha georreferenciado en Autocad 14 y, posteriormente, se han utilizado Arcgis 8.2 y Arcview 3.2 para generar la capa de información correspondiente a esta variable.

A partir de las capas de información generadas en el SIG se ha obtenido una serie de parámetros geográficos, geológicos y climáticos cuyo análisis permite determinar qué variables juegan un papel más importante en la recarga de los diferentes acuíferos y qué agrupaciones de acuíferos pueden establecerse con afinidades desde el punto de vista de la recarga.

Características generales de los acuíferos seleccionados

La Cordillera Bética presenta un elevado número de macizos carbonáticos, susceptibles de karstificación, aunque no todos ellos presentan las mismas aptitudes frente a los procesos de disolución y el consiguiente desarrollo de los sistemas kársticos (Durán *et al.*, 1998). La diversidad morfoestructural y bioclimática de la cordillera y su historia geológica reciente han originado la configuración de una geomorfología kárstica muy variada. La distinción de las grandes unidades geológicas de la Cordillera Bética, basada en criterios paleogeográficos y estructurales, presenta un claro reflejo geomorfológico e hidrogeológico.

Para la realización de este trabajo se han seleccionado varios acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética que, de Oeste a Este, son los siguientes: Sierra de las Cabras (Cádiz), Sierra de Líbar (Cádiz y Málaga), Sierra de las Nieves (Málaga), Sierras Blanca y Mijas (Málaga), Sierra Gorda de Loja (Granada), Sierras de Cabra y Rute-Horconera (Córdoba), Sierra de Cazorla (Jaén) y Sierra de María (Almería). Se trata de acuíferos representativos de un amplio abanico de características geológicas, climáticas, topográficas, geomorfológicas y edafológicas que concurren en la Cordillera Bética. En la tabla 1 se resumen las características de estos acuíferos y se indican otros que presentan similitudes con ellos.

Se han considerado acuíferos carbonáticos de la mayor parte de los dos grandes dominios paleogeográficos de la cordillera, tanto de la Zona Externa (Prebético, Subbético Externo, Subbético Medio y Subbético Interno y/o Penibético) como de la Zona Interna (Alpujárride, Dorsal). En ellos hay calizas y dolomías, y sus equivalentes metamórficos, implicados en estructuras geológicas diversas, plegadas y falladas en mayor o menor grado. Igualmente, el desarrollo del modelado kárstico varía desde acuíferos con gran desarrollo del exokarst y del endokarst (por ejemplo, Sierra de Líbar o Sierra de las Nieves) a

otros en los que apenas se aprecia desarrollo de éstos (Sierra de María).

Las diferencias litológicas, estructurales y geomorfológicas antes aludidas tienen influencia en el funcionamiento hidrogeológico y en la descarga de los acuíferos seleccionados. Así, se han considerado acuíferos carbonáticos fisurados de flujo difuso (Sierra de María, Sierra de Mijas), con respuestas lentas ante las precipitaciones debido a su gran inercia y su elevado poder regulador y acuíferos de flujo por conductos, que reflejan una mayor karstificación funcional de los existentes en la Cordillera Bética (Sierra de Líbar y Sierra de las Nieves).

Por lo que respecta al marco climático, es un hecho conocido que las precipitaciones en Andalucía disminuyen de Oeste a Este, en casi un orden de magnitud (desde aproximadamente 2000 mm en la Sierra de Grazalema hasta 200 mm en Almería), razón por la cual en este análisis se han seleccionado acuíferos representativos de un amplio abanico de precipitaciones medias anuales: desde 1300 mm en Sierra de Líbar hasta 500 mm en Sierra de María.

En lo relativo a la topografía, aunque todos podrían considerarse acuíferos de montaña, con un variado rango de altitudes y energía de relieve, como corresponde a una cordillera alpina fuertemente afectada por la neotectónica, se han seleccionado acuíferos con una topografía particularmente abrupta (Sierras de María, Cazorla) y acuíferos que, aún presentando unas laderas con relativa pendiente, tienen en su parte alta una forma más o menos plana ("plateau" en la terminología francesa), como ocurre en Sierra de Líbar y Sierra de las Nieves.

En general, el suelo está poco desarrollado y con escasa vegetación en los macizos carbonáticos del Sur de España. No obstante, varios de los acuíferos seleccionados para este estudio presentan amplios sectores donde el suelo llega a tener un cierto desarrollo y está colonizado por vegetación, aunque sea de repoblación (Sierras de María, de Cazorla, de Mijas). En otros acuíferos, como Sierra Gorda, prácticamente no hay ni suelo ni vegetación sobre los afloramientos carbonáticos.

Tasa media de recarga anual en los acuíferos seleccionados

En la Sierra de las Cabras se han llevado a cabo varias tentativas de estimación de la recarga con métodos de balance que tienen en cuenta las entradas procedentes fundamentalmente de las precipitaciones y las salidas por el principal punto de descarga del acuífero (manantial de El Tempul). Los cálculos se han repe-

DOMINIO PALEOGEOGRÁFICO	ACUÍFERO TIPO	PRECIPITACIÓN (mm)	SUPERFICIE (km ²)	ACUÍFEROS SIMILARES	PENDIENTE	AMPLITUD RELIEVE (m)	LITOLOGÍA	ESTRUCTURA	FORMAS DE ABSORCIÓN ACTIVAS
Prebético	Cazorla	740	823	Sierra del Pozo	Elevada	1918	dolomías J	Escamas	Escasas
Subbético Externo y Subbético Medio	Cabra-Rute-Horconera	800	195	Sierra de Pandera-Parapanda	Relativamente Elevada	1091	calizas y dolomías J	Pliegues y cabalgamientos	Abundantes
	Sierra Cabras	963	34	Sierra de Cañete	Elevada	571	calizas y dolomías J	Pliegues apretados, fallas	Escasas
Subbético Interno	Sierra Gorda	860	334	Sierra de Cabra (Córdoba)	Baja en la parte alta	1145	calizas y dolomías J	Domo anticlinal	Abundantes
	Sierra María	485	70	Sierra Arana	Elevada	976	dolomías y calizas J	pliegues "fallados"	Escasas
Penibético	Sierra Líbar	1299	89	Grazalema, E. de Ronda, Segura	Muy baja en la parte alta	930	calizas y dolomías J	pliegues en cofre	Muy Abundantes
Dorsal-Rondaide	Sierra de Nieves	1004	129		Baja en la parte alta	1528	dolomías y calizas T-J	pligie tumbado	Muy Abundantes
Alpujárride	Blanca-Mijas	712	173	Almijara, Lújar, Gádor, La Peza	Elevada	1131	Mármoles T	pliegues isoclinales	Poco abundantes

Tabla 1. Características de los acuíferos considerados en este trabajo
 Table 1. Characteristics of the aquifers taking into account in this work

tido para tres períodos de distinta duración (ITGE-GHUMA, 2000; Jiménez *et al.*, 2001): un período histórico (1862-1978) durante el cual se disponen de datos mensuales de caudal del manantial, un período reciente pero más corto (1985-1995) durante el cual existen datos diarios del caudal del manantial y, finalmente, el período comprendido entre 17/6-96 y 17-11-99 durante el cual hay datos de profundidad del nivel piezométrico. Así, para los dos primeros períodos, suficientemente largos y representativos, las entradas al sistema (recursos) serían del orden de la tercera parte de las precipitaciones y equivaldrían a la descarga que se realiza por el manantial de El Tempul. Para el tercer período se obtiene una tasa media de recarga anual similar, lo cual corrobora que la tasa de recarga debe ser del orden de la tercera parte de la lluvia que cae sobre la superficie permeable de Sierra de las Cabras.

La tasa media de recarga anual en la Sierra de Líbar fue calculada por el IGME (1984), aplicando el método de Kessler y el balance de Thornthwaite y los resultados obtenidos fueron, respectivamente, del 55% y 59% de la precipitación. En el informe realizado por la Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Medio Ambiente (DGOH, 1998) se eva-

luó la recarga en el 53% de las precipitaciones. A partir de datos recientes del contenido en cloruro del agua de lluvia y del agua drenada por el manantial de Benaoján, se ha calculado un valor medio de la tasa de recarga del 54%. Por tanto, con los datos disponibles, se estima que el valor medio de recarga en la Sierra de Líbar es del orden del 55%.

En el acuífero de la Sierra de las Nieves se ha calculado la tasa media de recarga anual por diferentes métodos: de balance, hidroquímicos (cloruro) y método de Kessler (Liñán, 2003). Los métodos del primer tipo tienen en cuenta las salidas registradas en los manantiales y las entradas procedentes de las precipitaciones, una vez que se descuenta la evapotranspiración calculada por los métodos de Turc, Coutagne y Thornthwaite (con capacidades de campo de 25 y 50 mm), aunque los valores obtenidos para las entradas difieren mucho de las salidas. Sin embargo, el método de Kessler y, sobre todo, el balance de cloruro permiten obtener valores de la tasa de recarga (51% y 55%, respectivamente) más coherentes con las observaciones geológicas e hidrogeológicas realizadas en el campo. El valor medio anual de la tasa de recarga que mejor se adapta a las salidas controladas es el obtenido por el método del balance de cloruros.

En los sistemas acuíferos que constituyen las Sierras Blanca y de Mijas se han aplicado los mismos métodos que en Sierra de las Nieves para el cálculo de la tasa media de recarga anual (Andreo, 1997; Andreo *et al.*, 2000) y, además, el método de Thornthwaite se ha aplicado con datos diarios de precipitación y temperatura. Los métodos que dan resultados globales más coherentes con las observaciones hidrogeológicas son el balance de cloruros y el de Thornthwaite a nivel diario con una capacidad de campo de 50 mm. Sin embargo, cuando se analizan de forma detallada los datos disponibles en cada sistema acuífero, se constata que el método del balance de cloruros es más adecuado. El valor de la tasa media anual de recarga es del 45%.

En la Sierra Gorda de Loja, López Chicano (1992) aplicó los mismos métodos antes citados, aunque en este caso el resultado más dispar, respecto al valor de referencia obtenido por la descarga visible por manantiales, es el que suministra el método del balance de cloruro, que no puede ser admitido ni tan siquiera como aproximado, probablemente por la escasez de datos del contenido en cloruro del agua de lluvia y/o por la aportación de cloruro desde la zona saturada del acuífero. Los valores obtenidos mediante la aplicación de los métodos empíricos de Coutagne y Turc infravaloran, también, la recarga pluviométrica, no pueden ser aplicados en las condiciones climáticas que muestra Sierra Gorda, al igual que ocurre en la Sierra de las Nieves o en las Sierras Blanca y de Mijas. Los métodos empíricos de Thornthwaite y Kessler sobreestiman la recarga pluviométrica. La tasa media de recarga en el acuífero kárstico de Sierra Gorda, de acuerdo con los datos obtenidos por López-Chicano (1992), es del orden del 50%.

En las Sierras de Cabra y de Rute-Horconera las entradas al sistema corresponden exclusivamente a la infiltración de las precipitaciones caídas sobre la superficie del acuífero (Boumama *et al.*, 1996). La recarga ha sido valorada en un 45% por el ITGE (1998) aplicando el método de balance.

Rubio Campos *et al.* (2001) han utilizado para la Sierra de Cazorla una tasa de recarga obtenida en el acuífero próximo de Sierra Seca, de similares características, a partir de datos de precipitación y de caudal en los manantiales (IGME-Universidad de Granada, 1990). La tasa media anual de recarga así calculada es del 33%.

Finalmente, en la Sierra de María, la tasa de recarga ha sido evaluada por Moreno *et al.* (1983) mediante el método de Kessler y métodos de balance hidrogeológico en los que la evapotranspiración se obtiene por diferentes procedimientos: Thornthwaite,

Coutagne y Turc. El método de Kessler permite obtener valores por exceso respecto a las descargas conocidas, mientras que con los métodos de Coutagne y Turc se obtienen valores claramente deficitarios, en consonancia con lo que ocurre en otros acuíferos considerados en este trabajo (Sierra de las Nieves, Blanca-Mijas, Sierra Gorda). En cambio, con el método de Thornthwaite se obtienen valores de la tasa de recarga del orden de un tercio de las precipitaciones, más coherentes con las descargas controlables y con datos recientes obtenidos mediante el balance de cloruro.

Los resultados obtenidos para los ocho acuíferos muestran que los valores de la tasa media anual de recarga en acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética están comprendidos, aproximadamente, entre el 33% y el 55% de las precipitaciones.

Análisis de las variables que influyen en la recarga

A partir de los mapas o capas de información generadas en el SIG, de las variables que influyen en la recarga (precipitación, altitud, pendiente, litología, áreas de recarga preferencial y suelos), se han obtenido una serie de parámetros geográficos, geológicos y climáticos (Tabla 2). En una primera aproximación, los parámetros extraídos de las capas de información del SIG han sido los siguientes: del mapa de isoyetas, la precipitación media mediante planimetría de isoyetas y el volumen total precipitado; del mapa hipsométrico, la amplitud de relieve, la altitud media y los percentiles 25 y 75 de la curva hipsométrica; del mapa de pendientes, los porcentajes de superficie con pendiente inferior al 8% y superior al 46%; del mapa litológico, los porcentajes de superficie ocupados por rocas calcáreas y dolomíticas; del mapa geomorfológico, el porcentaje de superficie ocupado por formas de infiltración preferencial y, del mapa de suelos, el porcentaje de superficie ocupado por rocas carbonáticas, sobre las que el suelo está pobremente desarrollado (leptosol). Además, se han utilizado otros parámetros como la superficie total de los acuíferos, la temperatura y la evapotranspiración potencial y, por supuesto, la tasa media de recarga previamente calculada por técnicas convencionales en cada sistema.

Con los datos correspondientes a cada uno de los parámetros anteriores se han realizado varios Análisis de Componentes Principales (ACP), para poder determinar qué parámetros influyen más en la recarga de los acuíferos y qué familias o grupos de éstos pueden establecerse con afinidades desde el punto de vista de la recarga.

		SISTEMAS							
		Cabras	Líbar	Nieves	Blanca-Mijas	Cab-Rute-Hor	Gorda	Cazorla	María
Precipitación. Isoyetas	Superficie (km ²)	34,1	88,9	128,8	172,7	195,5	333,7	823,0	70,2
	temperatura (°C)	17,3	15,8	15,0	18,3	15,7	13,1	14,6	12,0
	ETP (mm)	925,0	850,0	875,0	925,0	850,0	825,0	850,0	850,0
	pp media (mm)	963,9	1299,0	1003,7	712,2	800,0	860,7	740,4	484,4
Altitud. Curva hipsométrica	volumen (hm ³)	32,9	115,5	129,3	123,0	118,4	287,2	609,3	34,0
	amplitud relieve (m)	571,0	930,0	1528,0	1131,0	1091,0	1145,0	1918,0	976,0
	altitud media (m)	361,5	948,5	1140,0	620,0	956,0	594,0	1136,0	1515,5
	percentil 25 (m)	241,3	748,8	832,0	360,0	724,0	565,0	788,0	1296,3
Pendiente	percentil 75 (m)	507,8	1148,3	1455,0	885,0	1188,0	626,0	1484,0	1746,8
	inferior 8% (%)	21,5	19,7	19,5	14,1	21,4	37,1	18,7	10,9
Litología	superior 46% (%)	19,4	21,4	19,8	22,4	13,0	7,2	14,7	28,5
	% calcáreas	79,6	76,5	52,6	49,7	54,2	76,0	27,9	42,2
Formas de Infiltración	% dolomíticas	10,6	4,0	44,8	48,3	14,8	10,5	55,7	52,4
	superficie (%)	7,1	45,7	11,9	6,7	2,1	29,0	5,0	1,0
Suelo	leptosol (%)	26,0	80,4	65,9	64,5	15,4	79,6	6,2	57,9
	Coef. Recarga (%)	33,0	55,0	55,0	45,0	45,0	50,0	33,0	33,0

Tabla 2. Variables climáticas, geológicas, geomorfológicas y edafológicas de los acuíferos considerados en este trabajo
 Table 2. Climatic, geologic, geomorphologic and pedologic variables of the aquifers taking into account in this work

Se ha llevado a cabo un primer ACP con el conjunto de variables y acuíferos considerados (Fig. 2). Los dos ejes o factores principales de este primer ACP explican el 65,1% de la varianza muestral. El factor I (40,9%) está caracterizado por la oposición entre el porcentaje de rocas calcáreas frente a un grupo de variables que en gran medida aportan la misma información, como es el caso de la amplitud de relieve, altitud media, percentil 25 y 75 de la curva hipsométrica, los cuales caracterizan el relieve de los acuíferos. El eje II (24,2%) queda definido por la pendiente, el porcentaje de formas de absorción y por las variables temperatura y evapotranspiración que aparecen muy próximas en el diagrama. En el campo de las observaciones es posible diferenciar acuíferos de recarga elevada en la parte izquierda del diagrama (Sierras de Líbar y Gorda), acuíferos de recarga baja en la parte derecha (Sierras de Cazorla y María) y acuíferos con una tasa de recarga intermedia (Sierras

Blanca y Mijas y Sierras de Cabra y Rute-Horconera. Los acuíferos de Sierra de las Nieves (cuya tasa de recarga es alta) y, sobre todo, el de Sierra de las Cabras (con una tasa de recarga baja) no se adaptan bien a dicha caracterización. En cualquier caso, en este primer ACP hay gran cantidad de variables que son redundantes y se superponen en el gráfico y otras que no parecen tener un peso predominante en el ámbito de estudio, por lo que se ha realizado un segundo ACP eliminando estas variables.

En el segundo ACP (Fig. 3), los dos primeros factores explican el 67,4% de la varianza. El eje I (43,9%), eje de la recarga, queda determinado por la oposición de las variables precipitación media, % calizas, % formas kársticas, % superficie con pendientes <8%, % recarga y leptosoles, frente a % dolomías y zonas de mayor pendiente. El eje II (23,5%) queda definido por las variables altitud media y evapotranspiración. En el campo I-II de las unidades estadísticas se diferencian



Fig. 2. Primer Análisis de Componentes Principales (ACP), realizado con todas las variables de la tabla 1
 Fig. 2. First Principal Component Analysis (PCA), done with all the variables of table 1

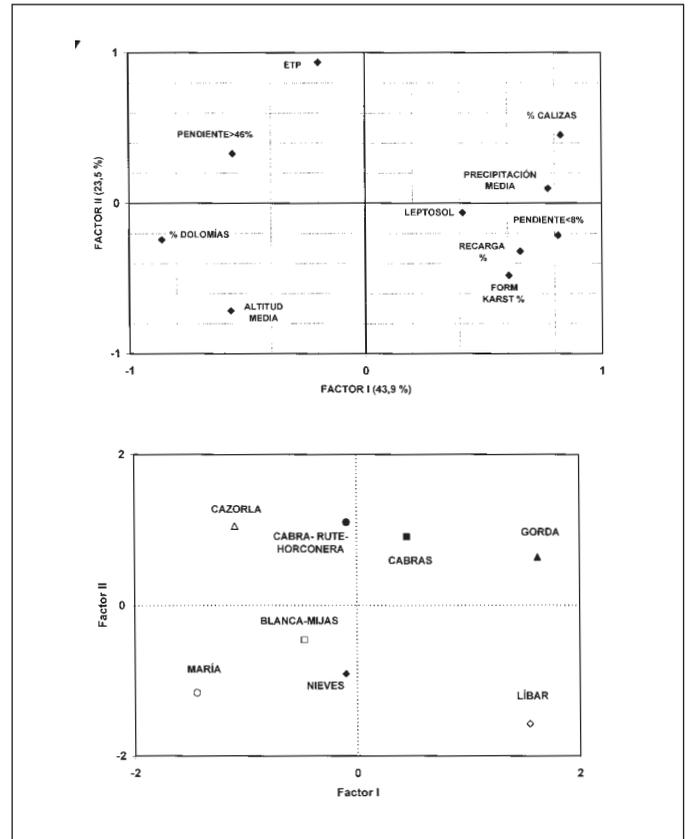


Fig. 3. Segundo ACP, efectuado sin variables redundantes o con poco significado estadístico
 Fig. 3. Second PCA, done without the reiterative variables or with lower statistical significance

los tres grupos o familias de sistemas acuíferos distinguidos en el primer ACP, ordenados dentro del plano I-II, de izquierda a derecha, según el valor creciente de la tasa de recarga. No obstante, los acuíferos de Sierra de las Nieves y, sobre todo, Sierra de las Cabras mantienen una posición algo incongruente, ya que la caracterización de la recarga efectuada por otros métodos lleva a pensar que sus posiciones dentro del campo de las unidades estadísticas deberían estar desplazadas, respectivamente, hacia la parte positiva y negativa del eje I.

Los dos Análisis de Componentes Principales descritos han incluido la tasa de recarga como una variable más. Se ha realizado un tercer ACP sin esta variable para comprobar si existe una influencia importante de la misma en los resultados. En el nuevo ACP los dos ejes principales explican el 71,2% de la varianza muestral (Fig. 4). El eje I (46,1%) está determinado nuevamente por la oposición de las variables precipitación media, % calizas, % formas kársticas y % superficie con pendientes <8% frente a

% dolomías y, en menor medida, altitud media; por lo que parece bien claro que este es el factor recarga. El eje II (25,1%), también queda nuevamente definido, al igual que el segundo ACP, por la evapotranspiración. En el campo I-II de las unidades estadísticas pueden distinguirse los tres grupos de sistemas acuíferos antes descritos. No obstante, la posición de la Sierra de las Cabras es similar a la que ocupa la Sierra de las Nieves, lo que indicaría un comportamiento similar en cuanto a la recarga, hipótesis ésta que no resulta coherente con la caracterización de la recarga efectuada por otros métodos para cada uno de estos sistemas. La posición del acuífero de Sierra de las Cabras en los diagramas debe estar relacionada con la elevada precipitación y la baja altitud que presenta.

Un cuarto y último ACP, con las mismas variables que el anterior, pero sin incluir la variable ETP permite llegar a los mismos resultados que el tercer ACP, sin una pérdida de varianza significativa (los primeros ejes dan cuenta del 68,4%), al tiempo que aproxima la posición de la Sierra de las Nieves al resto de acuífe-

ros con recarga alta en el gráfico de las unidades estadísticas y la posición de Sierra de las Cabras se desplaza hacia los acuíferos de menor tasa de recarga (Fig. 5).

A partir del análisis multivariante llevado a cabo con los datos de los ocho acuíferos estudiados se deduce que la recarga está condicionada básicamente por las siguientes variables: precipitación, altitud, pendiente, litología, formas de infiltración o absorción preferencial y suelo. Todas estas variables están disponibles o son deducibles fácilmente a partir de la información existente en las bases de datos de diversos Organismos Públicos y pueden ser utilizadas, previa introducción en un SIG, para la estimación de la recarga. Las variables que más influyen en la recarga, de acuerdo con los resultados obtenidos son: precipitación media, porcentaje de calizas que afloran en el área y porcentaje de superficie ocupada por formas de absorción preferencial. Así, la recarga suele ser más elevada donde la precipitación es abundante y afloran extensamente las calizas, porque en ellas se

desarrollan abundantes formas exokársticas de absorción, sobre todo si la pendiente es baja (< 8%). En lo que se refiere a los grupos de acuíferos que se pueden establecer a partir del tratamiento efectuado, se describen en el apartado siguiente.

Clasificación tipológica de los acuíferos carbonáticos en función de la recarga

Los trabajos desarrollados en el marco del presente trabajo permiten proponer una clasificación tipológica preliminar de los acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética, atendiendo a criterios de carácter geológico, climático, hidrogeológico y geomorfológico. La clasificación que aquí se propone no es más que una primera aproximación que debe ser completada en el futuro de acuerdo con los resultados de posteriores investigaciones. La introducción de la información básica de los acuíferos en un SIG, como se ha hecho en el marco de este estudio, permitirá

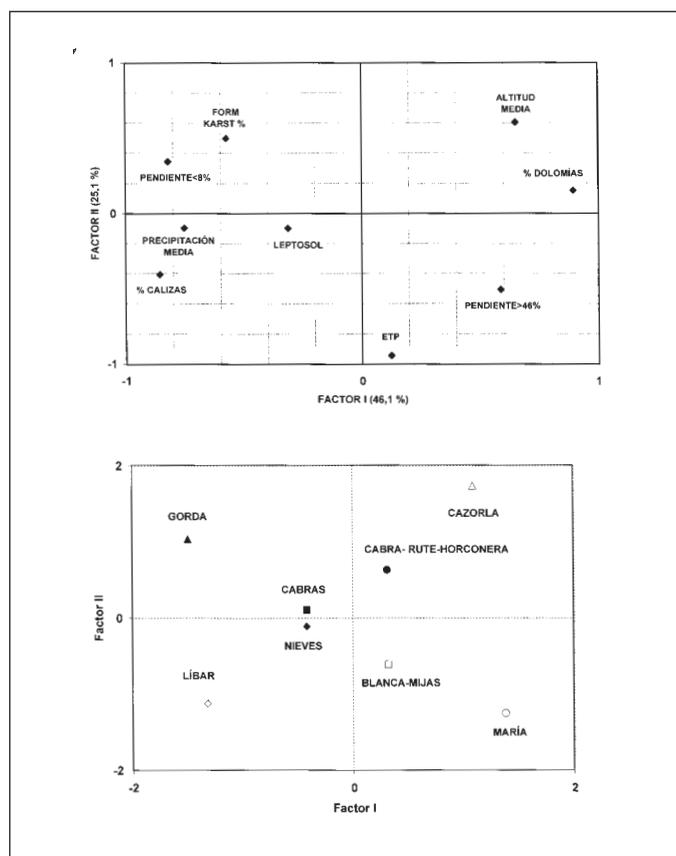


Fig. 4. Tercer ACP. Es similar al segundo ACP, pero no incluye la variable "% recarga"

Fig. 4. Third PCA. It is similar to the second one, but the variable "% recharge" is not included

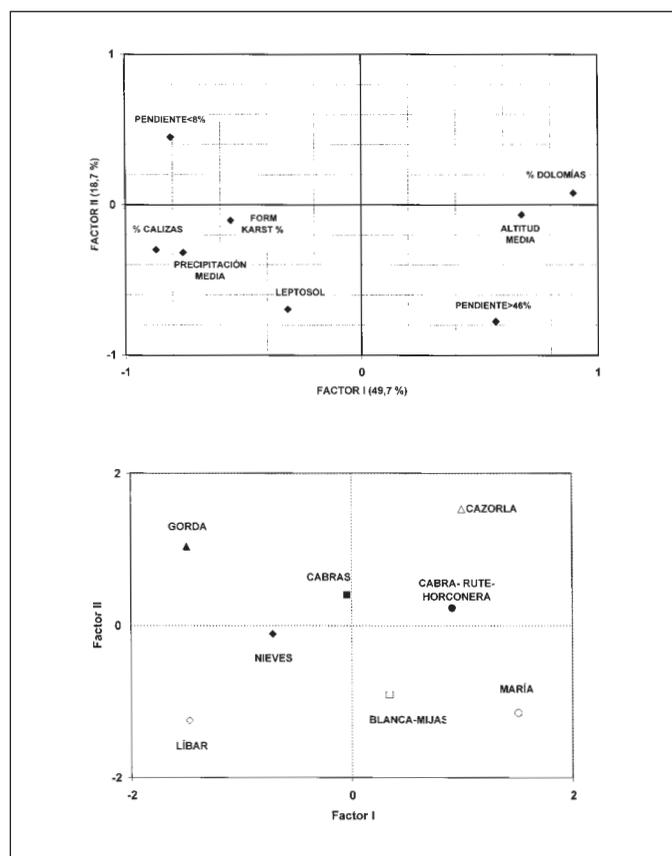


Fig. 5. Cuarto ACP. Es similar al tercer ACP, pero no incluye la variable "ETP"

Fig. 5. Fourth PCA. It is similar to the third one, but the variable "ETP" is not included

revisar y actualizar los balances hidrológicos de los diferentes acuíferos considerados y de otros existentes en la Cordillera Bética. Este aspecto es de enorme interés de cara a la planificación hidrológica y a la gestión de los recursos hídricos.

A partir del análisis de las variables efectuado, se han establecido tres tipos de acuíferos con diferentes tasas de recarga: (1) acuíferos con alta tasa de recarga, (2) acuíferos con tasa de recarga moderada y (3) acuíferos con una baja tasa de recarga.

Los acuíferos con alta tasa de recarga (50-55%) se encuentran en áreas donde la precipitación es abundante, generalmente superior a 800 mm, la pendiente topográfica es baja en las partes altas de los afloramientos (a menudo, "plateau") y en ellos existe gran abundancia de formas kársticas de absorción. Estos últimos aspectos están fuertemente condicionados por la estructura geológica que en la mayoría de los casos da lugar a una disposición horizontal (o casi) de la estratificación. Como ejemplos tipo se han considerado la Sierra de Líbar y la Sierra Gorda de Loja (Penibético-Subbético Interno) y la Sierra de las Nieves (Dorsal Bética) aunque los resultados obtenidos pueden ser extrapolables a otros macizos kársticos andaluces como el Torcal de Antequera, la Sierra de Grazalema, las sierras situadas al Este de Ronda (Blanquilla-Merinos) y algunos sectores de la Sierra de Segura. En cualquier caso, son los acuíferos que presentan la tasa de recarga más elevada de todos los estudiados pero, gran parte de ellos, tienen una rápida descarga, porque el grado de karstificación funcional que presentan es mayor; los manantiales que drenan estos acuíferos suelen tener un funcionamiento típicamente kárstico, con rápidas respuestas ante las precipitaciones y, consecuentemente, con bajo poder regulador natural (Carrasco *et al.*, 2001; IGME-GHUMA, 2003).

En los acuíferos con tasa de recarga moderada (45%), la precipitación es del orden de 600-800 mm. Los acuíferos tipo que se han considerado son las Sierras Blanca y Mijas, pertenecientes al dominio Alpujarride, y las Sierras de Cabra y Rute-Horconera (Subbético Externo), todos ellos constituyen macizos carbonáticos con una estructura plegada y una pendiente importante. Cabe hacer especial mención, por la extensión regional que presentan, a los acuíferos alpujarrides formados por dolomías ("kakiritas") que a menudo desarrollan un horizonte arenoso superficial por disgregación intergranular de cristales de dolomita. Este hecho condiciona mucho la infiltración, que es relativamente importante, pero que se produce de forma lenta, puesto que no existen formas exokársticas de absorción y, consecuentemente, los acuíferos tienen un gran poder regulador natural

(IGME-GHUMA, 2003). Además de los acuíferos tipo antes citados, en este grupo se pueden incluir los acuíferos formados por dolomías alpujarrides que afloran en los bordes de Sierra Nevada, Sierra Almirajara y las Sierras de Lújar y Gádor, así como otros acuíferos subbéticos del sur de la provincia de Jaén (Sierras de Pandera y Parapanda).

Los acuíferos con baja tasa de recarga (33%) están formados por dolomías y calizas fuertemente plegadas y fracturadas que dan lugar a relieves de elevadas pendientes, donde la escorrentía puede alcanzar valores relativamente importantes. En este tipo de acuíferos, la precipitación puede variar entre 500 mm (Sierra de María, Subbético Interno) y 850 mm (Sierra de las Cabras, Subbético Medio). Aparte de los acuíferos anteriores, a este tipo pueden atribuirse la Sierra de Cañete y Sierra Arana, entre otros. El análisis de las descargas de estos sistemas muestra una gran inercia ante la recarga de las precipitaciones (a veces en forma de nieve, como en Sierra Arana o Sierra de María). Son acuíferos con bajo grado de karstificación funcional y gran poder regulador natural (Carrasco *et al.*, 2001; IGME-GHUMA, 2003).

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Convenio de Colaboración existente entre la Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del IGME y el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Es una contribución a los Proyectos REN2002-01797/HID y REN2003-01580/HID de la DGI e IGCP-448 de la UNESCO y al Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía.

Referencias

- Andreo, B. 1997. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas (Cordillera Bética, Sur de España)*. Serv. Pub. Univ. de Málaga, 489 pp.
- Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J.J. Fernández, G., Linares, L., López-Geta, J.A., Mayorga, R. y Vadillo, I. 2000. Hydrogeological investigations for groundwater exploitation in the Sierras Blanca and Mijas (Málaga, southern Spain). *Hydrogéologie*, 3, 69-83.
- Bouamama, M., López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1996. Comportamiento hidrogeoquímico estacional de los principales manantiales kársticos del Sur de Córdoba (Parque Natural de las Sierras Subbéticas). *IV Simposio del Agua en Andalucía*, Almería, 2, 37-47.
- Cardenal, J. 1993. *Hidrogeología del sector Sierra de Lújar-Albuñol (provincia de Granada)*. Tesis Doct. Univ. de Granada, 402 pp.
- Carrasco, F., Jiménez, P., Andreo, B., López Chicano, M.,

- Marín, A., Liñán, C. y Vadillo, I. 2001. Estudio comparativo preliminar del funcionamiento hidrogeológico de varios acuíferos carbonatados de la Cordillera Bética. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 23: 381-391.
- Coutagne, A. 1954. Etude de quelques corrélations hydro-météorologiques regionales et de leur interpretation algébrique. *Ibid.*, 220-226.
- Custodio, E. 1998. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. *Boletín Geológico y Minero*, 109:13-29.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. -Eds- 1976. *Hidrología Subterránea*. Omega, Barcelona, 2359 pp.
- Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. -Eds- 1997. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. IAH-GE e ITGE, 455 pp.
- DGOH 1998. *Las Unidades Hidrogeológicas de las Sierras de Líbar y Grazalema*. Secretaría de Estado de Aguas y Costas, Ministerio de Medio Ambiente, 52 pp.
- Durán, J.J., López Martínez J. y Vallejo, M. 1998. Distribución, caracterización y síntesis evolutiva del karst en Andalucía. En: Durán, J.J. y López Martínez, J. (eds.), *Karst en Andalucía*, 13-19.
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood, New Jersey.
- IGME 1984. *Estudios de investigación hidrogeológica para la regulación de los recursos hídricos subterráneos de la divisoria Guadalete-Guadiaro*. 2 tomos.
- IGME-GHUMA (2003): *Estudios metodológicos para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonáticos: aplicación a la Cordillera Bética*. 3 tomos.
- IGME-Universidad de Granada (1990). *Investigación de acuíferos carbonatados (Sierras de Cazorla y Segura)*. Informe inédito, 253 pp, 4 anexos.
- ITGE (1998): *Atlas Hidrogeológico de Andalucía*.
- Jiménez, P., Andreo, B., Durán, J.J., Carrasco, F., López-Geta, J.A., Vadillo, I. y Vázquez, M. 2001. Estudio hidrodinámico del manantial de El Tempul (Sierra de las Cabras, Cádiz, Sur de España). *Boletín Geológico y Minero*, 2, 85-101.
- ITGE-GHUMA 2000. *Análisis del funcionamiento hidrogeológico y optimización del aprovechamiento de las aguas del manantial de El Tempul (acuífero de la Sierra de las Cabras, provincia de Cádiz)*. Informe inédito.
- Kessler, H. 1967. Water balance investigations in the karst regions of Hungary. *Act. Coll. Dubrovnik*, AIHS-UNESCO.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. y Simmers, I. 1990. *Groundwater Recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge*. International Contributions to Hydrogeology. IAH, Vol. 8, Heise.
- Liñán, C. 2003. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en la Unidad Yunquera-Nieves (Málaga)*. Tesis Doct. Univ. de Granada, 317pp.
- López Chicano, M. 1992. *Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda (Granada y Málaga)*. Tesis Doct. Univ. de Granada, 387 pp.
- López Vera, F. y Sáiz, J. 1975. Cálculo de la infiltración eficaz en materiales karstificados. Aplicación al macizo kárstico de Cabra (Córdoba). *Tecniterrae*, 32-41.
- Moreno Calvillo, I., Pulido Bosch, A. y Fernández Rubio, R. 1983. Hidrogeología de las Sierras de María y del Maimón (Almería). *Boletín Geológico y Minero*, 44:321-338.
- Pulido Bosch, A. -Ed.- 1993. *Some Spanish karstic aquifers*. Univ. de Granada, 310 pp.
- Rubio Campos, J. C., González Ramón, A., Pozo Gómez, M., Lupiani Moreno, E., Luque Espinar, J.A. y Gollonet, J. 2001. Nuevos datos sobre la hidrogeología de la subunidad de Beas de Segura. Unidad 05.01 Sierra de Cazorla. V *Símpoio sobre el Agua en Andalucía*, Almería, 2, 187-195.
- Samper, J. 1998. Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres. *Boletín Geológico y Minero*, 109, 347-370.
- Samper, J. y García Vera, J.L. 1992. *BALAN v.10: Programa para el cálculo de balances de agua y sales en el suelo*. Departamento de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Schoeller, H. 1962. *Les eaux souterraines*. Masson, Paris, 642 pp.
- Sharma, M.L. -Ed.- 1990. *Groundwater Recharge*. Balkema.
- Thorntwaite, C.W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review* 38, 55-94.
- Turc, L. 1954. Le bilan d'eau des sols; relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Ibid.*, 36-44.

Recibido: diciembre 2003

Aceptado: mayo 2004