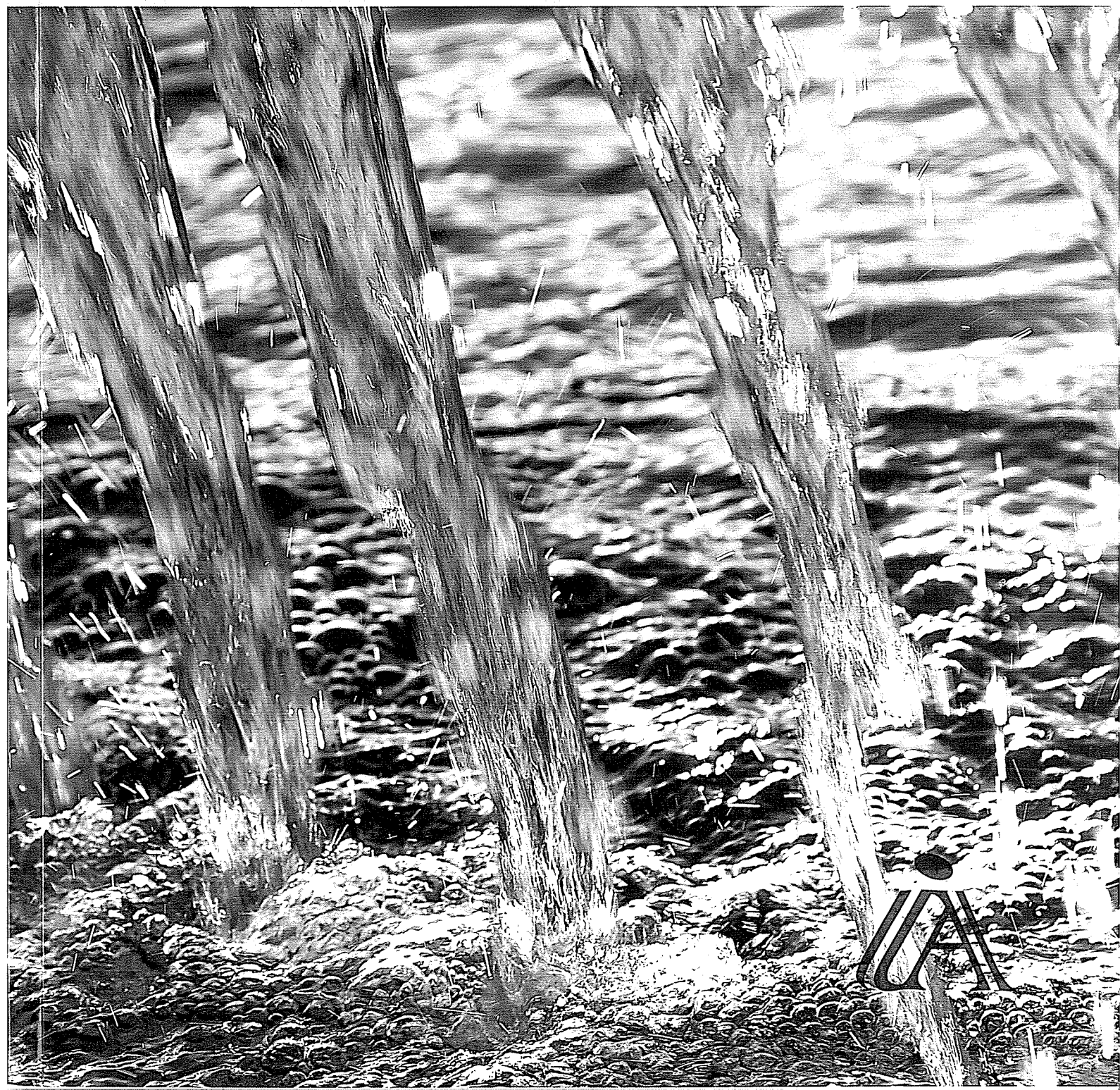


# Ingeniería del agua

Editor Científico

Manuel Gómez



# Ingeniería del agua

## Editor Científico

Manuel Gómez, Universitat Politècnica de Catalunya

## Editores Asociados

Jerónimo Puertas, Universidade da Coruña

Iñigo Losada, Universidad de Cantabria

## Comité Editorial

Luis Balairón, Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, España

Emilio Camacho, Universidad de Córdoba, España

Luis G. Castillo, Universidad Politécnica de Cartagena, España

José Cataldo, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay

Vicente Espert, Universidad Politécnica de Valencia, España

Daniel Farias, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina

Marcelo H. García, Universidad de Illinois - Urbana Champaign, EEUU

Nahún H. García Villanueva, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México

Javier González, Universidad de Castilla - La Mancha, España

Arturo Marcano, EDELCA, Venezuela

Jorge Matos, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal

Yarko Niño, Universidad de Chile, Chile

José J. Ota, Universidad Federal de Paraná, Brasil

Juan G. Saldarriaga, Universidad de los Andes, Colombia.

Rodolfo Silva, Universidad Nacional Autónoma de México, México

Joaquín Suárez, Universidade da Coruña, España

José M<sup>a</sup> Tarjuelo, Universidad de Castilla - La Mancha, España

## Revista editada por la Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua

ISSN: 1134-2196

Depósito legal: SA-609-2000

Edición: Adriana Stilmann; Maquetación: M<sup>a</sup> Jesús Samper; Diseño: Adriana Hanganu

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)

Edificio C1, Campus Norte UPC, c/Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona, [www.cimne.com](http://www.cimne.com)

Impreso en papel 100% libre de cloro

Producción: Dsignum, estudi gràfic

Vicenç Banyuls 10

08186 Lliçà d'Amunt

# ASPECTOS HIDRODINÁMICOS DEL SECTOR NE DE LA SERRA DE TRAMUNTANA, MALLORCA, ESPAÑA

**G. Cardoso da Silva**

Departamento de Geología, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Cidade Universitária 21949-900 Rio de Janeiro, Brasil  
gerson@acd.ufrj.br

**E. Custodio Gimena**

Real Academia de Ciencias Matemáticas, Físicas y Naturales (España)  
Departamento de Ingeniería del Terreno, Universitat Politècnica de Catalunya  
Campus Nord, Edificio D2, C. Jordi Girona, 1-3. 08034 Barcelona, España

**Resumen:** La Isla de Mallorca tiene escasos manantiales de agua dulce debido a la permeabilidad de sus formaciones. Con fines de abastecimiento la Serra de Tramuntana tiene interesantes características hidrogeológicas. Está compuesta por rocas carbonatadas a lo largo de la costa NW de Mallorca, con buenos acuíferos y alta precipitación anual. Se estudian las características hidrogeológicas de tres zonas dentro del sector Nororiental de la Serra de Tramuntana: 1) Sa Costera, un importante manantial permanente; 2) Ses Ufanes de Gabellí, un conjunto de espectaculares manantiales intermitentes; y 3) S'Almadrava, una surgencia importante en la llanura costera de Pollença, que descarga una mezcla de agua dulce y marina. En Sa Costera la descarga neta del manantial puede alcanzar el 80 % de la aportación media anual por la precipitación, cerca de 10,4 hm<sup>3</sup>/año, con un área de recarga de aproximadamente 10 km<sup>2</sup>. Ses Ufanes constituye la salida temporal principal del área de recarga de un sistema con un caudal de los manantiales de cerca de 17 hm<sup>3</sup>/año, de un total de 20 hm<sup>3</sup>/año de descarga media total. S'Almadrava muestra la existencia de un complejo y bien desarrollado sistema kárstico, que descarga aproximadamente 12 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 2,4 hm<sup>3</sup>/año son de agua marina.

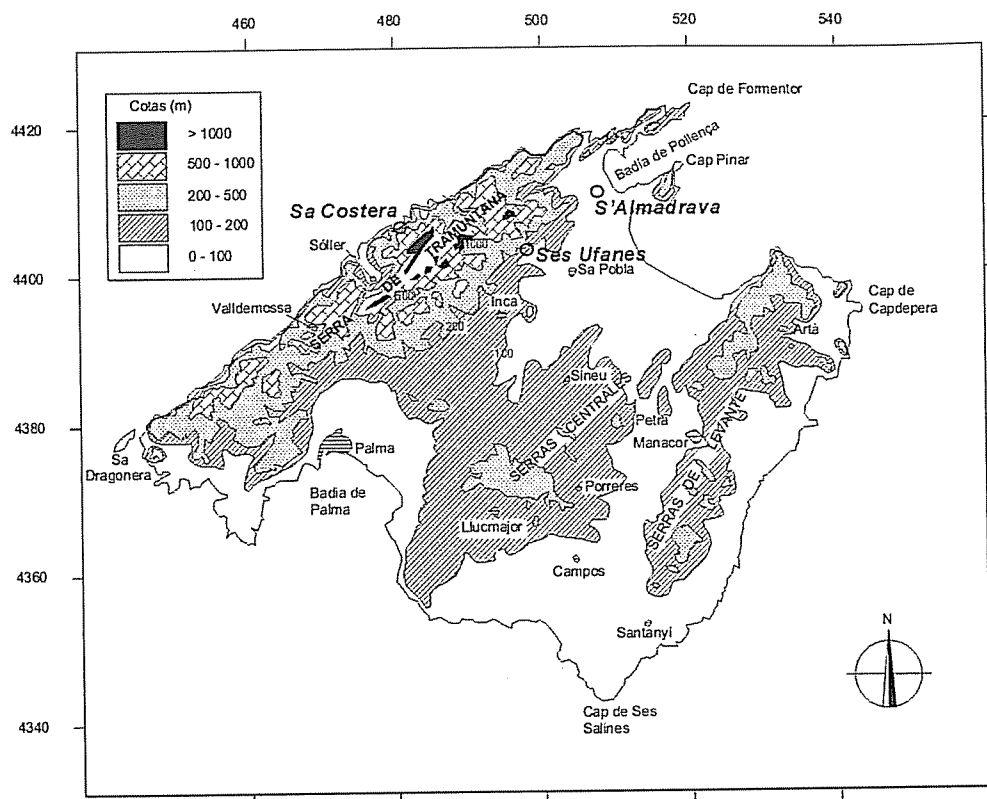
## INTRODUCCIÓN

La Isla de Mallorca, la mayor de las islas del Archipiélago Balear, ha sufrido serios problemas de abastecimiento urbano de agua debidos a la creciente demanda, en buena parte ligada al turismo. Grandes contingentes de población llegan a la isla en los meses de estío dada la consolidación de Mallorca como uno de los destinos preferentes del turismo internacional. También son importantes los volúmenes de agua consumidos por otros sectores de la actividad económica, como la agricultura, en competencia con el abastecimiento. La disponibilidad de agua potable es bastante limitada dada la casi inexistencia de caudales superficiales significativos y la explotación intensiva de los acuíferos, lo cual conlleva frecuentemente un deterioro de la calidad química de estas aguas. Mallorca tiene también problemas o riesgo de salinización marina prácticamente a lo largo de toda su costa. Esto hace

que los recursos hídricos adicionalmente disponibles en la Serra de Tramuntana adquieran importancia primordial para la economía y sociedad locales, a pesar de su dificultad de acceso.

La sierra se extiende a lo largo de todo el flanco NW de la isla (Figura 1) y está formada principalmente por rocas carbonatadas. En ella se encuentran las mayores altitudes e índices pluviométricos de Mallorca.

El comportamiento hidrogeológico de la Serra de Tramuntana resulta incierto a causa de su compleja geología, carácter abrupto y escasez de datos. Esto obliga a plantear cuestiones hidrogeológicas a partir de la utilización de modelos que permitan evaluar el sistema a partir de mediciones de lluvia y de caudal/piezometría, o sea de los datos de la entrada y de salida del sistema. También la realización del balance hídrico puede significar un importante aporte a la interpretación hidrogeológica y por ello ha sido utilizada en el presente contexto.



**Figura 1.** La Isla de Mallorca y la Serra de Tramuntana, en la que se indica la ubicación de los manantiales estudiados (marcados con un círculo). Coordenadas U.T.M. en km

Hay pocos estudios previos. El Informe del IGME (1971) es la base de muchas de las interpretaciones realizadas, incluyendo algunas de las hipótesis más importantes que se consideran en el presente artículo. El Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU, 1973) realizó un extenso trabajo sobre los recursos hídricos de Mallorca. El Servicio Hidráulico de Baleares (SHB, 1987) realizó una recopilación y actualización de la información hidrogeológica en Mallorca, añadiendo datos nuevos. Custodio *et al.* (1991; 1992) realizaron estudios hidroquímicos e isotópicos en el área de contacto de la Serra de Tramuntana con el Llano Central. Ramón *et al.* (1994) estudiaron desde el punto de vista de su variabilidad química el manantial de S'Almadrava, uno de los manantiales objeto del presente estudio, y recientemente Sanz *et al.* (2002) y Sanz (2007) han elaborado un modelo para correlacionar las variaciones de salinidad con el comportamiento del manantial. El CEDEX (1991) y la empresa YACU (1994) realizaron sendos estudios sobre los recursos hídricos disponibles en el manantial de Sa Costera, otro de los manantiales estudiados. El acuífero de Inca-Sa Pobla, colindante con el sector de

estudio, ha sido estudiado por Manzano *et al.* (2002) en cuanto a la relación entre los procesos geoquímicos y la hidrodinámica de este cuerpo hídrico, donde se realizaron otros trabajos de Tesis de Máster de la UPC. Se debe poner de relieve la labor realizada por el SHB (1987) y el MOPU (1973), cuyos resultados han servido de punto de partida de las presentes elaboraciones.

Este artículo se centra en los aspectos hidrodinámicos y de balance hídrico, y se complementa con otro (Cardoso da Silva y Custodio, 2008) que trata los aspectos hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales. Ambos trabajos se derivan de la tesis del primero de los autores (Cardoso da Silva, 1997), en la que están los desarrollos detallados. Aquí se exponen los resultados generales, conducentes a la mejora del conocimiento del funcionamiento hidráulico de las unidades hidrogeológicas que corresponden a las áreas de recarga que alimentan a los manantiales de Sa Costera, Ses Ufanes de Gabellí y S'Almadrava (Figura 1), que en este artículo se denominan como zonas de estudio. Todas ellas están localizadas en el sector noreste de la Serra de Tramuntana. En particular, se ha tratado de precisar el área que contribuye a la recarga de las citadas

zonas, que es a priori bastante incierta a causa de la compleja geología, y los mecanismos por los cuales esta recarga se traduce en descarga de dichos acuíferos. Para ello ha contribuido grandemente la cartografía geológica elaborada por Gelabert en su tesis doctoral (Gelabert, 1998) y que en buena parte se realizó en paralelo y como complemento de los trabajos que aquí se presentan.

### CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Serra de Tramuntana se caracteriza por un relieve muy accidentado, con más de 1400 m de altitud, en el que predominan los alineamientos de dirección NE-SW, paralelos a la orientación general de línea de costa (ITGE, 1991). El descenso hacia la línea de costa es muy brusco y se hace mediante laderas muy inclinadas, que pueden terminar en abruptos acantilados, interrumpidos sólo por la desembocadura de los escasos y encajados torrentes que forman las calas, y por la Badía de Sòller. Hay notables cambios anuales de temperatura y principalmente de precipitaciones, tanto en lo relativo al valor total como a su distribución. La precipitación es muy irregular espacialmente, como cabe esperar en una situación topográfica agreste e insular. De hecho, en el núcleo central de la sierra, donde están las mayores altitudes, se puede llegar a 1400 mm anuales de precipitación media y temperaturas medias anuales de menos de 12°C, mientras que en el Pla de Pollença en el extremo costero NE (véase Figura 1), los valores medios de precipitación anual pueden estar por debajo de los 600 mm y la temperatura media superar los 17°C.

El sector de estudio comprende rocas con edades que van desde el Triásico (facies Keuper) al Cuaternario, con claro predominio volumétrico y superficial de formaciones del Jurásico (Retiense y Lías). La facies Keuper, constituida por estratos alternantes de arcilla, margas, yesos y rocas volcánicas, limita inferiormente las capas acuíferas y tiene un espesor estimado de 250 m. Encima de las formaciones del Keuper están el Retiense y el Lías, que consisten en calizas, dolomías y brechas con un espesor variable entre 250 y 400 m (Gelabert, 1995). En la mayoría de los casos es difícil diferenciar entre el Retiense y el Lías. Estos conjuntos de rocas generalmente se consideran muy permeables - en particular el Retiense superior y el Lías inferior/medio - y tal observación parece confirmarse en el presente trabajo. El Mioceno está constituido por materiales margosos sintectónicos, del Burdigala-

liense (Mioceno Inferior), y en Sa Costera también por materiales removilizados del Lías, siendo en ocasiones difícil de distinguirlos de Keuper. Estos materiales margosos tienen, así mismo, gran importancia hidrogeológica en la zona de S'Almadrava. Los materiales pliocuaternarios, cuando aparecen, constituyen el relleno de pequeñas depresiones del relieve de la Serra de Tramuntana y en ellos predominan los limos rojizos con cantos y bloques de calizas y de otras rocas.

Sàbat *et al.* (1993) resaltan la gran variabilidad de espesor y representatividad de las unidades cartografiadas y la escasez de afloramientos, lo que hace la interpretación tectono-sedimentaria de la Serra de Tramuntana, un ejercicio difícil y de fiabilidad limitada para su utilización hidrogeológica. El sector de estudio presenta una estructura geológica formada por un sistema imbricado de cabalgamientos, de dirección general NE-SW, con vergencia hacia el NW. Gelabert (1995; 1998) y Gelabert y Sàbat (1994), siguiendo el modelo propuesto por Fallot, postulan una tectónica compresiva que resulta en un gran cabalgamiento, con un acortamiento de más de 10 km de la secuencia estratigráfica, que afecta a materiales desde el Triásico inferior al Mioceno medio. En las depresiones de la Serra de Tramuntana y en las llanuras cerca de la costa y del Llano Central aparecen coberturas sedimentarias posttectónicas.

El karst de la Serra de Tramuntana está dividido en dos áreas, cuya separación transversal se produce en el área de Sòller (ver la localización en la Figura 1): una septentrional, con mayores altitudes y precipitaciones, y rocas carbonáticas, donde se encuadra este estudio, y otra meridional, entre Sòller y Andraitx, en el extremo sur de la Serra. En particular el sector de la sierra aquí considerado tiene abundantes formas kársticas, como los campos de lapiaz entre Lluc y Pollença. Hay un claro predominio de las estructuras de desarrollo vertical, como las simas.

La división de la Serra de Tramuntana en distintas unidades hidrogeológicas aún sigue siendo objeto de intensa discusión. La literatura presenta unas unidades que fueron definidas en los trabajos del IGME (1971), MOPU (1973), y MOPU-SHB (1987). A partir de estos trabajos, en el sector de estudio se pueden definir las siguientes Unidades Hidrogeológicas: 1 - Unidad S'Almadrava, cuyos límites establecidos por los estudios anteriores citados se dan como buenos; 2 - Unidad Ses Ufanes, cuyos límites son todavía imprecisos; 3 - Unidad Sa Costera, con límites

definidos de forma preliminar por Cardoso da Silva *et al.* (1996).

## METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Hay gran diversidad de técnicas de investigación del karst según se deduce de los trabajos realizados en diferentes países (Bakalowicz *et al.*, 1995), en condiciones similares a las de la Serra de Tramuntana. El modo de proceder depende de las circunstancias locales hidrogeológicas, de disponibilidad de datos, de accesibilidad, y de costes y recursos económicos disponibles. Cada caso tiene su forma de estudio particular, como sucede aquí para las tres zonas consideradas.

El conocimiento del funcionamiento hidrogeológico se basa en la cartografía geológica realizada por Sàbat *et al.* (1993), Gelabert y Sàbat (1994), Gelabert (1995) y Gelabert (1998). Se han recopilado datos de trabajos espeleológicos sobre la geometría de cuevas y otras estructuras subterráneas, como simas y fracturas (Ginés, 1995; Encinas, 1994). Además, se han realizado estudios expeditivos sobre foto aérea y de campo para distinguir características geomorfológicas y para conocer la distribución de las formas kársticas de superficie.

Para el estudio piezométrico se ha partido de los datos de la Junta d'Aigües de Balears y de varios estudios (Cardoso da Silva, 1997; IGME 1971), además de datos de aforo en los principales manantiales y torrentes. En Sa Costera no se ha dispuesto de datos piezométricos pues no hay puntos de observación adecuados dado el difícil relieve y accesibilidad.

El análisis de hidrogramas se ha llevado a cabo por los métodos clásicos de estudio de la curva de agotamiento (Custodio y Llamas, 1983). La existencia de tramos de pendientes diferentes puede ser interpretado como la respuesta sucesiva de almacenes diferentes (conductos, fracturas, microfracturas y matriz porosa), además del sucesivo agotamiento de las series exponenciales que resultan de la respuesta a un evento. Los hidrogramas de nivel disponibles se prestan a este tipo de análisis, ya que algunas de las variaciones registradas constituyen la respuesta a una lluvia intensa y puntual, lo que permite analizar de forma sencilla las curvas de agotamiento (Tallasken, 1995; Padilla *et al.*, 1994; Wittenberg y Sivaplan, 1999). Se ha aplicado el método de Mangin (1975), que considera dos componentes en la curva de recesión de caudales:

$$Q_t = Q_t^S + Q_t^* \quad (1)$$

donde  $Q_t^S$  corresponde al agotamiento de caudales procedentes de la zona saturada y  $Q_t^*$  es el flujo rápido en el tiempo  $t$ , expresado como una función empírica dada por:

$$Q_t^* = Q_0^* Y \quad \text{siendo} \quad Y = [1 - (t/t_i)/(1 + \epsilon t)] \quad (2)$$

donde  $Q_0^*$  definida sólo en el intervalo de duración del agotamiento, es la diferencia entre el caudal de descarga total  $Q_0$  en el manantial en el tiempo  $t = 0$  (caudal al inicio del agotamiento) y el caudal de base;  $t_i$  es la duración del agotamiento. El coeficiente caracteriza la mayor o menor concavidad de la curva de flujo rápido y se denomina coeficiente de heterogeneidad. El valor de  $Y$  es útil para clasificar los sistemas kársticos y compararlos; varía entre 0 (para  $t = t_i$ ) y 1 (para  $t = 0$ ), independientemente del valor del pico de caudales. Por lo tanto sirve para comparar el flujo rápido de diferentes manantiales (Mangin y Pulido Bosch, 1983; Ford y Williams, 1989). Para la clasificación de acuíferos kársticos según sus características funcionales se utilizan el valor de la función  $Y$  para  $t = 2$  días; y  $k$ , el cociente entre el volumen dinámico  $V$  (por encima del nivel del manantial) y el volumen de tránsito  $V_t$  (volumen descargado en un ciclo anual medio). Para comparar los parámetros  $k$  e  $Y$  así obtenidos con la realidad de campo se ha realizado una evaluación cualitativa del grado de karstificación en el sector de estudio, con datos de la bibliografía disponible (Encinas, 1994; Ginés, 1995; Ginés y Ginés, 2002) y también con un levantamiento de las características geométricas del sistema de fracturas a través de estaciones de mediciones de fracturas y de estructuras sedimentarias.

Para conocer los parámetros hidráulicos de las formaciones se han tenido en cuenta informes anteriores del Servicio Geológico de Obras Públicas, y del MOPU (1973), que incluyen ensayos de bombeo y su interpretación (Custodio *et al.*, 1991). Unos valores se han tomado directamente de los informes existentes, otros han sido por reinterpretación, y otros interpretados por primera vez en el caso de ensayos con datos en bruto. La excepción es Sa Costera, donde no había datos de bombeo. Se ha utilizado el programa MARIAJ para interpretar ensayos de bombeo (Carbonell *et al.*, 1997).

Para calcular la recarga por la lluvia para establecer el balance hídrico se ha utilizando el programa Visual BALAN (Samper *et al.*, 1999), desarrollado primariamente para suelos granulares (sedimentarios o de regolito). En este programa la calibración se puede hacer a través de la res-

puesta freática o de la descarga en manantiales mediante una función exponencial de respuesta. Aunque las condiciones de las zonas de estudio aquí consideradas, con suelos de escaso desarrollo y a veces inexistentes, no son las ideales para aplicar el Visual BALAN, se ha llevado a cabo por haber dado resultados razonablemente satisfactorios en otras áreas similares, como en las formaciones carbonáticas del Anioia (Manzano *et al.*, 1997). Los resultados de los valores de recarga plurianual resultan coherentes con los que se derivan, además, del balance de ión cloruro entre la lluvia y las principales descargas en los manantiales (véase Cardoso da Silva, 1997 y Cardoso da Silva y Custodio, 2008), y a nivel general español en Alcalá (2006) y Alcalá y Custodio (2007).

Se han integrado los resultados obtenidos a partir de las diferentes metodologías utilizadas para lograr una visión de conjunto, permitiendo una perspectiva crítica y una descripción de los avances conseguidos en la comprensión del comportamiento hidrogeológico de los manantiales del karst nororiental de la Serra de Tramuntana de Mallorca.

## RESULTADOS

### Manantial de Sa Costera

El área de recarga del manantial de Sa Costera es de carácter casi exclusivamente kárstico. Con-

tiene campos de lapiares y de dolinas, con gran desarrollo de estructuras verticales, como simas y fracturas ensanchadas por efecto de la disolución. La geología de detalle (Gelabert, 1998) ha permitido establecer hipótesis sobre la geometría de las unidades acuíferas presentes en el entorno del manantial, pero no los límites del área de recarga, por falta de sondeos mecánicos.

La zona de estudio comprende una superficie de unos 20 km<sup>2</sup> alrededor del manantial, compuesta por rocas con edades que varían entre el Triásico (Keuper) y el Cuaternario, con claro predominio volumétrico y superficial de unidades del Retiense y del Lías. La facies Keuper se toma como el límite inferior las capas acuíferas. Los acuíferos consisten en calizas, dolomías y brechas, con un espesor variable entre 250 y 400 m. Pequeñas coberturas cuaternarias cierran la columna estratigráfica de la zona de estudio, con suelos residuales y cuerpos de coluviones de ladera, sin importancia significativa como almacenes de agua, aunque ayudan a la redistribución espacial y temporal de la recarga por la precipitación.

La zona se caracteriza por un sistema imbricado de estructuras de cabalgamiento con vergencia hacia NW. Hay niveles jerárquicos derivados de sucesivos eventos compresivos, los que forman láminas cabalgantes, siendo la lámina de Lluc (Figura 2) la que abarca la zona de estudio (Gelabert, 1998).

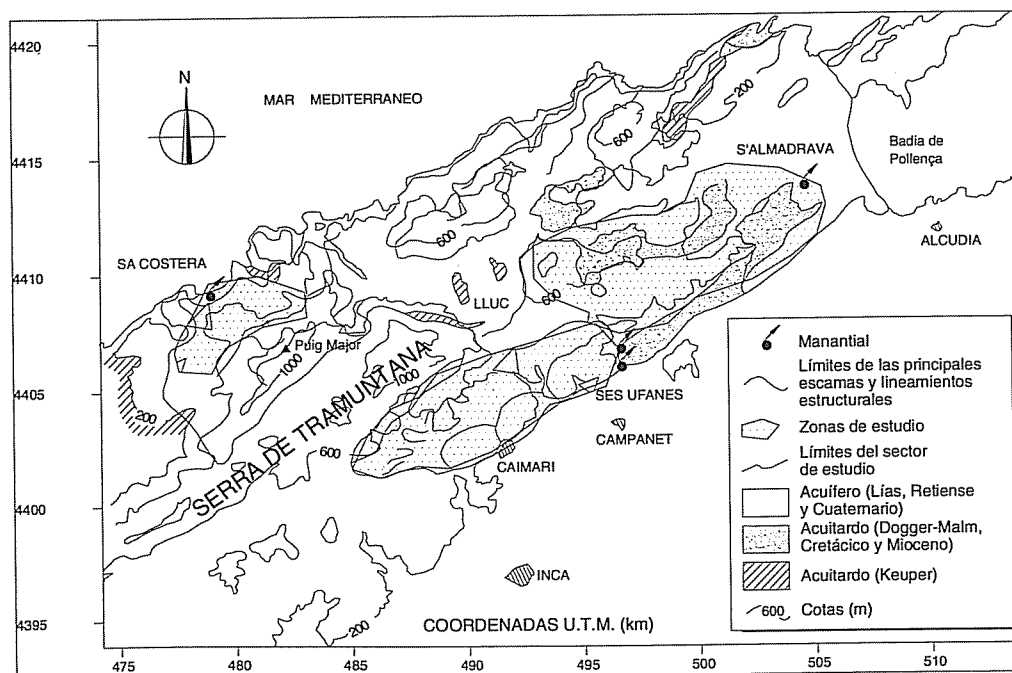


Figura 2. Serra de Tramuntana con las áreas de captación de los manantiales estudiados

La descarga media anual estimada en el manantial de Sa Costera, teniendo en cuenta la incertidumbre que se deriva de los escasos aforos y mediciones de campo disponibles, varía entre 10,4 hm<sup>3</sup>/año (CEDEX, 1991) y 8,2 hm<sup>3</sup>/año (YACU, 1994). En los estudios de Cardoso da Silva (1997) y Cardoso da Silva *et al.* (1995) se ha obtenido una descarga media de unos 9,6 hm<sup>3</sup>/año para una simulación de 25 años (1970-1994), y una cifra muy semejante para una simulación de 50 años (1945-1994). Todos los trabajos mencionados muestran una gran variación interanual de los caudales drenados por Sa Costera.

El manantial presenta un caudal de base que se mantiene durante largos periodos en la estación seca, con valores de descarga entre 20 y 50 L/s. El especial marco geológico del Sa Costera, con un acuitardo intercalado capaz de retener agua en tránsito de recarga, y el elevado porcentaje de la lluvia que se convierte en recarga profunda, en un área de alta pluviosidad, explica que el manantial principal sea de carácter perenne, en una isla prácticamente exenta de cursos de agua permanentes. Esta situación se ha modelado conceptualmente como una recarga amortiguada añadida al sistema. Además del efecto retardador de la capa de contacto entre el Keuper de la base de la escama del Puig Major con el material del Lías en los Binis, donde la disolución de niveles de yesos puede haber jugado un papel importante en la generación de permeabilidad en la base de esas capas, se tiene el retazo de acuitardo aflorante en los extremos del área de recarga, que se ha considerado en el cálculo del balance, pues recibe y transmite agua de forma diferida; funciona como un acuífero colgado con un goteo en la base hacia el acuífero inferior. También las discontinuidades de pequeña apertura en la propia caliza Liásica pueden proporcionar parte de la descarga lenta (caudal de base) en lo que sería un medio de doble porosidad.

Para calcular la recarga subterránea en la zona de Sa Costera, los valores de los parámetros del programa BALAN han sido elegidos tratando de acercarse al máximo a la situación real, aunque algunos de ellos no responden a un concepto físico bien definido. Los cálculos con el referido programa se han calibrado con los datos reales de caudal disponibles en el manantial, escogiendo de entre ellos los que tenían mejor calidad. Se deduce que la descarga del manantial es del orden de 9 a 10 hm<sup>3</sup>/año para un año medio, lo que corresponde al 85(± 10) % de la precipita-

ción (Manzano *et al.*, 1997). Cerca del 85-90 % de la descarga se drena por el manantial de Sa Costera y el resto por manantiales ocasionales muy próximos, situados a cota algo mayor, que sólo son activos durante periodos notablemente húmedos. Como se ha dicho anteriormente, los resultados del balance realizado coinciden bien con los resultados del balance de cloruros entre la lluvia y la descarga por el manantial y de la recarga amortiguada por el epikarst y depósitos superficiales, que mantienen un pequeño manantial colgado.

### Manantial de Ses Ufanes

Esta zona comprende el área de recarga de Ses Ufanes, un conjunto de surgencias intermitentes dispersas a lo largo de 1 km y situadas en el sector NE de la Serra de Tramuntana, en el contacto con el llano de Sa Pobla. Las más importantes son las de Gabellí, Biniatró y Son Monjo, que constituyen lo que se designa propiamente como Ses Ufanes. Se trata de un área de forma fusiforme, alineada según la estructura principal de la sierra. Comprende materiales de edades que varían entre el Triásico superior (Keuper) y las coberturas cuaternarias del área de Campanet (Figura 3). En superficie predominan las calizas típicas del Lías, aunque pertenecen a láminas de cabalgamiento distintas de las que se encuentran en Sa Costera.

La estructura está constituida por un conjunto de cabalgamientos imbricados con vergencia al NW, donde, según la interpretación más detallada (Gelabert, 2002), aparecen dos elementos estructurales característicos: el retrocabalgamiento que limita al SW las escamas que componen las estructuras principales en la zona, y una falla normal (falla de Biniatró). Por lo tanto, el área de recarga de Ses Ufanes ha sido deducida a partir de la geología (IGME, 1971; Gelabert, 1998; Gelabert, 2002). Tiene una superficie de 45 km<sup>2</sup>, el 95 % de los cuales son afloramientos del Retiense y Lías. El volumen real de descarga medido a partir de los datos del CEDEX (1991), que son los que calculan los mayores caudales, es de 17 hm<sup>3</sup>/año como valor medio para el periodo entre 1970 y 1991, aunque Barón *et al.* (1984) indican 12 hm<sup>3</sup>/año.

La transmisividad hidráulica se ha calculado entre 60 y 100 m<sup>2</sup>/día (MOPU, 1973). Los nuevos datos aquí aportados confirman los anteriores. En los hidrogramas del torrente que recoge la descarga de Ses Ufanes aparece una importante componente del flujo que mantiene caudales



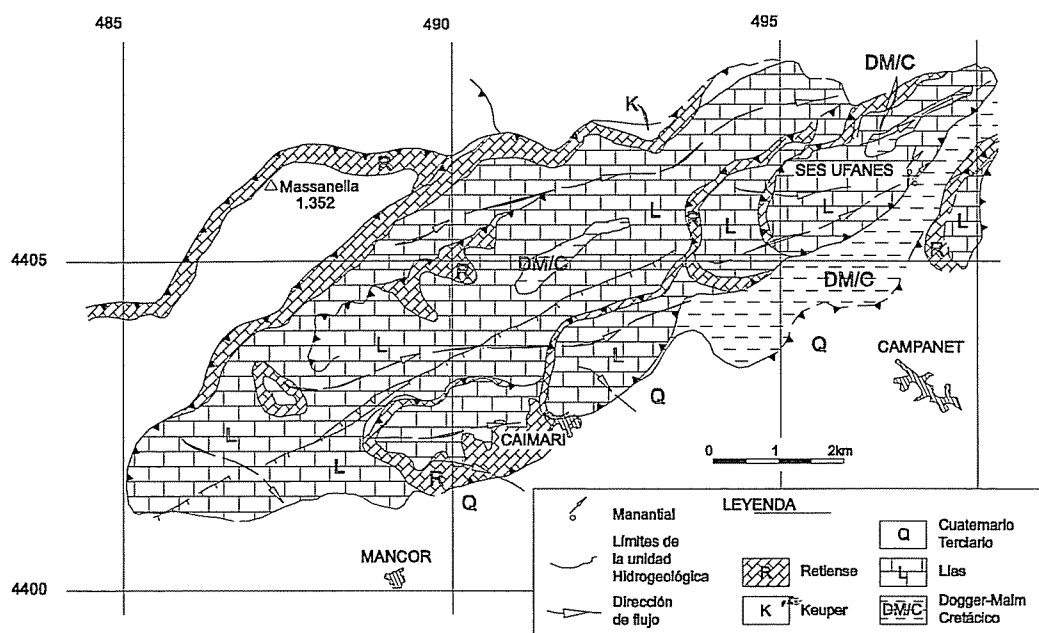


Figura 3. Hidrogeología del área de recarga de Ses Ufanes. Coordenadas U.T.M. en km

(eventualmente subterráneos) hasta pasado bastante tiempo desde que se produjo el pico del hidrograma. Éstos no constituyen una descarga representativa de todo un embalse subterráneo, sino un aliviadero cuando se sobrepasa un determinado umbral (Figura 4). Parece clara la existencia de dos almacenes distintos pero conectados, aunque con diferentes características de agotamiento. Así pues la zona de Ses Ufanes estaría alimentada preferentemente por aguas de la escama tectónica más cercana, pero también recibiría agua adicional durante el vaciado, procedente del acuífero profundo, con mayor tiempo de residencia (Custodio *et al.*, 1991). Este aporte se nota en los escalones de los limnigramas del área de descarga. La presencia de la falla de Biniatró constituye una clara barrera hidráulica que impone niveles diferenciados en los dos bloques (Figura 4B).

El área de descarga de Ses Ufanes presenta una tendencia de niveles piezométricos notablemente estables a largo plazo, como se puede observar en el conjunto de datos relativamente abundantes de las décadas de 1970 y 1980, junto con los más recientes de los limnigramas allí instalados. No hay variaciones notables, excepto las proporcionadas por las espectaculares subidas que resultan de la puesta en funcionamiento de las surgencias de Ses Ufanes.

La tasa de recarga es notablemente menor que en Sa Costera, de aproximadamente el 50 % de

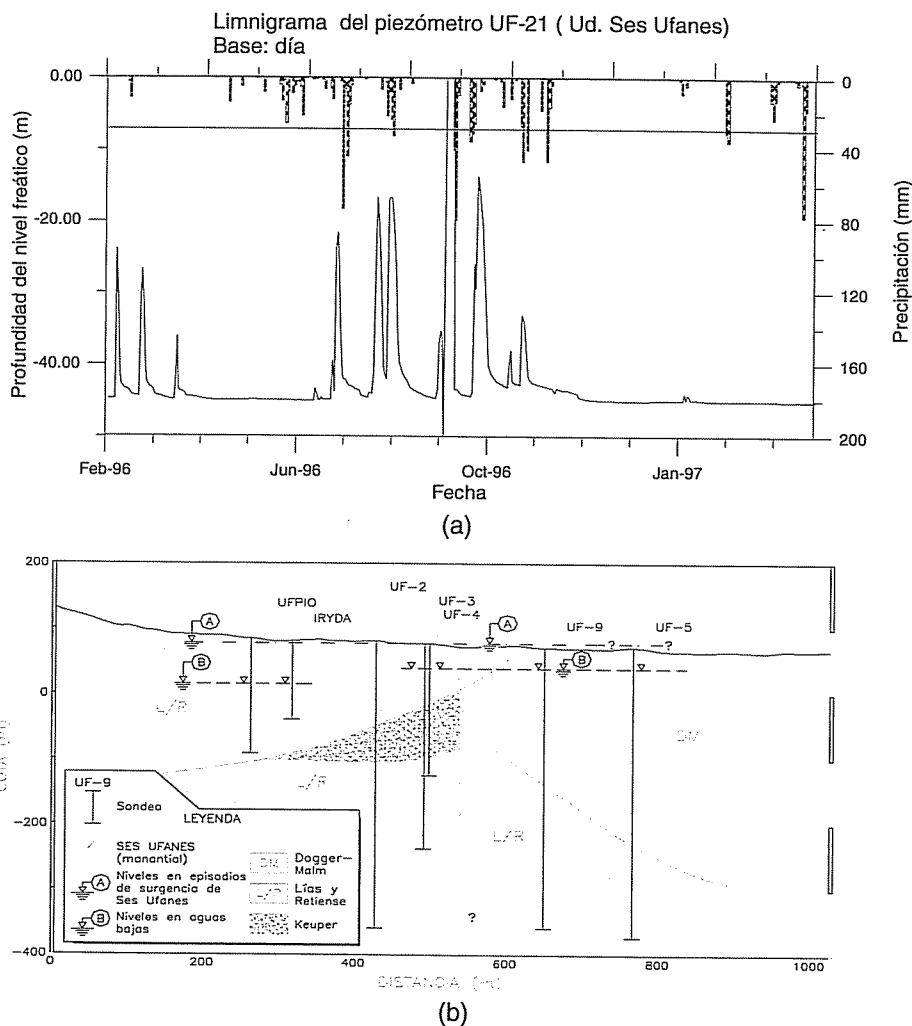
la precipitación, y la diferencia se puede justificar porque la zona está más vegetada que en Sa Costera y tiene algo más de suelo.

El caudal subterráneo circulante sería del orden de 20 hm<sup>3</sup>/año de promedio. Comparando este valor con los 17 hm<sup>3</sup>/año obtenidos por las medidas directas de la red de aforos, hay todavía unos 3 o 4 hm<sup>3</sup> de excedentes cada año que se podrían transferir subterráneamente hacia el Llano Central en el área de Inca-Sa Pobra o bien fluir hacia S'Almadrava. Sin embargo, la cuantificación de tales excedentes es muy incierta.

A la vista de lo expuesto, las principales dudas que aún persisten respecto al funcionamiento hidrogeológico del manantial de Ses Ufanes son la extensión y los volúmenes del acuífero drenado, cuyas salidas, parciales o no, estarían representadas por dicho manantial, y la existencia de posibles trasvases subterráneos de agua hacia otras unidades hidrogeológicas.

### Manantial de S'Almadrava

El área septentrional de la Serra de Tramuntana, donde se localiza la unidad hidrogeológica de S'Almadrava, está constituido por una sucesión estratigráfica que abarca desde el Triásico superior (facies Keuper) hasta el Cuaternario. Se han distinguido las siguientes unidades (Gelabert *et al.*, 1996): Triásico, con arcillas, margas, yesos y rocas de origen volcánico (Keuper) y dolomías,



**Figura 4.** (a) Limnigrama de nivel del piezómetro SUFA-21 (UF-21) con el umbral de pluviometría; (b) Localización de los piezómetros de la zona de descarga de Ses Ufanés y umbral de niveles, mostrando la Falla de Biniatró (línea discontinua vertical en el centro)

con intercalaciones margosas cada vez menores hacia el techo (Retiense); Lías, comprendiendo dolomías, calizas y brechas, con calizas estratificadas y cuarzoareniscas hacia el techo; conjunto Dogger-Malm-Cretácico, con margocalizas y margas; Mioceno inferior-medio, que es una sucesión turbidítica compuesta por margas con intercalaciones areniscosas; y Cuaternario, con arcillas y conglomerados, que alcanza los mayores espesores hacia la costa.

La estructura geológica de la zona consiste en tres láminas cabalgantes, con un nivel de despeque localizado en el Triásico superior y transporte tectónico hacia el NW. Las tres láminas cabalgantes distinguidas son, de N a S (Figura 5): la lámina del Puig Tomir, la lámina de Aixartell y la lámina de Son Vila-Es Fangar. Las dos

últimas láminas presentan internamente cabalgamientos de orden menor, también representados en la cartografía. Esta estructura imbricada de cabalgamientos favorece la compartimentación de las calizas liásicas.

En comparación con las dos zonas de estudio consideradas previamente, se dispone de una considerable cantidad de datos de niveles y series piezométricas. No obstante, la distribución espacial de los puntos de observación es muy irregular y no hay ninguno a cota elevada. La evolución piezométrica histórica ha resultado fundamental para dilucidar el comportamiento hidrodinámico de la Unidad. Tal es el caso de los piezómetros en la faja de contacto del Llano de Pollença con la Serra de Tramuntana y la de los piezómetros SUFA-21 y SUFA-23 en el área del Tomir, en los

que se aprecia una notable regularidad del nivel piezométrico de base. Los registros automáticos muestran picos de crecida que son notablemente agudos y cortos. Los limnógrafos instalados por la Junta d'Aigües de Balears en sondeos como el SUFA-21 indican que en los periodos de crecida hay ascensos del nivel del agua subterránea en cabecera del orden de 30 metros. No obstante, estas rápidas y grandes variaciones pueden ser debidas a la formación de niveles saturados temporales a menor profundidad.

Los resultados de los pocos ensayos de bombeo fiables disponibles indican valores de la

transmisividad de alrededor de 100 m<sup>2</sup>/día. MOPU (1973) y MOPU-SHB (1987) estimaron una transmisividad comprendida entre 5 y 200 m<sup>2</sup>/día, similares a los resultados aquí obtenidos, y caudales específicos de los pozos comprendidos entre 0,05 y 1,5 Ls<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. Pero estos valores parecen pequeños a la vista de los caudales a movilizar según el balance hídrico. El valor de esos parámetros debería ser mayor, del orden de 300 hasta 600 m<sup>2</sup>/día. Eso apunta hacia una posible circulación profunda, en niveles no penetrados por los pozos y sondeos.

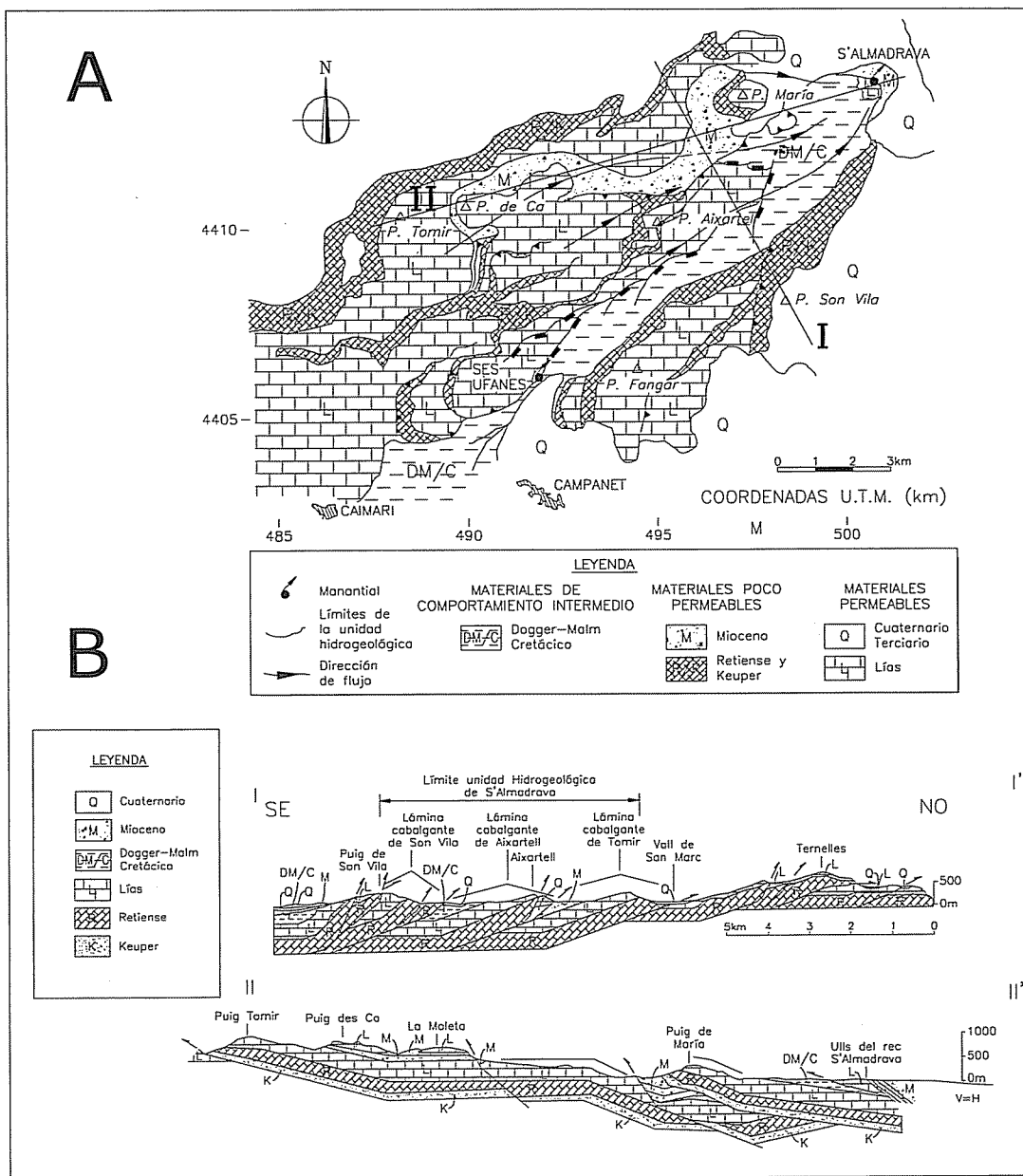


Figura 5. Zona de S'Almadrava: (A) - Mapa geológico; y (B) - Perfiles geológicos (Gelaert, 1998)

La compartimentación de las calizas liásicas se refleja claramente en el estudio piezométrico realizado. Dentro del acuífero liásico existen dos subzonas de circulación de agua independientes, coincidiendo con las escamas tectónicas cabalgantes: la subzona septentrional equivale a la escama tectónica del Tomir y la meridional a la escama tectónica de Aixartell. Además el flujo de agua se produce paralelamente hacia el NE, según la dirección de la traza de los cabalgamientos (dirección SW-NE), y con posibilidad de que converjan en S'Almadrava. En la escama tectónica de Aixartell las curvas isopiezas tienen posiciones y definen direcciones de flujo y gradientes distintos de los de la lámina del Tomir.

Aunque el destino final del flujo subterráneo septentrional no esté totalmente esclarecido, los datos piezométricos, y también los hidrogeoquímicos, indican que la subzona del Tomir descarga la parte de su caudal que no alimenta al manantial de S'Almadrava en la Cala de Sant Vicenç, situada a NW de la ciudad de Pollença (cerca de  $20 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) y al llano de Pollença, éste último con un flujo desde Pollença al área del Port de Pollença (Figura 6).

La independencia entre las subzonas meridional y septentrional se debe a la presencia de las turbiditas miocenas, las cuales presentan un espesor mínimo de 300 metros. La descarga desde una u otra subzona parece variar según se trate de época seca o época húmeda. La conexión entre la escama del Tomir y S'Almadrava queda clara a partir de los resultados del balance hídrico, y también isotópica e hidroquímicamente (Cardoso da Silva, 1997; Cardoso da Silva y Custodio, 2008), aunque la piezometría que se deduce de los datos disponibles no es suficientemente aclaratoria. Sin embargo, los datos de los limnigrafos instalados en la lámina del Tomir han sido de gran valor para corroborar las hipótesis planteadas respecto al trasvase Tomir-Aixartell hacia el manantial de S'Almadrava, y también han permitido evaluaciones en cuanto a los volúmenes de agua circulantes durante las crecidas.

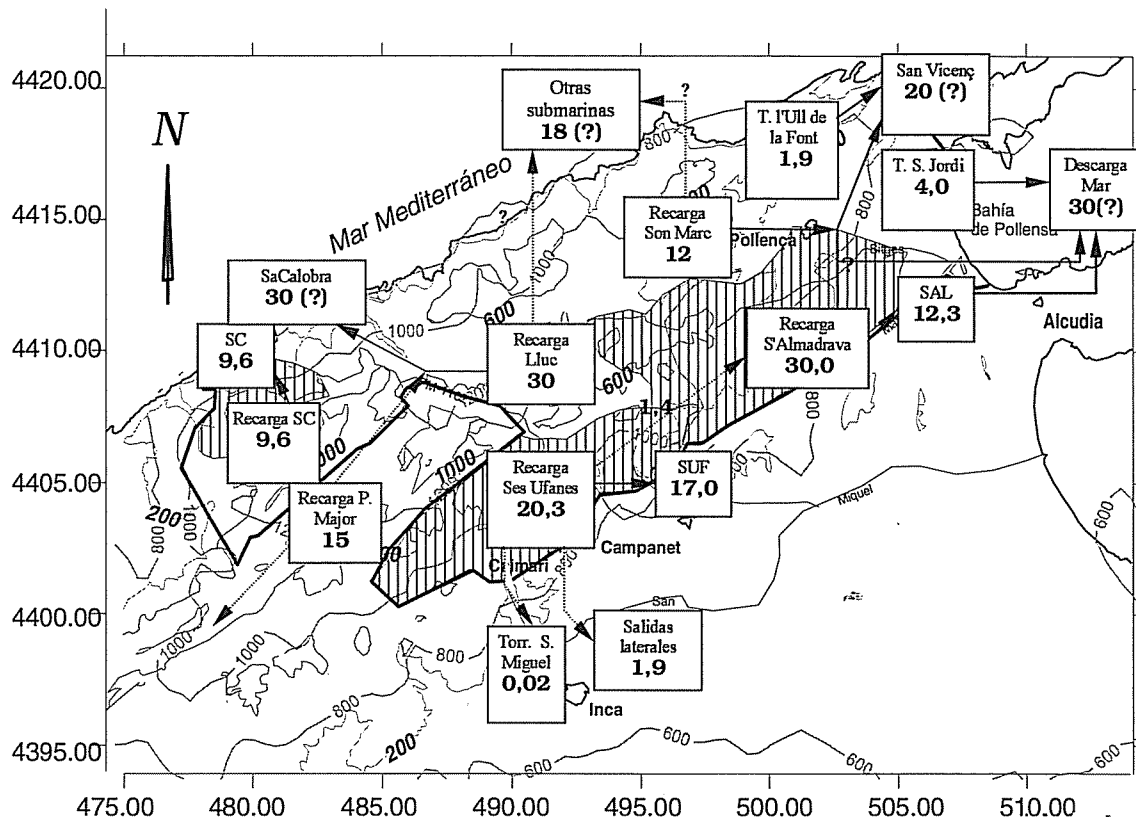
Considerando los caudales reales aforados en el Torrent de Sitges (que recoge el agua del manantial de S'Almadrava más una pequeña aportación de superficie), salvo los agudos picos de las respuestas a grandes lluvias, el caudal medio drenado por S'Almadrava desde 1975 hasta 1997 es de  $12 \text{ hm}^3/\text{año}$ , de los que  $10 \text{ hm}^3/\text{año}$  son de agua dulce y el resto de agua marina, de acuerdo con la salinidad. No hay datos de aforos entre 1985 y 1991. Los valores anuales varían entre los  $6 \text{ hm}^3/\text{año}$  del año 1992/1993 hasta los

más de  $24 \text{ hm}^3/\text{año}$  registrados puntualmente en la década de 1970. En la zona de estudio prácticamente no existe riego. Las aguas subterráneas se aprovechan por parte del Ayuntamiento de Pollença, algunos agricultores y grandes propiedades particulares (en especial el Campo de Golf de Pollença), cuyas extracciones llegan a ser significativas y se tienen en cuenta en el balance hídrico, aunque se trata de valores estimados por falta de datos directos fiables. A partir de las extracciones autorizadas en el llano de Pollença, y de estudios anteriores (MOPU-SHB, 1987), se estima un bombeo anual de  $1 \text{ hm}^3$ .

En la subzona del Tomir se observa que hay un umbral de pluviometría a partir del cual los niveles reaccionan, como se puede ver en el piezómetro SUFA-21 (Figura 4a), que comparte área con Ses Ufanes. Se estima que tal umbral corresponde a la lluvia acumulada de un mínimo de 60 mm en 10 días. Se supone que a partir de este valor, el flujo que proviene de esta lámina se dirige también hacia S'Almadrava, pues con valores inferiores no hay flujo directo hacia el manantial. De otro modo, como ya se ha dicho, la descarga se dirige hacia el llano de Pollença, de forma difusa al mar o en dirección a la Cala de Sant Vicenç (Figura 6).

En la subzona de Aixartell todo el flujo se dirige hacia el manantial de S'Almadrava. En esta subzona el Keuper y el Retiense inferior funcionan como límites inferiores de flujo. El Dogger-Malm y el Mioceno comprenden algunos niveles acuíferos, aunque en general se comportan como acuitardos. El área restante corresponde al acuífero del Lías aflorante.

La realización del balance hídrico en S'Almadrava, utilizando los mismos parámetros adoptados para Sa Costera, produce unos valores de recarga excesivos comparados con las observaciones de campo. La introducción en el modelo conceptual de un umbral de nivel piezométrico a partir del cual las aguas de la escama tectónica del Tomir drenan hacia S'Almadrava mejora notablemente al balance hídrico de aquel manantial, en comparación con los datos aforados, pero no resuelve el problema generado con los excesos que se drenan hacia la Cala de Sant Vicenç o hacia el llano de Pollença. Por ello se considera que el umbral en S'Almadrava - y en toda la sierra - además de estar relacionado con la geometría del sistema acuífero, depende de una lluvia mínima para producir recarga, la cual puede tener un valor relativamente grande. Según el modelo conceptual presentado se ha



**Figura 6.** Representación esquemática de los embalses subterráneos más importantes del sector NE de la Serra de Tramuntana, sus relaciones mutuas y los volúmenes medios de circulación subterránea (valores en  $\text{hm}^3/\text{año}$ ). SC = Sa Costera; SUF = Ses Ufanes; SAL = S'Almadrava. Las isólinas y valores en negro son cotas (en m) y las isólinas y valores en gris son las isoyetas (en mm). Las coordenadas son U.T.M

realizado un balance hídrico con el programa BALAN. En la Figura 6 se esquematiza dicho balance hídrico en la zona de S'Almadrava y se indican los volúmenes anuales implicados y las posibles variantes en cuanto a las entradas o salidas que no tienen un control fiable. La recarga a los acuíferos es de un 62 % de la precipitación, y la escorrentía superficial directa es de menos de un 5%. Sin embargo indican que en el manantial de S'Almadrava hay un cierto caudal de base permanente que no se simula con el programa BALAN y que corresponde al aporte marino (cerca de 20 % del total), y también a aguas drenadas lentamente procedentes de los acuitardos del área de captación.

### COMPORTAMIENTO DE LOS MANANTIALES

En los tres manantiales que representan las principales descargas visibles del sistema kárstico que componen la unidad hidrogeológica de la parte centro-norte de la Serra de Tramuntana

(Sa Costera, S'Almadrava y Ses Ufanes) se ha realizado un análisis de la curva de recesión de los caudales, de los que se obtienen los parámetros que caracterizan la recesión. Las funciones de flujo rápido y lento se ajustan bastante bien en el caso de Sa Costera y S'Almadrava. Para Ses Ufanes la ecuación de agotamiento exponencial del caudal explica satisfactoriamente las observaciones. De acuerdo con la clasificación de Mangin (1975) se obtienen los resultados de la Tabla 1.

El análisis de hidrogramas del presente trabajo y la aplicación del análisis correlatorio y espectral a las tres zonas de estudio (véase Cardoso da Silva, 1997), muestran que las tres áreas están aparentemente bastante karstificadas, con respuestas rápidas y pulsos de caudal de corta duración. La distribución de la lluvia juega un papel muy importante en el tipo de respuesta del acuífero, que puede llegar a ser bastante dispar para un mismo manantial. De acuerdo con dichos resultados, en Sa Costera el sistema se

Manantial	$Y$	$V(\text{hm}^3/\text{a})$	$V_t(\text{hm}^3/\text{a})$	$k$	Comentarios sobre la zona
Sa Costera	0,74	1,6	$\sim 10(*)$	0,16	compleja, grandes dimensiones, pequeño embalse asociado
Ses Ufanés	—	2,4	12(**)	0,2	hay flujo de base, flujo lateral de aguas altas por rebose
S'Almadrava	0,34	—	—	0,31	aportes diferidos del sistema kárstico

**Tabla 1.** Parámetros de funcionamiento de los tres manantiales considerados.  $V$  - Volumen dinámico (almacenamiento de agua por encima del manantial);  $V_t$  - Volumen de tránsito, en un ciclo anual.  $Y$  y  $k$  son los parámetros de clasificación de los manantiales definidos anteriormente

presenta francamente karstificado, con una posible respuesta doble, o sea, de descarga de más de un acuífero. En Ses Ufanés la situación es similar pero su estudio está perturbado a causa de las aportaciones superficiales y también por posibles errores de medida. S'Almadrava es el manantial que al parecer tiene mayor complejidad, dada la gran variación que puede presentar su respuesta al pulso de lluvia, y además se tienen grandes variaciones entre periodos distintos de análisis, lo que parece indicar que son varias las opciones de descarga por S'Almadrava, dependiendo de la localización, intensidad de la lluvia y evolución de las precipitaciones (altura de los niveles).

La geometría y conductos del karst costero de Mallorca, aunque investigados por algunos autores (Ginés y Ginés, 2002), no alcanzan todavía la zona del estudio o no tienen la resolución requerida (Rubio *et al.*, 2003), resultando difícil aclarar como se producen las descargas hacia la Cala de Sant Vicenç, Sa Costera, Pollença y otras áreas.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Una vez conocidas las áreas de recarga de los tres manantiales y sus aportaciones y características, la aplicación del balance hídrico al cálculo de la recarga de todo el sector NE de la Serra de Tramuntana ha permitido determinar los recursos esperables, que han de ser coherentes con lo que se observa en las áreas estudiadas. El volumen medio de agua correspondiente a la precipitación en todo el sector NE de la Serra de Tramuntana, obtenido mediante las isoyetas disponibles a partir de datos del Servicio Meteorológico en las estaciones pluviométricas existentes (Guijarro, 1986) es del orden de  $253 \text{ hm}^3/\text{año}$  en el periodo entre 1961 y 1984 (véase la Figura 6). La precipitación media anual en todo el sector del estudio es de cerca de 958 mm, mayor que la que se produce en Ses Ufanés y S'Almadrava, pero menor que en Sa Costera. La recarga a los

acuíferos ha sido estimada considerando el área total dentro de los límites del sector y las proporciones adecuadas de la recarga en los materiales que funcionan como acuitardo ( $32 \text{ km}^2$ ) y como acuífero ( $232 \text{ km}^2$ ).

Aunque todo indica que cuanto más elevada y más lluviosa sea el área mayores serán los valores de recarga al acuífero, por falta de más detalle y a favor de la simplicidad, y de acuerdo con la media de los valores obtenidos con el programa BALAN y el ya mencionado balance de cloruros se ha atribuido un 25 % de la precipitación como recarga sobre acuitardo, y un 40 % como recarga sobre los materiales acuíferos.

Los modelos conceptuales de funcionamiento propuestos para cada una de las zonas de estudio no se pueden generalizar sin más a toda la sierra porque cada área tiene condiciones peculiares propias, a parte del hecho de que las condiciones ambientales y su influencia sobre la recarga son muy cambiantes, variando según la altitud y la precipitación anual media. La definición de una lluvia umbral, considerada como la cantidad de lluvia de un evento a partir de la cual se puede producir recarga, es otra consideración clave, pero no se ha podido aclarar satisfactoriamente. Otro factor que afecta al balance hídrico global es la propia geometría de los conductos kársticos, embalses subterráneos y niveles piezométricos en el interior de la Serra de Tramuntana, que son prácticamente desconocidos. No obstante lo expuesto, los planteamientos y métodos empleados en el estudio dan como resultado una cuantificación razonable de los volúmenes circulantes en el sector objeto de la investigación.

Los caudales anuales medidos en el sector de estudio, sumados a los manantiales aforados de cualquier magnitud, más los datos de aforos de bombeo, no llegan a una tercera parte (31 %) del volumen recargado estimado mediante los parámetros más conservadores.

Los resultados del balance hídrico en la zona de Sa Costera apuntan a valores de la recarga

meta del orden del 80 %, aunque con un gran margen de error en la estimación. La hipótesis de funcionamiento más atrayente es que el área de captación de Sa Costera se restringe al segmento situado entre el llamado Coll de los Binis y el mar. La descarga media anual estimada en el manantial de Sa Costera es de unos 10 hm<sup>3</sup>/año.

En la zona de Ses Ufanes existe una conexión subterránea entre Ses Ufanes y S'Almadrava, aunque no se ha podido precisar con exactitud los volúmenes de transferencia de agua, que no obstante se estiman entre 1 y 2 hm<sup>3</sup>/año como promedio. También existe transferencia subterránea lateral de agua subterráneamente hacia el llano de Inca-Sa Pobra, estimada en unos 2 hm<sup>3</sup>/año, aunque con gran incertidumbre. La recarga subterránea es del orden de unos 20 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales un promedio de 17 hm<sup>3</sup>/año salen por Ses Ufanes y el resto se distribuye entre las salidas laterales hacia el llano de Inca-Sa Pobra y la transferencia a la zona de S'Almadrava. La escorrentía superficial llega a unos 2 hm<sup>3</sup>/año.

Dentro del acuífero liásico de S'Almadrava existen dos subzonas de circulación de agua independientes, coincidiendo con las láminas cabalgantes del Tomir y de Aixartell. Las transmisividades hidráulicas obtenidas mediante ensayos de bombeo en S'Almadrava, alrededor de 100 m<sup>2</sup>/día, son excesivamente pequeñas, y cabe considerar la existencia de niveles acuíferos más profundos.

En el llano de Pollença la zona de estudio tiene dos niveles acuíferos distintos, correspondiendo respectivamente al Dogger-Malm y Cretácico más el Cuaternario de Pollença (superior), y al acuífero liásico de la lámina de Aixartell.

Los volúmenes drenados por el manantial de S'Almadrava tienen un valor medio de 12 hm<sup>3</sup>/año entre 1976 y 1997. El aporte de agua marina constituye cerca de 20 % del total. El análisis de la recesión del manantial y el análisis correlatorio y espectral indican que los tres manantiales drenan aguas con un área de recarga compleja y de grandes dimensiones, pero con un volumen de embalse relativamente pequeño, muy karstificado. Se observa un pequeño efecto de memoria y un tiempo de regulación reducido, con gran desarrollo del sistema kárstico y alta complejidad (acuíferos múltiples).

La aplicación e intento de calibración del cálculo de la recarga con el programa BALAN ha producido los parámetros de la Tabla 2.

## AGRADECIMIENTOS

Los trabajos en que se basa este artículo se han financiado con recursos aportados por el proyecto europeo GRACE (Project RTD EV-SV-CT94-0471) y por IBAGUA, y se han realizado con la colaboración de la Junta d'Aigües de Balears, en convenio con el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universitat Politècnica de Catalunya y con el Centro Internacional de Hidrología Subterránea (Barcelona). El primer autor ha recibido el apoyo de una beca CAPES/UFRJ de Brasil. Personalmente se agradece el apoyo del Dr. José A. Fayas (entonces en IBAGUA) y de los licenciados Alfredo Barón y Concha González (JAB), así como del Dr. Bernardí Gelabert, con el que se ha intercambiado tanto información geológica durante la realización de su tesis doctoral, como posteriormente. Se agradece igualmente la colaboración de numerosos expertos locales y miembros del Grupo de Aguas Subterráneas del Departamento de Ingeniería del Terreno y de la oficina en Palma de Mallorca del Instituto Geológico y Minero de España. Se agradece también la colaboración de diversos estudiosos locales, y en especial la de Antoni Merino, espeleólogo con gran experiencia en el área de trabajo.

## REFERENCIAS

- Alcalá, F.J., (2006). Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1-719.
- Alcalá, F.J. y Custodio, E., (2007). Recarga por lluvia en los acuíferos costeros españoles mediante balance de ión cloruro en el suelo. Tecnología de la Intrusión de Agua del Mar en Acuíferos Costeros (TIAC'07), Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 1, 855-869.
- Bakalowicz, M., Drew, D., Orvan, J., Pulido-Bosch, A., Alaga, I., Arin, A. y Tulipano, L., (1995). The characteristics of karst groundwater systems. Karst Groundwater Protection - Report EUR 16547 EN, Bruselas, 1-446.
- Barón, A., Fayas, J.A. y González, C., (1984). Estudio hidrogeológico de un manantial kárstico intermitente: las Ufanes de Gabelí (Mallorca): posibilidades de regulación. Actas del 1er Cong. Español de Geología, Segovia, IV.

- Carbonell, J.A., Perez Paricio, A. y Carrera, J., (1997). MARIAJ-IV: programa de calibración automática de ensayos de bombeo: modelos analíticos y numéricos para medios 2-D y 3-D. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1-106 (interno).
- Cardoso da Silva, G., (1997). Comportamiento de los manantiales del karst nororiental de la Serra de Tramuntana, Mallorca. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1-376.
- Cardoso da Silva, G., Custodio, E. y Manzano, M., (1995). Recharge evaluation in the catchment area of the Sa Costera spring, Mallorca. Grace Project Report, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1-31 (interno).
- Cardoso da Silva, G., Gelabert, B., Custodio, E., Barón, A. y Manzano, M., (1996). Nuevas perspectivas sobre la hidrogeología de Sa Costera, noroeste de la Serra de Tramuntana (Mallorca): interpretación de datos químicos e isotópicos basada en estudios geológicos. Jornadas sobre Recursos Hídricos en el Karst, Vitoria. Universidad del País Vasco, 1, 217-232.
- Cardoso da Silva, G. y Custodio, E., (2008). Interpretación hidrogeoquímica e isotópica ambiental del sector noreste de la Serra de Tramuntana, Mallorca, España. Rev. Ingeniería del Agua, (en evaluación).
- CEDEX (1991). Estudio de aportaciones: fuentes de Sa Costera. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Informe Técnico, 1-163 (interno).
- Custodio, E. y Llamas, M.R., (1983) Hidrología subterránea 2 v. Ediciones Omega, Barcelona, Vol. 2, 1-2350.
- Custodio, E., Poncela, R., Badiella, P. y Bayó, A., (1991). Hidrología subterránea del sector comprendido entre Palma y Alcudia, con énfasis en la explotación de agua subterránea para el abastecimiento de Palma, Mallorca. Curso Intern. de Hidrol. Subterránea, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1-222 (interno).
- Custodio, E., Poncela, R., Badiella, P. y Bayó, A., (1992). Técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas ambientales aplicadas al estudio hidrogeológico de la Serra Nord de Mallorca. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Asoc. Esp. de Hidrología Subterránea, Madrid, XIX, 405-420.
- Encinas, J.A., (1994). 501 grutas del término municipal de Pollença (Mallorca). Ed. Punt Gràfic, Palma, 1-609.
- Ford, D.C y Williams, P.W., (1989). Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman, Londres, 1-601.
- Gelabert, B., Cardoso, G., Custodio, E., Barón, A., Manzano, M. y Juncosa, M., (1996). Nuevas perspectivas sobre la unidad hidrogeológica de S'Almadrava, Serra de Tramuntana (Mallorca). Jornadas sobre Recursos Hídricos en el Karst, Vitoria. Universidad del País Vasco, 1, 201-216.
- Gelabert, B., (1995). Estructura geològica del sector septentrional de la Serra de Tramuntana de Mallorca. Junta d'Aigües de Balears, Palma, 1-119 (+ Anexos) (interno).
- Gelabert, B., (1998). La estructura geológica de la mitad occidental de la isla de Mallorca. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Colección Memorias, 1-129 + mapa.
- Gelabert, B., (2002). Las "Fonts Ufanes" (Mallorca): funcionamiento hidráulico de una surgencia kárstica. Sedeck. Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst, 3, 46-55.
- Gelabert, B. y Sàbat, F., (1994). Estructura del sector meridional de la Serra de Tramuntana de Mallorca. Junta d'Aigües de Balears/IBAGUA, Palma, 1, 88 (+ Anexos) (interno).
- Ginés, J., (1995). L'endocarst de Mallorca: els mecanismes espeleogenètics. ENDINS-Federació Balear d'Espeleologia, 20, 71-86.
- Ginés, A.; Ginés, J. (2002) Estado actual del conocimiento científico del karst y de las cuevas de las Islas Baleares. Sedeck - Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst 3:26-45
- Guijarro, J., (1986). Contribución a la bioclimatología de Baleares. Tesis doctoral, Universidad de las Islas Baleares, Palma, 1-285 (+ Anexos).
- IGME (1971). Estudio de los recursos hidráulicos totales de Mallorca: estudio hidrogeológico de la zona meridional de la Serra de Tramuntana entre Alaró y Pollensa. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 1-69 (interno).



- ITGE (1991). Texto explicativo del Mapa geológico de España - esc. 1:50.000, hoja 670. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 1-68.
- Mangin, A. y Pulido-Bosch, A., (1983). Aplicación de los análisis correlatorio y espectral al estudio de los acuíferos kársticos. *Tecniterrae*, Madrid, 51, 53-65.
- Mangin, A., (1975). Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifers karstiques. *Ann. Spéléol.* 29, 3, 283-332; 29, 4, 495-601; 30, 1, 21-124.
- Manzano, M., Cardoso da Silva, G., Tore, C. y Custodio, E., (1997). Aplicación del programa BALAN a la determinación de la recarga en Anoia (Barcelona) y en la Serra de Tramuntana (Mallorca). La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. *Asoc. Intern. Hidrogeólogos-Grupo Español / Instituto Tecnológico Geominero de España*, Madrid, 357-366.
- Manzano, M., Custodio, E., Riera, X., González, C., Barón, A. y Delgado, F., (2002). Saline groundwater in the Inca-Sa Pobla aquifer, SE of Mallorca Island (Balearic Islands, Spain) 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, 250-261.
- MOPU (1973). Informe de recopilación y síntesis. Estudio de los recursos hidráulicos totales de la isla de Mallorca. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid, Memoria-Informe, Tomo 1: Memoria. Tomo 2: Anejos.
- MOPU-SHB (1987). Plan Hidrológico de las Islas Baleares. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo - Serveis Hidràulics de Balears. Informe. no. 6, Serres de Tramuntana y Llevant, Palma de Mallorca, 1-83 + 8 planos (interno).
- Padilla, A., Pulido-Bosch, A. y Mangin, A., (1994) Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst springs. *Groundwater*, 32(2), 267-277.
- Ramón, G., Barón, A., Fernández, M.I., Massanet, M.F., Tur, M., Vicens, M. y Vidal, A., (1994). *Fonts de l'Almadrava (Pollença)*, an unusual spring site on the island of Mallorca. *Verh. Internat. Verein. Limnol*, 25, 1452-1454.
- Rubio, R.F., Úbeda, J.C.B., Fernandez, D.L. y Serrano, J.V., (2003). Acuíferos kársticos costeros: introducción a su conocimiento. *Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros (TIAC03)*, IGME, Madrid.
- Sàbat, F., Gelabert, B. y Benedicto, A., (1993). Estructura del sector central de la Serra de Tramuntana y el Llano adyacente de Inca. *Curso Intern. Hidrol. Subterránea/ Junta d'Aigües de Balears, Barcelona/Palma*, 1-188 (interno).
- Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J. y García Vera, M.A. (1999). Manual del usuario del programa VISUAL BALAN V.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. *Publ. Técnica ENRESA*, 5/99, Madrid, 1-205
- Sanz, E., (2007). Brackish springs in coastal aquifers and the role of calcite dissolution by mixing waters. Tesis doctoral, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1-138.
- Sanz, E., Custodio, E., Carrera, J., Ayora, C., Barón, A. y González, C., (2002). Modeling coastal salty springs: first approach in carbonate media (S'Almadrava, Mallorca, Spain). 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, NL, An., 195-203.
- SHB (1987). Hidrogeología de la Isla de Mallorca. Servicio Hidráulico de Baleares, Palma de Mallorca, 1-83 + 12 planos (interno).
- Tallasken, L.M., (1995). A review of base flow recession analysis. *J. Hydrol.*, 165, 349-370.
- Wittenberg, H. y Sivapalan, M., (1999). Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *J. Hydrol.*, 219, 20-33.
- YACU (1994). Manantial de Sa Costera: cálculo de aportaciones por simulación. *Junta d'Aigües de Balears, Palma*, Informe Técnico, 1-25 (interno).