

El karst en los mármoles alpujárrides de las sierras Blanca y Mijas (provincia de Málaga)

Bartolomé Andreo ⁽¹⁾, Francisco Carrasco ⁽¹⁾, Jesús Cuenca ⁽²⁾, Alejandro Téllez ⁽³⁾ e Iñaki Vadillo ⁽¹⁾

RESUMEN

En este trabajo se analiza brevemente el karst de Blanca-Mijas desde varios puntos de vista: geomorfológico, espeleológico e hidrogeológico (hidrodinámico e hidroquímico). Los datos disponibles ponen de manifiesto que, en general, no existe una gran karstificación de los mármoles que constituyen las sierras estudiadas. Ahora bien, hay un sector -la parte occidental de Sierra Blanca- donde se constata un mayor desarrollo de la karstificación debido, fundamentalmente, a la naturaleza caliza de los mármoles que afloran en este sector. Por criterios de geología regional se estima que la karstificación que afecta a estos macizos debió ser eficaz a partir del Plioceno. En la actualidad, la tasa de ablación kárstica es del orden de 25 m³/km²/año.

Palabras clave: Kartificación, Geomorfología, Espeleología, Hidrogeología, Ablación kárstica.

ABSTRACT

In this work, the karst of Blanca Mijas mountains is briefly analysed from various approaches: geomorphologic, speleologic and hydrogeologic (hydrodynamic, and hydrochemical). The available data indicate that, in general, there is no large karstification of the marbles which constitute the studied sierras. However, there is a sector -the western Sierra Blanca-, where a large development of the karstification exists, fundamentally due to the calcareous composition of the marbles in this sector. From the geological regional point of view it is estimated that the karstification which affects these massifs must be effective from the Pliocene. Actually, the rate of karstic dissolution is approximately 25 m³/km²/year.

Key words: Karstification, Geomorphology, Speleology, Hydrogeology, Karstic dissolution.

INTRODUCCIÓN

Las sierras Blanca y Mijas constituyen dos macizos de mármoles, situados al oeste de Málaga, en la cadena montañosa de la Costa del Sol. Se trata de dos escarpados relieves, separados entre sí por el Puerto de los Pescadores, en los que se alcanzan cotas superiores a 1.000 m, en apenas 5-10 km de distancia al mar (Fig. 1).

En relación con la geología en general y con la hidrogeología en particular, varios son los antecedentes que merecen ser citados por su importancia. Los primeros trabajos de geología, con marcado carácter regional, fueron obra de Michel Levy y Bergeron (1890), Orueta (1917), Blumenthal (1949), Mollat (1968), Biot (1971) y Salobreña (1977), y en ellos se dieron a conocer los primeros datos sobre la estructura, estratigrafía y petrografía de estas sierras. De hecho, algunas de sus observaciones fueron tenidas en cuenta por los geólogos que realizaron las correspondientes hojas del Mapa Geológico Nacional, a escala 1:50.000, editadas por el IGME (1978). Posteriormente, otros autores han tratado de precisar la

posición tectónica y la estratigrafía de las Sierras Blanca y Mijas: Tubía (1985), Martín Algarra (1987), Andreo y Sanz de Galdeano (1994) y Sanz de Galdeano y Andreo (1995).

Aspectos relacionados con el modelado kárstico quedaron esbozados por Lhénaff (1981), Rodríguez Vidal (1982), y la Sociedad Espeleológica Marbellí (1985) que recogió en una guía las principales características topográficas de los abrigos y cuevas inventariadas hasta ese momento. Por su parte Durán *et al.* (1988 a y b), realizaron dataciones sobre los travertinos de Mijas, Benalmádena y Torremolinos, cuyo depósito lo relacionaron con los manantiales que existieron en la región durante épocas de clima cálido.

En cuanto a la hidrogeología, cabe señalar, por su relevancia, las investigaciones llevadas a cabo por Dupuy de Lôme (1923) y posteriormente por algunos organismos públicos, cuyos resultados han quedado plasmados en varios informes (IGME, 1983, 1985 y SGOP, 1992). Los trabajos más recientes han sido llevados a cabo por el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (Andreo y Carrasco 1991 a y b; Carrasco y Andreo, 1994; Andreo *et al.*, 1996a; 1997 y Andreo, 1997).

En el presente trabajo de síntesis se pretende dar a conocer algunos avances obtenidos en materia de geo-

⁽¹⁾ Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. 29071 Málaga.

⁽²⁾ Sociedad Espeleológica MAINAKE. Fuengirola (Málaga).

⁽³⁾ Sección Espeleológica Marbellí. Apartado de correos 142. Marbella (Málaga).

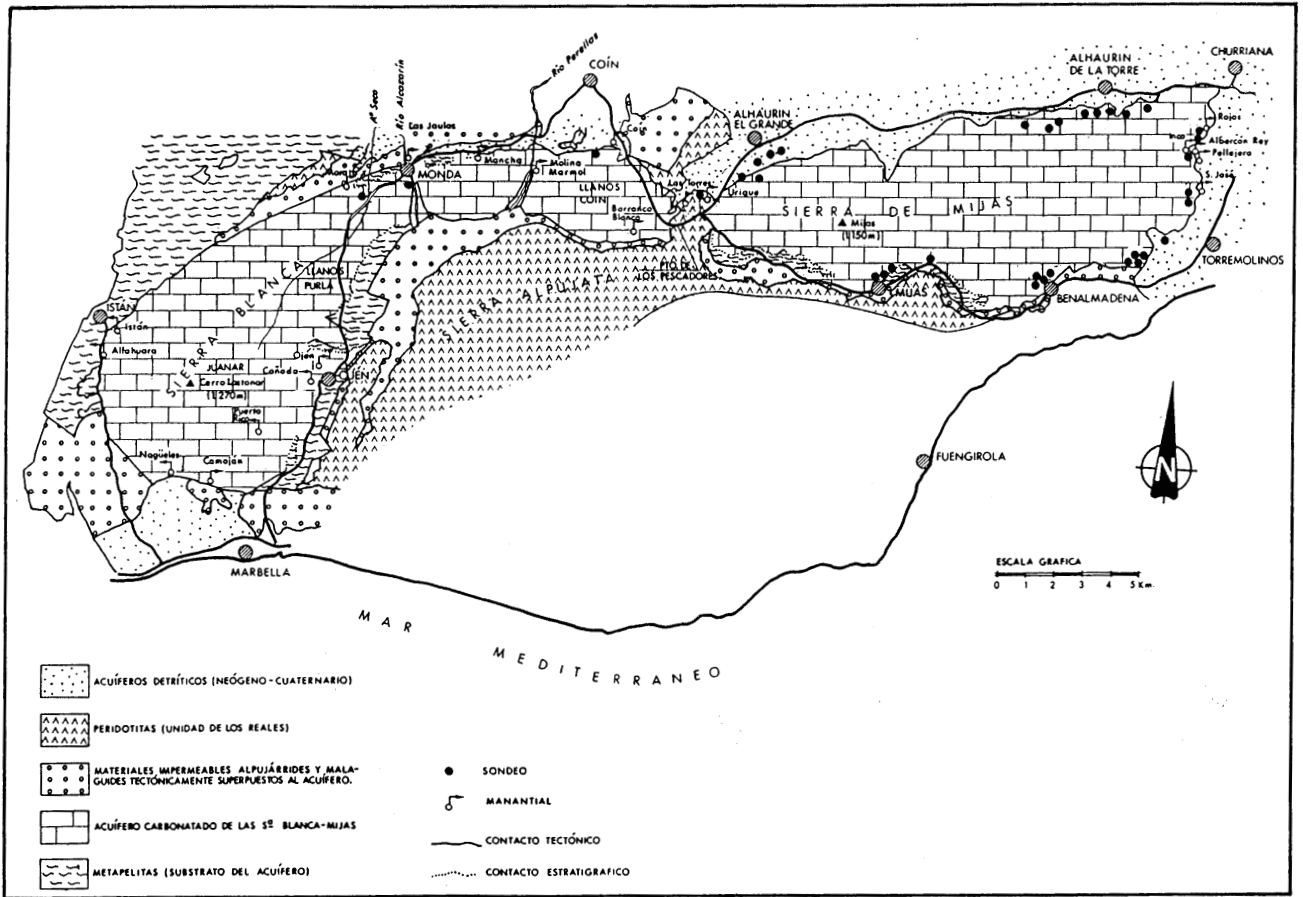


Fig. 1.- Esquema geológico-hidrogeológico de las Sierras Blanca y Mijas.

morfología, espeleología e hidrogeología de estas dos sierras.

GEOLOGÍA

Las sierras Blanca y Mijas forman parte de la Unidad de Blanca, definida por Mollat (1968). Es una unidad tectónica perteneciente al Complejo Alpujarride de las Zonas Internas de la Cordillera Bética, caracterizada por el metamorfismo de alto grado que afecta a sus materiales. Concretamente se incluye dentro del Alpujarride Intermedio de Martín-Algarra (1987) y equivale a la Unidad de Almirajara de Sanz de Galdeano (1986, 1997), situada más al este.

Estratigrafía

La Unidad de Blanca está constituida por dos conjuntos litológicos principales (Fig. 1): uno inferior, de metapelitas, atribuido al Paleozoico y otro superior, carbonatado, de edad Trías Medio-Superior (Foto 1). Criterios de geología de campo indican que, original-

mente, los mármoles se depositaron sobre las metapelitas, mucho antes de ser afectados por el metamorfismo y las deformaciones. Esta posición original quedó modificada por la inversión de la serie estratigráfica en todo el flanco meridional de la Sierra de Mijas y en el oriental de Sierra Blanca (Salobreña, 1977; Martín-Algarra, 1987; Andreo y Sanz de Galdeano, 1994; Sanz de Galdeano y Andreo, 1995).

El conjunto metapelítico, que presenta una potencia total superior a los 300 m, está formado, en la parte inferior, por los gneises de Istán y las migmatitas aflorantes al norte y sur del macizo. Sobre los gneises aparecen esquistos y un tramo de cuarcitas que puede utilizarse como nivel guía.

Estratigráficamente por encima de las metapelitas, hay un paquete de mármoles dolomíticos, a veces sacaroideos y de color blanco, con un espesor del orden de 300 metros, ampliamente representados en Sierra Mijas, en el sector oriental de Sierra Blanca, y en todo el borde este del sector occidental de esta Sierra. En el área del Juanar (Sierra Blanca) afloran muy replegados a favor de apretadas estructuras anticlinales, en cuyo núcleo apare-



Foto 1.- Panorámica del borde oriental de Sierra Mijas, donde se puede observar, en primer plano y abajo, los mármoles blancos diaclasados del Triás Medio y, en la parte alta, los mármoles azules del Triás superior. El relieve es relativamente escarpado y la vegetación escasa; las bandas en las que más prolifera ésta son las intercalaciones metapelíticas de la serie estratigráfica.

cen, muy tectonizadas, las metapelitas de la base (Tubía, 1985 y Sanz de Galdeano y Andreo, 1995).

Los mármoles dolomíticos blancos pasan, hacia arriba en la serie, a un conjunto de mármoles azules, calizos, que afloran extensamente en el sector occidental de Sierra Blanca y en la parte nororiental de Sierra Mijas. En los dos tramos carbonatados, particularmente en los mármoles azules superiores, suelen aparecer intercalaciones metapelíticas (Foto 1), de espesor variable entre varios centímetros y una decena de metros. La potencia máxima que puede observarse de este último conjunto de mármoles es del orden de los 300 m.

Sobre los materiales ya estructurados de la Unidad de Blanca se depositaron, discordantes, materiales neógeno-cuaternarios (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1991). Así, en el borde norte de Sierra Mijas (borde sur de la cuenca del Guadalhorce), se depositaron calcarenitas, como consecuencia de la erosión de los mármoles de dicha sierra durante el Tortoniense superior. Pero fue durante el Plioceno, cuando tuvo lugar un importante depósito de calcarenitas y conglomerados de cantos marmóreos en los bordes norte y este de Sierra Mijas. A partir del Pleistoceno se depositaron las brechas y conglomerados cementados y los travertinos que jalonan los bordes de estas sierras (Durán *et al.*, 1988 a y b; Durán, 1996).

Por tanto los mármoles de la Unidad de Blanca estaban ya en condiciones de ser karstificados, al menos de forma incipiente, a partir del Tortoniense superior, si bien la karstificación más activa se ha producido, probablemente, a partir del Plioceno. En este sentido cabe señalar que en toda la Costa del Sol existen evidencias de una importante fase de karstificación pliocena desarrollada sobre mármoles alpujárrides, calizas maláguides e

incluso sobre las propias calcarenitas del Plioceno (Lhénaff, 1966; Durán y Soria, 1989; Durán, 1996).

Estructura geológica

La estructura geológica de la Unidad de Blanca es compleja debido a las condiciones de alta temperatura y alta presión soportadas por los materiales durante la deformación.

La estructura de Sierra Mijas está formada por pliegues de tipo isoclinal, con un flanco invertido, cuya dirección es generalmente ESE-ONO, excepto en el borde occidental donde son curvos adaptándose a la terminación de la sierra. Los pliegues ESE-ONO vergen al norte salvo en la parte norte del sector centro-occidental donde lo hacen al sur y los pliegues curvos de la terminación occidental que vergen siempre hacia el este (Andreo y Sanz de Galdeano, 1994).

La estructura de Sierra Blanca está constituida igualmente por pliegues isoclinales cuya dirección es aproximadamente E-O en el sector oriental, mientras que en el occidental hay una interferencia de pliegues N-S y E-O que dan lugar a una estructura en “caja de huevos” (sistema de domos y cubetas). En todos los casos la vergencia de los pliegues es hacia el interior de la Sierra (Sanz de Galdeano y Andreo, 1995).

La continuidad entre Sierra Blanca y Sierra de Mijas está truncada, al menos en superficie, por el emplazamiento de las peridotitas que afloran en el Puerto de los Pescadores, prolongación del afloramiento de Sierra Alpujata.

En relación con una etapa de deformación frágil y más reciente se han formado las fallas que limitan la Unidad de Blanca. La falla que jalona todo el borde norte de la Unidad es fundamentalmente de desgarre dextrorso aunque presenta un importante salto en la vertical de más de 500 m, según Sanz de Galdeano y López-Garrido (1991). El sector occidental de Sierra Blanca está limitado al oeste por una falla normal cuyo plano buza más de 50° hacia el oeste y, al sur, por otra falla normal con un plano que buza 70-80° hacia el sur.

Todo el cortejo de fallas que limitan la Unidad de Blanca han provocado el levantamiento relativo de los relieves carbonatados y un descenso del nivel de base a lo largo del Neógeno-Cuaternario acompañado de un encajamiento de la red de drenaje, influyendo notablemente en la karstificación del macizo. Así, a igualdad de otros factores que se comentarán más adelante, la karstificación progresará más cuanto mayor sea el levantamiento, pero las formas resultantes tenderán a ser más bien verticales (simas) y de pequeño tamaño. En la karstificación del macizo, también ha influido la fracturación

que presenta tres direcciones preferenciales N10-30E, N60-90E y N140-160E (Andreo *et al.*, 1997).

GEOMORFOLOGÍA

De todos los parámetros que pueden utilizarse para caracterizar el área se analizan, fundamentalmente, el relieve y la red de drenaje, para tratar de evaluar la influencia de ambos en la karstificación y en la hidrogeología de estos macizos. Conviene tener presente que el área de estudio no es una única cuenca hidrográfica, sino la cabecera de muchas pequeñas cuencas correspondientes a los numerosos arroyos que surcan los mármoles de las sierras Blanca y Mijas. Por esta razón el significado original de algunos parámetros puede quedar desvirtuado y en algún caso no podrán calcularse, especialmente aquellos que tienen en cuenta las longitudes de cauces principales ya que sólo se consideran longitudes parciales de los mismos.

Características geométricas y de relieve

Directamente sobre el mapa a escala 1:50.000, se han medido las superficies de Sierra Blanca (113 km²) y de Mijas (79 km²) y sus correspondientes perímetros estilizados (59 y 47 km, respectivamente).

La forma del relieve queda reflejada en el mapa de la figura 2, confeccionado a partir del Mapa Topográfico Nacional 1:50.000, considerando sólo las curvas de nivel múltiplos de 100 m. En él puede observarse que las máximas alturas se registran en los sectores occidentales de las dos sierras: Vértice Mijas (1.150 m) y Cerro del Lastonar (1.270 m). En Sierra Blanca, existe un claro condicionante litológico, pues en los mármoles blancos dolomíticos, generalmente sacaroideos y por tanto más deleznable, es donde se encuentran las menores altitu-

des, sobre todo en el sector oriental, donde se originan los denominados "llanos" de Juanar, Purla y Coín. Estos llanos, no llegan a constituir zonas propiamente endorreicas, pero en ellas tiene lugar una disminución de la escorrentía y un aumento importante en la infiltración. Sin embargo, en el sector occidental de Sierra Mijas las mayores altitudes se dan en los mármoles blancos dolomíticos debido, probablemente, a que los ejes de los pliegues ONO-ESE están inclinados unos 10° hacia el este y, además, puede existir otro condicionante tectónico derivado de la actuación de la falla de Mijas, que pasa al este de dicha localidad y atraviesa la sierra con dirección NNO-SSE.

La amplitud del relieve, diferencia entre la cota más alta y la más baja del mapa de distribución de altitudes, es de 1.050 m en Sierra Mijas y de 1.115 m en Sierra Blanca.

El histograma de frecuencias de altitudes de Sierra Mijas indica que las altitudes más frecuentes quedan comprendidas entre 400 y 500 m, mientras que en Sierra Blanca están entre los 300 y 400 m (Fig. 3), pese a que en esta última es donde se encuentran las mayores cotas del área de estudio.

La curva hipsométrica permite calcular la altura media de las sierras, cuyo valor es de 485 m para la de Mijas y 580 m en Blanca. La elevada pendiente de esta curva (Fig. 3), en ambos casos en la zona de cotas bajas, pone de manifiesto el gran encajamiento de los valles consecuencia del levantamiento tectónico de la región.

Análisis de la red de drenaje

Directamente sobre el mapa de la red de drenaje de ambas sierras (Fig. 4), se advierte que hay un mayor desarrollo de ésta en Sierra Mijas que en Sierra Blanca.

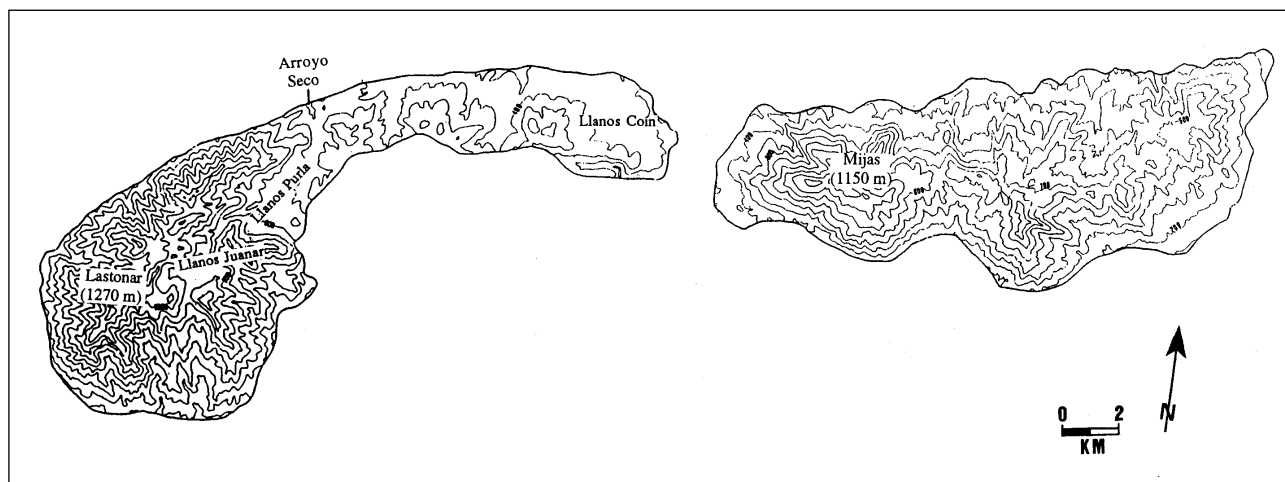


Fig. 2.- Mapa de distribución de altitudes elaborado a partir del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000, considerando las curvas de nivel múltiplos de 100.

Esto mismo es corroborado por el mapa de densidad de drenaje (Fig. 5), según el cual en la Sierra de Mijas se alcanzan hasta 8 cauces de orden 1 por área considerada, mientras que en Sierra Blanca se llega a un máximo de 6 cauces de primer orden para la misma área (0,16 km²). Por tanto, en conjunto, la red de drenaje superficial está algo más desarrollada en Sierra Mijas que en Sierra Blanca.

El sector oriental de Sierra Blanca, constituido en su mayor parte por mármoles blancos dolomíticos, se drena fundamentalmente por los arroyos Casarín y Pereilas, que nacen en Sierra Alpujata (Fig. 4) y por el arroyo Seco, cauce de orden 5, con una pendiente media del 6,5%, que nace en los llanos de Juanar y atraviesa los llanos de Purla. Sin embargo, en el sector occidental de esta sierra hay un mayor desarrollo de cauces excavados sobre los mármoles calizos que, generalmente, son de bajo orden y con fuertes pendientes (superiores al 20%).

En Sierra Mijas, la mayor densidad de drenaje se produce en su sector oriental (Fig. 5), precisamente donde las pendientes son menores pero la cubierta vegetal es escasa (Foto 1). En este sector, a diferencia de la parte occidental de Sierra Blanca, se alcanza un mayor orden en los cauces que salen de la sierra y un mayor número de cauces de orden 1 por área considerada (Fig. 4).

En ambas sierras se detecta, con frecuencia, el papel de la tectónica que ha dado lugar a la formación de ángulos casi rectos en la confluencia entre cauces, como ocurre en Arroyo Seco, en Sierra Blanca. En Sierra Mijas se observa que los arroyos Pedregal e Higuera (Fig. 4), situados en su vertiente meridional tienen perfecta continuidad en la vertiente norte, con los arroyos Blanquillos y Zambrano, respectivamente, debido a la existencia de fracturas NNO-SSE (Andreo, 1997).

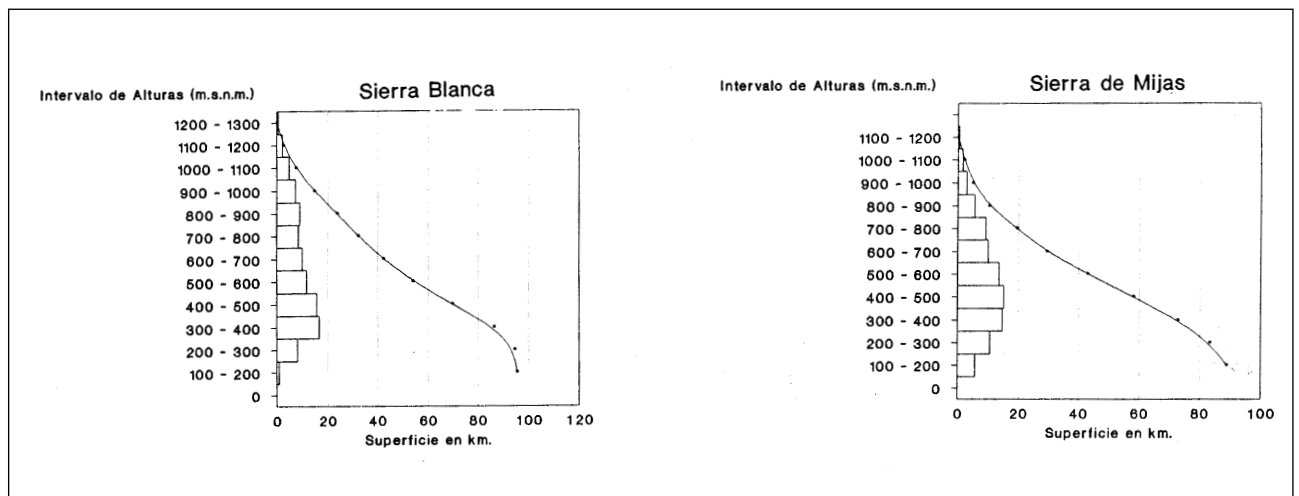


Fig. 3.- Histogramas de frecuencias altimétricas y curvas hipsométricas.

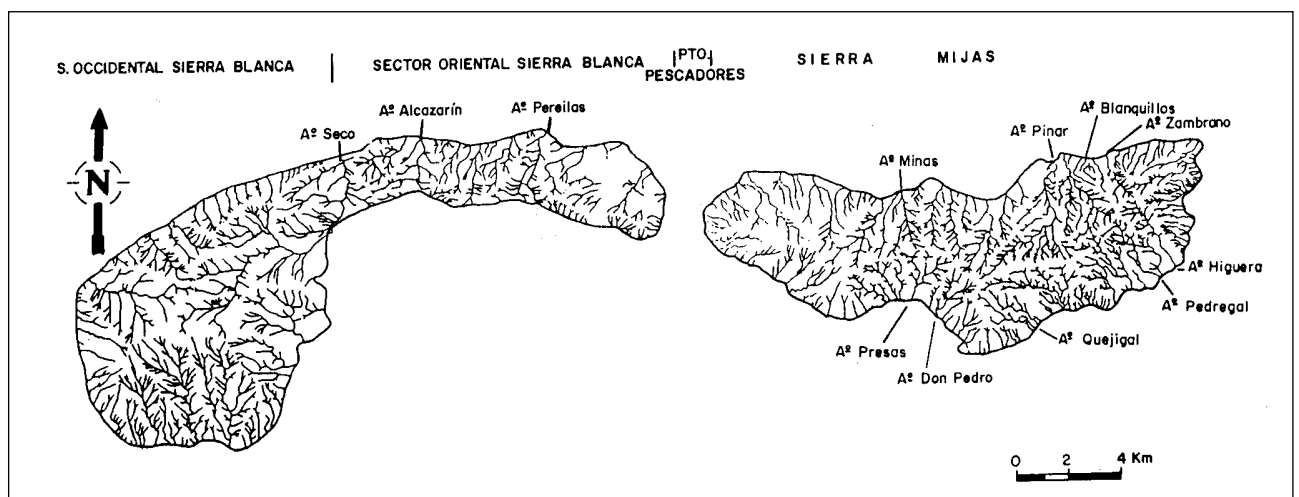


Fig. 4.- Mapa de la red de drenaje.

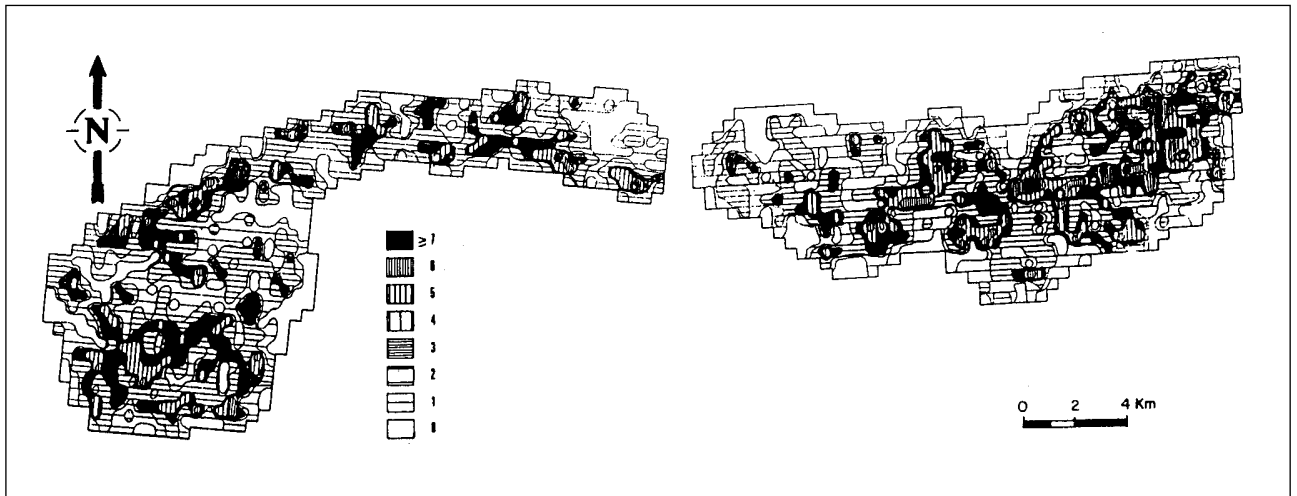


Fig. 5.- Mapa de la densidad de drenaje.

Espeleología

Las sierras de Blanca y Mijas constituyen las áreas de trabajo de dos grupos espeleológicos de la región: el de Marbella (Sierra Blanca) y el de Fuengirola (Sierra Mijas). De los trabajos realizados por dichos grupos se deduce que, en general, no existe un gran desarrollo espeleológico en estas sierras, sino que hay cavidades relativamente pequeñas pues, a excepción de la Cueva de Nagüeles (borde Sur de Sierra Blanca) que presenta unos 1.000 m de recorrido, todas tienen una distancia total menor de 100 m y, en conjunto, son más abundantes en Sierra Blanca que en la de Mijas (Figs. 6 y 7). Las cavidades se encuentran principalmente en los mármoles que constituyen estas sierras y, en menor medida, en los piedemontes cuaternarios formados por brechas cementadas ("brechas mortadela" de Lhénaff, 1981), y en los travertinos (por ejemplo, los de Puerto Rico), materiales éstos que son susceptibles de ser karstificados.

En Sierra Mijas se han inventariado un total de 21 cavidades, de las cuales 10 están en las brechas cementa-



Foto 2.- Vista del manantial de Istán, en el borde occidental de Sierra Blanca.

das cuaternarias, mientras que en la de Blanca hay 35, todas en mármoles excepto el complejo de abrigos existente en los travertinos de Puerto Rico que se ha contabilizado como una. En este trabajo se dedica mayor atención a las cavidades desarrolladas en los mármoles y en lo que sigue únicamente se hace referencia a ellas.

Las cavidades de Sierra Blanca, situadas todas en mármoles azules calizos, ponen de manifiesto una cierta jerarquización del drenaje subterráneo y, en definitiva, un cierto grado de karstificación. Así, en las cotas más altas (entre 800 y 1.000 m) predominan las cavidades de desarrollo vertical (simas), que alcanzan profundidades de hasta 80 m. Entre las cotas de 500 y 800 m las cavidades son de desarrollo mixto vertical-horizontal. Y entre 200 y 500 m es donde se originan las cavidades más grandes, subhorizontales, a menudo asociadas a surgencias próximas (Fig. 6).

Ahora bien, no debe existir un elevado grado de conexión entre las distintas formas, sobre todo de las que están separadas una cierta distancia, puesto que de ser así posiblemente la sierra no se drenaría por los numerosos manantiales existentes a diferentes cotas. Esta desconexión obedece a que la karstificación no ha progresado lo suficiente como para comunicar cavidades entre sí, muchas veces porque lo dificulta la compleja estructura geológica o por la existencia de intercalaciones metapelíticas en la serie marmórea que contribuyen a independizar sistemas.

En Sierra Mijas las escasas manifestaciones espeleológicas inventariadas están representadas por pequeñas cavidades de desarrollo subvertical, en su mayor parte, excavadas sobre los mármoles calizos (Fig. 7).

El funcionamiento hidrodinámico de las cavidades está claramente relacionado con los factores climáticos y con la existencia de superficies de discontinuidad (estra-

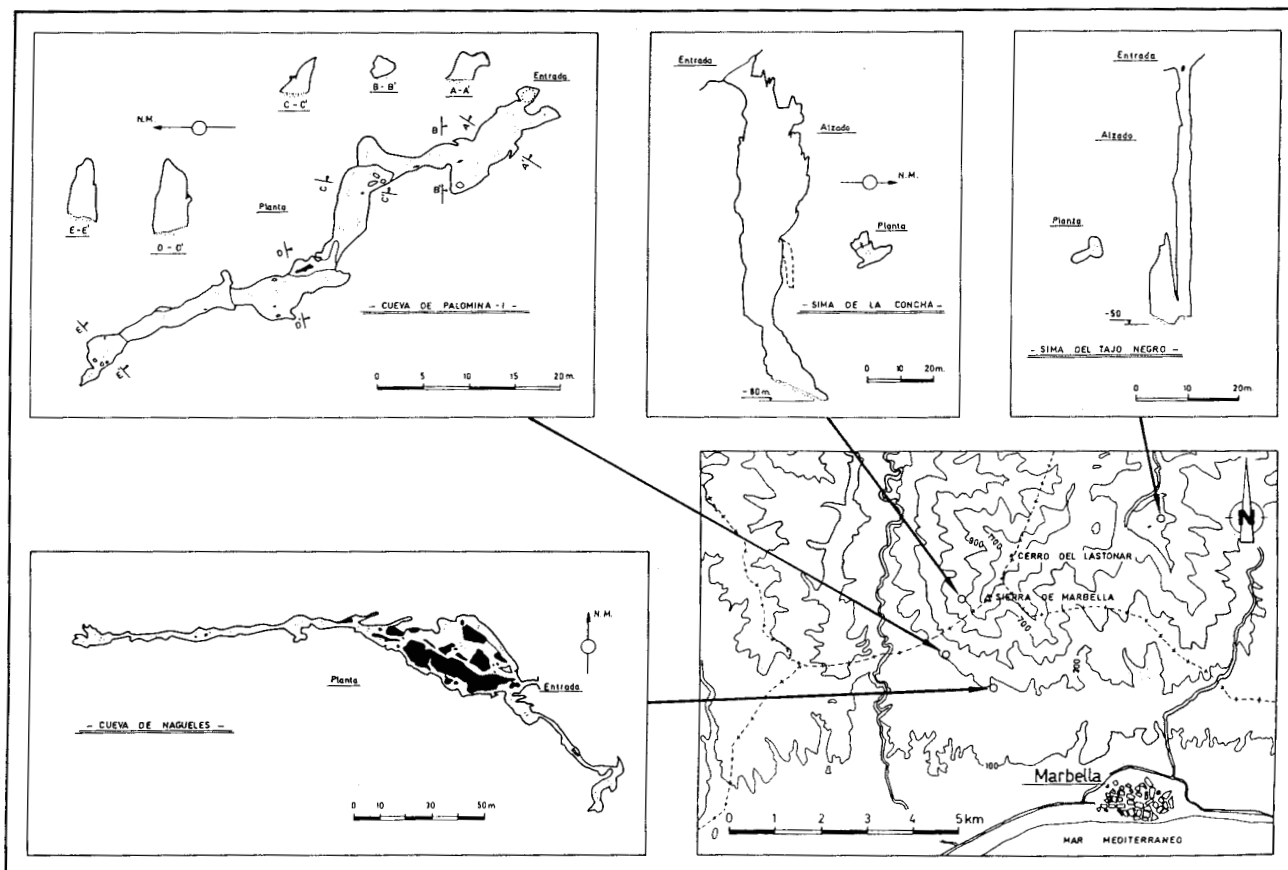


Fig. 6.- Principales cavidades kársticas de Sierra Blanca.

tificación y/o fracturación), de forma que en estiaje presentan una escasa actividad, mientras que en épocas de lluvias rápidamente se infiltra el agua y es cuando hay una mayor actividad karstogénica.

Las cavidades horizontales presentan mayor desarrollo de depósitos litoquímicos, entre los que destacan abundantes coladas, banderas, estalactitas y estalagmitas, éstas últimas muy deterioradas por la presencia humana. Sin embargo, en las cavidades de desarrollo vertical (simas), los depósitos quedan reducidos a algunas coladas y excepcionalmente estalactitas.

HIDROGEOLOGÍA

El estudio de los sistemas kársticos puede hacerse a partir de sus respuestas naturales y/o provocadas. El hidrograma o la piezometría, es decir, la respuesta energética (Mangin, 1975), no es la única utilizable a tal fin, puesto que hay también una respuesta térmica (Andrieux, 1978), biológica (Rouch, 1978) o de materia: hidroquímica (Miserez, 1973; Bakalowicz, 1979; Mudry, 1987), isotópica (Blavoux, 1978) e incluso la producida por los trazadores artificiales (Lepiller y Mondain, 1986). Cada una de estas respuestas, debidamente analizada, puede proporcionar información interesante acerca del

funcionamiento del sistema en cuestión y, claro está, mucho más cuando se consideran, conjuntamente, varias de ellas. En este trabajo se consideran las respuestas hidrodinámica e hidroquímica.

Hidrodinámica

Los mármoles que afloran en el área de estudio, son permeables por fisuración y/o karstificación por lo que constituyen la Unidad Hidrogeológica Blanca-Mijas. La recarga de esta Unidad se produce, mayoritariamente, por la infiltración del agua de lluvia, la cual está favorecida por el buzamiento de las capas, en general superior a la pendiente topográfica, y por la fracturación, que es predominantemente subvertical. La descarga tiene lugar a través de los manantiales de los bordes (Fig. 1 y Foto 2) y de los bombeos en las numerosas captaciones que existen, sobre todo en Sierra Mijas.

Los primeros trabajos realizados en las Sierras Blanca y Mijas (Dupuy de Lôme, 1923; IGME, 1983; 1985) ponen de manifiesto la existencia de bruscas variaciones en la cota piezométrica según el sector considerado. Atendiendo a este criterio el IGME (1983, 1985) dividió la Unidad Hidrogeológica en 6 zonas o compartimentos hidrogeológicos: Torremolinos (con cotas pie-

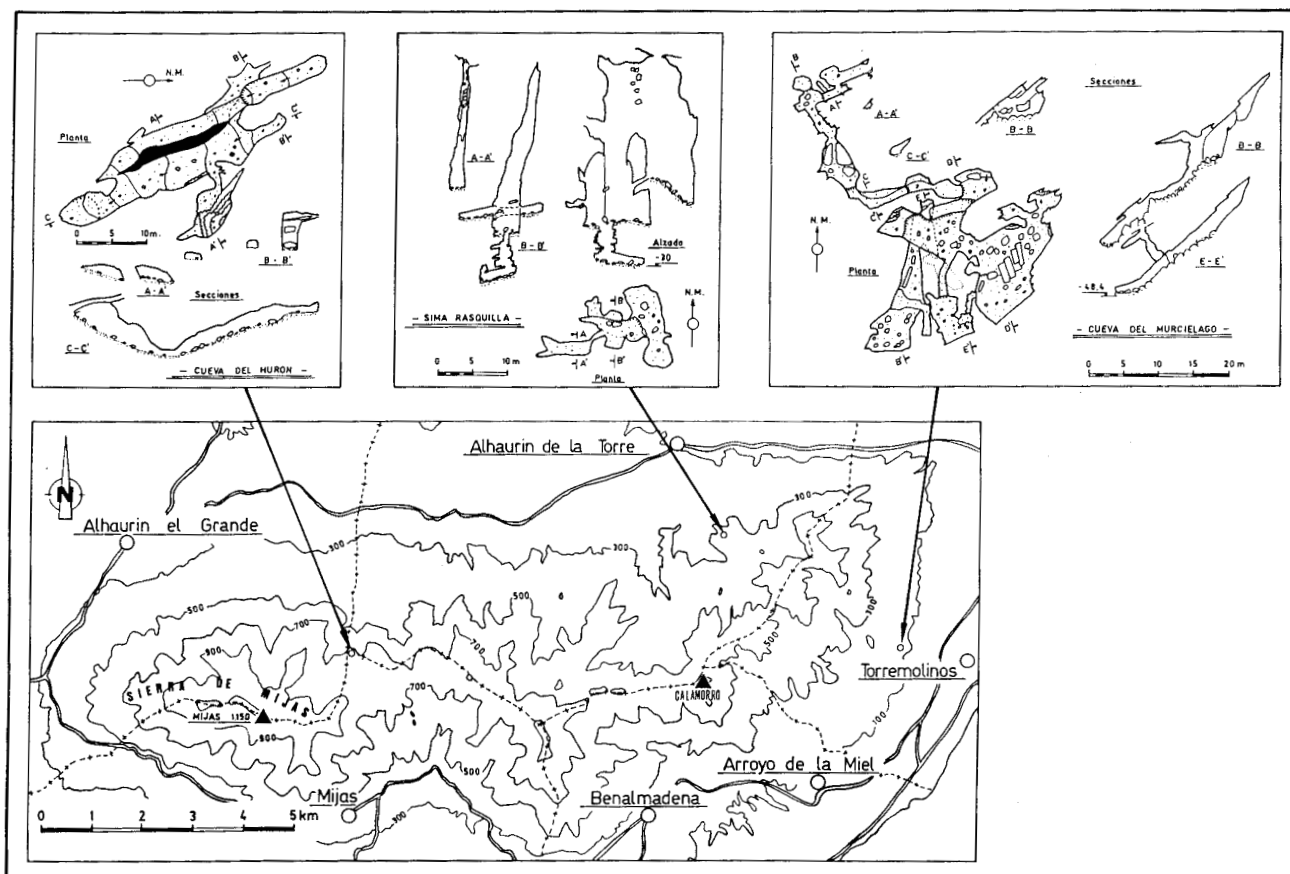


Fig. 7.- Principales cavidades kársticas de la Sierra de Mijas.

zométricas entre 60 y 80 m s.n.m.), Alhaurín de la Torre (150-250 m s.n.m.), Benalmádena (220 m s.n.m.), Mijas (400 m s.n.m.), Alhaurín el Grande-Coín (260-290 m s.n.m.) y zona occidental de Sierra Blanca (200-450 m s.n.m.).

Los afloramientos de travertinos situados a distintas cotas en los bordes de las sierras, están relacionados con el drenaje de estas zonas hidrogeológicas a lo largo del Pleistoceno.

El grado de explotación existente actualmente en los sondeos que captan los mármoles de Sierra Mijas ha provocado la desecación de todos sus manantiales, los cuales, sólo vuelven a manar esporádicamente después de períodos de altas precipitaciones. El control hidrodinámico se realiza mediante medidas del nivel en una red de piezómetros. De estas medidas se deduce, por una parte, que existen grandes depresiones piezométricas en los lugares donde se concentra la explotación y, por otra parte, que el acuífero se recupera con relativa facilidad cuando caen precipitaciones abundantes (Fig. 8A).

La aplicación del análisis correlatorio y espectral a crónicas de lluvias y caudales de los manantiales de

Torremolinos, correspondientes al período no influenciado por los bombeos, ha permitido constatar que el sistema drenado por éstos es muy inercial, tiene una gran memoria, es decir, es capaz de modular fuertemente las lluvias (Carrasco y Andreo, 1992; Andreo *et al.*, 1996b). Se trata de un sistema carbonatado de tipo fisurado y no propiamente kárstico.

En Sierra Blanca pueden diferenciarse claramente dos sectores atendiendo a criterios geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos: un sector oriental y otro occidental.

El sector oriental o sistema de Coín está comprendido entre Sierra Canucha y el Puerto de los Pescadores y su principal punto de descarga es el manantial de Coín. Se trata de un sistema de grandes dimensiones (del orden de 60 km²), que presenta un alto grado de fisuración y diaclasado, en definitiva poco karstificado (Andreo *et al.*, 1992; Andreo, 1997). Las variaciones en el caudal del manantial son poco acusadas, al igual que sucede con el nivel piezométrico (Fig. 8B).

El sector oriental de Sierra Blanca puede estar conectado hidrogeológicamente con Sierra Mijas (Fig.

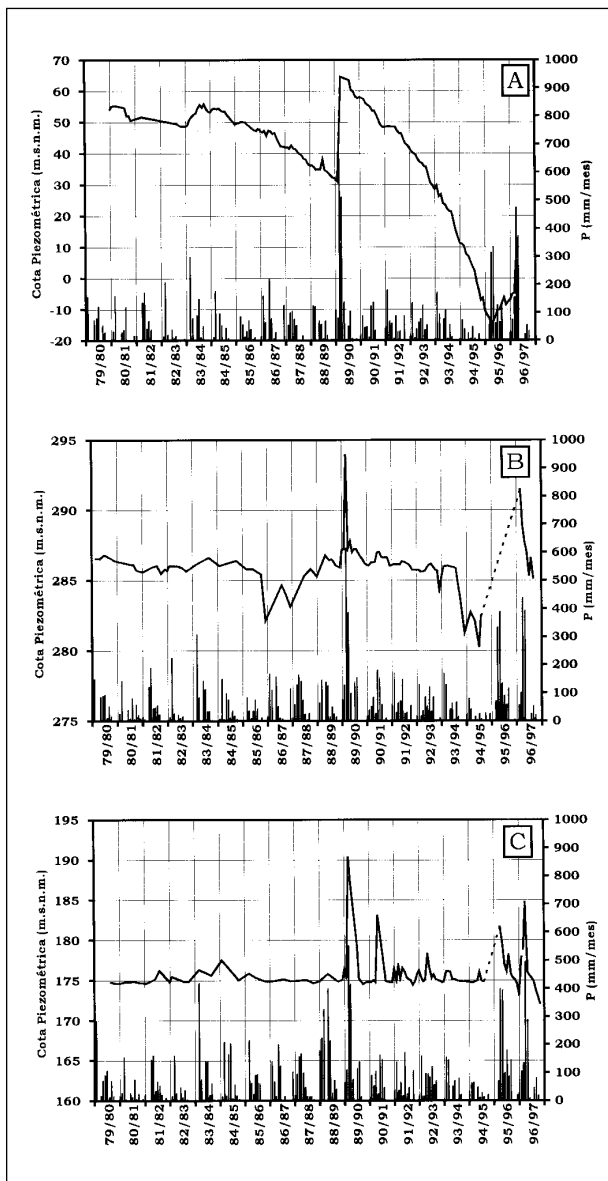


Fig. 8.- Evolución histórica del nivel piezométrico en Sierra de Mijas (A), en el sector oriental de Sierra Blanca (B) y en el sector occidental de ésta Sierra (C). Los datos anteriores a 1990 han sido facilitados por el ITGE.

1), a través de la parte más superficial y alterada de las peridotitas existentes con el Puerto de los Pescadores (IGME, 1983, 1985), aunque la transmisividad de éstos materiales no debe permitir la transferencia de recursos entre las dos sierras, al menos de forma importante.

En el sector occidental de Sierra Blanca, dada la complejidad de su estructura, hay varias zonas o compartimentos hidrogeológicos (en el sentido del IGME, 1985) como sugiere el hecho de que este sector esté drenado por un gran número de manantiales (Fig. 1) que surgen a cotas variables entre 200 y 450 m s.n.m, entre los que destaca el de Istán (Foto 2) en el borde oeste. Estos manantiales presentan grandes fluctuaciones en los caudales (hidrogramas con picos muy acusados) como res-

puesta ante las abundantes lluvias que caen en este área (Andreo, 1997), precisamente donde se reconoce un mayor desarrollo de cavidades kársticas. Los sondeos de control piezométrico también muestran variaciones relativamente importantes del nivel (Fig. 8C).

Hidroquímica

El control hidrodinámico informa sobre los volúmenes de agua puestos en juego pero poco dice del origen o procedencia de éstos. De ello precisamente es de lo que da cuenta el control hidroquímico.

Composición química de las aguas subterráneas

En el diagrama de Piper de la figura 9 se pueden distinguir tres grandes grupos o familias de aguas que caracterizan otros tantos sectores dentro de la Unidad (Carrasco y Andreo, 1994).

Las aguas del sector occidental de Sierra Blanca son claramente bicarbonatadas cálcicas, dada la naturaleza caliza de los mármoles por los que circulan, con unos bajos contenidos en SiO_2 y SO_4^{2-} (del orden de 10-15 mg/l y 10-20 mg/l, respectivamente).

Las aguas del sector oriental de Sierra Blanca (sistema de Coín) son de facies bicarbonatadas cálcico-magnésicas, presentan mayores concentraciones en SiO_2 y SO_4^{2-} que las del sector occidental (15-20 mg/l y más de 30 mg/l, respectivamente). Así mismo, la proporción en Mg^{2+} procedente de los mármoles acuíferos se incrementa de forma considerable (20-30 mg/l).

Finalmente, las aguas de Sierra Mijas son también de facies bicarbonatada cálcico-magnésica, en general, son más mineralizadas que las del sector oriental de Sierra Blanca pues tienen más Mg^{2+} procedente de los flujos lentos a través de los mármoles dolomíticos, y los contenidos en SiO_2 y SO_4^{2-} son del mismo orden de magnitud que en el sector occidental de Sierra Blanca.

Aplicación de la hidroquímica al conocimiento hidrodinámico

La mineralización de las aguas es mayor en Sierra Mijas y en el sector oriental de Sierra Blanca (superior a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) que en el sector occidental de esta última (330-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que sugiere menores tiempos de permanencia en contacto con los materiales acuíferos, y por tanto mayor karstificación funcional, en el último sector.

Los coeficientes de variación de los componentes químicos analizados, correspondientes a las aguas de la

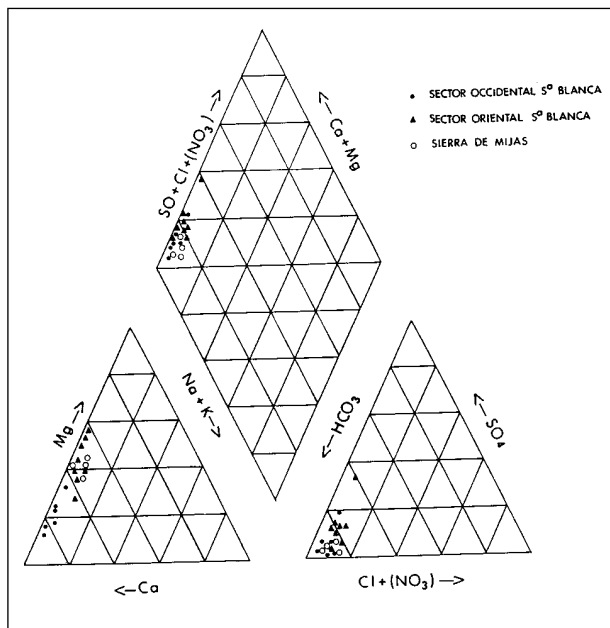


Fig. 9.- Diagrama de Piper en el que se representan las muestras de agua recogidas en la Unidad Blanca-Mijas a finales del estiaje del año hidrológico 1990/91.

unidad hidrogeológica, son claramente inferiores a los del agua de lluvia (Andreo y Carrasco 1991a y b), circunstancia ésta que pone de manifiesto el papel modulador de la señal de entrada por parte de los mármoles acuíferos. Es decir, no se trata de un simple *tránsito* de agua, sino que hay una *transferencia* (Bakalowicz, 1979). Ahora bien, los coeficientes de variación de las aguas de la Unidad, aún siendo menores que los del agua de lluvia, son más elevados en el sector occidental de Sierra Blanca que en el oriental y en la Sierra de Mijas (Andreo y Carrasco, 1991a y b).

Por otra parte, las curvas de frecuencias de la conductividad presentan distribuciones plurimodales en Sierra Blanca occidental, mientras que en el sector oriental de dicha sierra y en la de Mijas, las curvas de frecuencias son más bien de tipo unimodal (Fig. 10). Por tanto, la heterogeneidad hidrodinámica observada en el sector occidental de Sierra Blanca, comporta una heterogeneidad hidroquímica, de acuerdo con el mayor grado de karstificación funcional que allí existe.

Evaluación de la tasa de ablación kárstica

En la tabla 1 se recogen los resultados obtenidos en el cálculo de la tasa de ablación kárstica a partir de la fórmula de Smith y Atkinson (1976) modificada, pues en lugar de considerar la dureza total se ha tenido en cuenta el contenido medio en bicarbonatos de las aguas que drenaron Sierra Blanca durante el año hidrológico 1990/91. La infiltración eficaz se ha obtenido a partir de la relación entre los contenidos en Cl del agua de lluvia y del acuífero, considerando que es nulo el aporte de este ión por

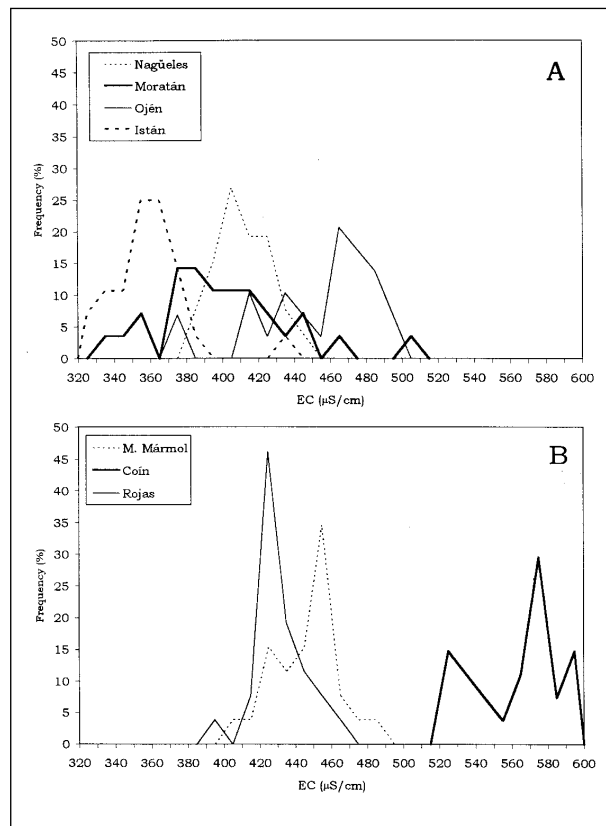


Fig. 10.- Curvas de frecuencias de los datos de conductividad del agua medidos en varios manantiales de las sierras Blanca y Mijas, durante el año hidrológico 1990/91.

parte de los mármoles acuíferos (Schoeller, 1962). La superficie de recarga se ha calculado teniendo en cuenta el volumen de agua drenado por cada manantial y el coeficiente de infiltración calculado previamente. En Sierra Mijas no se ha calculado la tasa de ablación kárstica puesto que todos sus manantiales están secos y la descarga se produce a través de los numerosos bombeos que existen.

Conviene precisar que se trata de un cálculo aproximado pues no se han tenido en cuenta, por ejemplo, los procesos de disolución-precipitación que eventualmente pueden haber existido dentro del sistema, los contenidos en CO_3H del agua de lluvia, el espesor de la zona saturada, la velocidad de flujo subterráneo o el tiempo de residencia (Garay *et al.*, 1988, Garay y Morell, 1989).

No obstante lo anterior, los valores obtenidos pueden considerarse indicativos del orden de magnitud habida cuenta del número de datos disponibles. Las tasas de ablación calculadas varían entre $17 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ ($0,017 \text{ mm/año}$) y $33,3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ ($0,033 \text{ mm/año}$) con una media de $26,4 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ ($0,026 \text{ mm/año}$), ligeramente inferior a los $35 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$ obtenidos por Garay *et al.* (1988) y Garay y Morell (1989) en Sierra Mijas. Según estos autores las tasas de ablación calculadas son propias

MANANTIAL	CAUDAL (10 ⁶ m ³ /año)	PRECIPITACION (l/m ²)	INF. EFICAZ (% P = l/m ²)	SUPERFICIE (Km ²)	CO ₃ H ⁻ (mg/l)	V. DISUELTO (m ³ /año)	TASA ABLACION (m ³ /Km ² /año)
ISTAN	5'8	905	48'8%P = 441'6	13	160	367	28
NAGÚELES	1'5	670	37'5%P = 251'3	6'2	195	117	18'9
CAMOJAN	1'5	670	38'5%P = 258	6	172	103'2	17'2
OJEN	1'87	670	44%P = 295	6'3	240	179'5	28'5
MORATAN	1'5	670	44%P = 295	5'3	200	120	22'6
MANCHA	0'78	632	56'5%P = 357	2'2	207'5	64'5	29'3
MOLINO MARMOL	1'8	632	57'8%P = 365	4'9	210'6	151'6	31
COIN	13'3	632	51%P = 332	40	214'5	1141	28'5
LAS TORRES	0'9	660	50%P = 330	2'7	250	90	33'3

Tabla 1.- Cálculo de la tasa de ablación kárstica en los manantiales de Sierra Blanca, durante el año hidrológico 1990/91.

de un clima semiárido y habituales en el dominio perimediterráneo.

Sin embargo, en el área de estudio las precipitaciones pueden llegar a ser de hasta 1.000 mm/año, es decir, el clima no es propiamente semiárido y, por tanto, las razones de que la tasa de ablación sea baja hay que buscarla en el elevado grado de cristalinidad de los mármoles y en la ausencia cada vez mayor de cobertura vegetal, productora del CO₂ necesario para la karstificación. En el sector occidental de Sierra Blanca, hay tener especialmente en cuenta, la existencia de karstificación funcional, como un factor autolimitante de la ablación kárstica.

CONCLUSIONES

Los mármoles alpujarrides de edad triásica que constituyen las Sierras Blanca y Mijas quedaron en condiciones de ser karstificados a partir del Tortonense superior, si bien la karstificación más activa se debió producir a partir del Plioceno y ha estado condicionada, en gran parte, por el levantamiento relativo de los dos relieves carbonatados, debido a la actuación de las fallas de borde que, a su vez, originan un descenso del nivel de base y un encajamiento de la red de drenaje.

Ambas sierras presentan un relieve muy acusado, con alturas de 1.270 m (Cerro del Lastonar, en Sierra Blanca) y 1.150 m (vértice Mijas) en apenas 5 km de distancia al mar. Existe un importante condicionante litológico en cuanto al tipo de relieve, ya que los mármoles dolomíticos, cuando son sacaroideos, son más deleznales y erosionables, por lo que dan lugar a relieves de menor altitud y relativamente planos ("llanos"), en los que se produce una disminución de la escorrentía y un aumento de la infiltración. También influye notablemente en el relieve la compleja estructura geológica de la región.

La mayor parte de la red espeleológica conocida se

ubica sobre los mármoles calizos del sector occidental de Sierra Blanca, donde se detecta una estrecha relación entre la altitud a la que se sitúa cada cavidad con su morfología, así como con la cantidad y tipo de depósitos litoquímicos. En las cotas más altas predominan las simas, con menor desarrollo de espelotemas (generalmente coladas y algunas estalactitas), a cotas intermedias se desarrollan cavidades de tipo mixto vertical-horizontal, mientras que en las cotas inferiores se encuentran las cavidades subhorizontales, en las que los depósitos litoquímicos son más abundantes (coladas, estalactitas, estalagmitas).

En Sierra Mijas, existe un menor número de cavidades inventariadas. La mayor parte de ellas se excavan sobre los mármoles calizos y presentan un desarrollo predominantemente vertical, en el cual la estratificación parece haber jugado un papel muy importante.

Los mármoles de las sierras Blanca y Mijas, por fracturación y disolución, constituyen una importante unidad hidrogeológica cuya recarga se efectúa por la infiltración del agua de lluvia. La descarga tiene lugar por los manantiales existentes en sus bordes y por bombeos en numerosas captaciones. Dentro de esta unidad existen varios sistemas caracterizados por presentar diferencias en las cotas piezométricas y en su comportamiento hidrodinámico.

Sierra Mijas está actualmente en régimen influenciado, con importantes bombeos que originan continuos descensos piezométricos y han motivado el agotamiento de los manantiales. El análisis de la crónicas de caudales de los manantiales de Torremolinos, anteriores al actual período de explotación, ha puesto de manifiesto que el sistema drenado por ellos, es muy inercial, con gran memoria, por lo que se trata de un acuífero de tipo fisurado, con un comportamiento poco kárstico, lo cual está de acuerdo con la escasa red espeleológica conocida.

Por el contrario Sierra Blanca se drena actualmente

de modo natural, a través de manantiales situados a diferentes cotas. El sector oriental de esta sierra se drena por el manantial de Coín y tiene un funcionamiento más próximo al tipo fisurado que al kárstico. En el sector occidental hay varios sistemas drenados por manantiales que tienen un comportamiento kárstico, lo cual está en consonancia con un mayor desarrollo de la red espeleológica.

Las consideraciones hidrodinámicas quedan confirmadas por la hidroquímica, pues las aguas de la Sierra de Mijas y sector oriental de Sierra Blanca presentan una mayor mineralización como consecuencia del mayor tiempo de permanencia en el acuífero, los coeficientes de variación de los parámetros hidroquímicos son también más bajos que en Sierra Blanca occidental y las curvas de frecuencia son de tipo unimodal, debido a la homogeneización que tiene lugar en el acuífero, por el bajo grado de karstificación funcional que presenta.

La tasa de ablación kárstica calculada para los manantiales de Sierra Blanca presenta un valor medio de 26,4 m³/km²/año (0,026 mm/año), en un área donde las precipitaciones pueden llegar a ser de hasta 1.000 mm/año.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración prestada a todos los miembros de los grupos espeleológicos de Fuengirola y Marbella y a Federico Ramírez Trillo. Este trabajo es una contribución al Proyecto IGCP 379 de la UNESCO *Karst processes and the Carbon cycle* y ha sido financiado por el Grupo de Investigación de Recursos Hídricos de la Junta de Andalucía, así como de los Proyectos PB94/0050, PB94/1495 y PB97/1267-CO3-CO2 de la DGICYT.

REFERENCIAS

ANDREO, B. (1997): *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas (Cordillera Bética, Sur de España)*. SPUMACHS, Málaga. 489 p.

ANDREO, B. y CARRASCO, F. (1991a): Contribución de la hidrodinámica e hidroquímica al conocimiento del acuífero carbonatado de Sierra Blanca (Málaga). *III Simposio sobre el Agua en Andalucía*, Córdoba, 1, 289-299.

ANDREO, B. y CARRASCO, F. (1991b): Aplicación de la hidroquímica al estudio del acuífero kárstico de Sierra Blanca (Marbella, Málaga). *IV Congreso de Geoquímica de España*, Soria, 2, 523-529.

ANDREO, B.; CARRASCO, F. y CRUZ-SANJULIÁN, J.J. (1992): Contribución al conocimiento hidrodinámico del sistema carbonatado drenado por el manantial de Coín (Málaga). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 15, 775-782.

ANDREO, B.; CARRASCO, F., VADILLO, I. y LIÑÁN, C. (1996a): Características hidrogeológicas de las Sierras Blanca y Mijas (provincia de Málaga, Cordillera Bética). *Geogaceta*, 20(6), 1267-1270.

ANDREO, B.; CARRASCO, F.; MANGIN, A.; ANTIGÜEDAD, I. y VADILLO, I. (1996b): El análisis correlatorio y espectral aplicado al sistema carbonatado alpujarride de Torremolinos (Sierra de Mijas, Málaga). *Jornadas sobre Recursos Hídricos en regiones kársticas*, Vitoria, 233-247.

ANDREO, B.; CARRASCO, F. y SANZ DE GALDEANO, C. (1997): Type of carbonate aquifers according to the fracturation and the karstification in a southern Spanish area. *Environmental Geology*, 30(3/4), 163-173.

ANDREO, B. y SANZ DE GALDEANO, C. (1994): Stratigraphy and structure of Sierra Mijas (Alpujarride complex, Betic Cordillera). *Annales Tectonicae*, 8(1), 23-35.

ANDRIEUX, C. (1978): Les enseignements apportés par la thermique dans le karst. *Le karst: son originalité physique, son importance économique. Colloque de Tarbes*. Association des géologues du Sud-Ouest (AGSO), 48-63.

BAKALOWICZ, M. (1979): *Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification*. Thèse Doct. Sci. Nat. Univ. Paris VI., 269 p.

BIOT, J.P. (1971): Sur les marbres métamorphiques et de la série gneissique du flanc méridional de Sierra Mijas (Prov. de Málaga, Espagne). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 272, 2128-2130.

BLAVOUX, B. (1978): *Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium*. Thèse Doct. Univ. Paris VI. 333 p.

BLUMENTHAL, M. (1949): Estudio Geológico de las Cadenas Costeras al Oeste de Málaga, entre el río Guadalhorce y el río Verde. *Bol. Inst. Geol y Min.* 62, 1-193.

CARRASCO, F. y ANDREO, B. (1992): Aplicación del análisis correlatorio y espectral al sistema carbonatado de los manantiales de Torremolinos. *III Congreso Geológico de España*, Salamanca, 2, 261-265.

CARRASCO, F. y ANDREO, B. (1994): Calidad química de las aguas subterráneas en la Unidad Hidrogeológica Sierra Blanca-Sierra de Mijas (provincia de Málaga). *Congreso sobre análisis y contaminación de las aguas subterráneas*, Alcalá de Henares (Madrid), 2:25-38.

DUPUY DE LÔME, E. (1923): *Estudio acerca de la cuenca hidrológica de Sierra Mijas o Torremolinos*. Excmo. Ayuntamiento de Málaga, 21 p. (inérito).

DURÁN, J.J. (1996): *Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo occidental*. Tesis Doct. Univ. Complutense de Madrid. 409 p.

DURÁN, J.J.; GRÜN, R. y SORIA J.M. (1988a): Aportación del estudio geocronológico de espeleotemas y travertinos al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en la Península y Baleares. *II Congreso Geológico de España*, Granada, 1, 383-386.

DURÁN, J.J., GRÜN, R. y SORIA, J.M. (1988 b): Edad de las formaciones travertínicas del flanco meridional de Sierra Mijas (provincia de Málaga, Cordilleras Béticas). *Geogaceta*, 5, 61-63.

DURÁN, J.J. y SORIA, J.M.; editores (1989): *II Encuentro de campo de geomorfología, cuaternario y neotectónica*. ITGE y AEQUA, 146-159.

GARAY, P.; OBARTI, F.J. y MORELL, I. (1988): Dissolution-rates in Spanish karst regions. *IAM 21st Cong. Karst hydrogeology and environment protection*, Guilin (China), 1, 276-280.

GARAY, P. y MORELL, I. (1989): Tasas de disolución en regiones kársticas españolas. En DURÁN, J.J. y LÓPEZ MARTÍNEZ, J. (Eds). *Monografías, 4, El karst en España*, 257-264. Sociedad española de Geomorfología, Madrid.

- IGME (1978): *Mapas geológicos a escala 1:50.000 y memorias explicativas de las hojas 1065 (Marbella), 1066 (Cádiz) y 1053-1067 (Málaga-Torremolinos)*. IGME, Madrid.
- IGME (1983): *Investigación hidrogeológica de las cuencas del Sur de España. Sistema acuífero nº 38 (mármoles de Sierra Blanca-Sierra de Mijas)*. Informe técnico nº 6, 2 tomos (inédito).
- IGME (1985): *Estudio del sistema acuífero nº 38 (Sierra Blanca-Sierra de Mijas)*. *Hidrogeología, calidad y utilización del agua*. 5 tomos (inédito).
- LEPILLER, M. y MONDAIN, P. (1986): Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. *Hydrogéologie* 1, 33-52.
- LHÉNAFF, F. (1966): Existence d'un haut niveau marin (Pliocène terminal ou Quaternaire ancien) déformé à l'Ouest de Málaga (Espagne). *Com. Rend. Somm. de la SGF*, 395-396.
- LHÉNAFF, F. (1981): *Recherches geomorphologiques sur les Cordillères Bétiques centro-occidentales (Espagne)*. Tesis Doct. Lille III, 713 p.
- MANGIN, A. (1975): Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. In: *Ann. Spéleol* 29 (3): 233-332; 29 (4): 494-601; 30 (1), 21-124.
- MARTÍN-ALGARRA, A. (1987): *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética*. Tesis Doct. Univ. de Granada, 1171 p., 2 volúmenes.
- MICHEL-LEVY, A. y BERGERON, J. (1890): Estudio geológico de la Serranía de Ronda. *Bol. Geol. y Min.* 17, 325 p.
- MISEREZ, J.J. (1973): *Géochimie des eaux du karst jurassien. Contribution physico-chimique à l'étude des alterations*. Thèse Doct. Sci. Nat. Univ. Neuchâtel. 313 p.
- MOLLAT, H. (1968): Schichtenfolge und tektonischer Bau der Sierra Blanca und ihrer umgebung. *Geol. Jb.*, 81, 471-532.
- MUDRY, J. (1987): Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse d'Etat Besançon. En: *Ann. Scientif. Univ. Besançon*, Mémoire nº 4, 381 p.
- ORUETA, D. (1917): Estudio geológico y petrográfico de la Serranía de Ronda. *Mem. I.G.M.E.* 32, 1-576.
- RODRÍGUEZ VIDAL, J. (1982): El condicionamiento estructural del karst de Sierra Blanca (Marbella, Málaga). *Reunión monográfica sobre el karst*, Larra, 105-115. Diputación de Navarra, Pamplona.
- ROUCH, R. (1978): Le système karstique et son limité biologique. *Le Karst: son originalité physique, son importance économique. Colloque de Tarbes*. Association des géologues du Sud-Ouest (AGSO), 38-47.
- SALOBREÑA, C. (1977): *Geología del sector Ojén-Monda (prov. de Málaga) Cordilleras Béticas (España)*. Tesis Licen. Univ. de Granada. 86 p.
- SANZ DE GALDEANO, C. (1986): Structure et stratigraphie du secteur oriental de la Sierra Almirajara (Zone Alpujarride, Cordillères Bétiques). *Estudios Geol.*, 42, 281-289.
- SANZ DE GALDEANO, C. (1997): *La Zona Interna Bético-Rifeña*. Monográfica Tierras del Sur nº 18, Univ. de Granada. 316 p.
- SANZ DE GALDEANO, C. y ANDREO, B. (1995): Structure of Sierra Blanca (Alpujarride complex, west of the Betic Cordillera). *Estudios Geol.*, 51, 43-55.
- SANZ DE GALDEANO, C. y LÓPEZ-GARRIDO, A.C. (1991): Tectonic evolution of the Malaga Basin (Betic Cordillera). Regional implications. *Geodinamica Acta*, 5(3), 173-186.
- SCHOELLER, H. (1962): *Les eaux souterraines*. Masson. 642 p.
- SOCIEDAD ESPELEOLÓGICA MARBELLÍ (1985): *Guía Espeleológica Marbellí*. Excmo. Ayuntamiento de Marbella (Delegación de Cultura). 77 p.
- SGOP (1992): *Recopilación de datos hidrogeológicos de la Unidad Hidrogeológica Sierra Blanca-Sierra de Mijas* (inédito).
- SMITH, D. y ATKINSON, T. (1976): Process, landforms and climate in limestones regions. In: *Geomorphology and climate*. John Wiley & Sons, Bristol.
- TUBÍA, J.M. (1985): Sucesiones metamórficas asociadas a rocas ultramáficas en los Alpujarrides occidentales (Cordilleras Béticas, Málaga). Tesis Doct. Univ. Bilbao. *Bol. Geol. y Min.*, 99 (2, 3, 4, 5). 1988.