

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE SIERRA GORDA, POLJE DE ZAFARRAYA Y HACHO DE LOJA

M. López Chicano¹ y A. Pulido-Bosch²

¹Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Universidad de Granada. Avda. Fuentenueva s/n. 18071 - Granada. mlopezc@ugr.es

²Departamento de Hidrogeología y Química Analítica, CITE-2B, Universidad de Almería. La Cañada de San Urbano, 04120 - Almería. apulido@ual.es

Resumen

La región montañosa cuyas características se describen a continuación, se sitúa al poniente granadino y presenta un importante sistema acuífero, el de Sierra Gorda, localizado estratégicamente entre las cuencas del río Genil y del río Vélez o Guaro (cuena del Guadalquivir y cuena mediterránea, respectivamente), por lo que sus recursos hídricos son fundamentales en la planificación y gestión integrales de ambas cuencas. La regulación y utilización parciales de los recursos propios del acuífero se llevan a cabo, fundamentalmente, en áreas alejadas del mismo, siendo pequeño el aprovechamiento en los lugares más inmediatos al macizo. A este respecto, cabe destacar el abastecimiento de agua potable a una gran parte de los núcleos de población (algunos de ellos todavía sin adecuadas obras de regulación), la utilización en cultivos de regadío (especialmente en el polje de Zafarraya, el valle del río Genil, la zona de Periana y el olivar de la Venta del Rayo y Cortijo de las Mozas), mantenimiento de las piscifactorías del sector de Loja y el aprovechamiento de las aguas termales de Alhama de Granada en balneoterapia. La actividad ganadera, importante en este macizo, se provee de agua esencialmente a partir de la interceptación y almacenamiento de las aguas pluviales en aljibes, y en menor medida de la captación de pequeños manantiales colgados en las partes altas de la Sierra.

Palabras clave: S^a Gorda, Polje de Zafarraya, Hacho de Loja, acuíferos

INTRODUCCIÓN

Los aprovechamientos de aguas subterráneas contribuyen a la expansión económica y al desarrollo de algunos puntos de la región, en los cuales se ha ido produciendo un aumento paulatino de la demanda hídrica en los últimos años. Por contrapartida, existen áreas como el polje de Zafarraya donde la forma de aparición del agua conlleva además problemas a causa de los riesgos de avenidas e inundaciones (como la última acontecida a finales de 1996 y principios de 1997), aspecto que debe ser necesariamente contemplado en la planificación hidrológica de esta región.

En este trabajo se sintetiza la información disponible sobre el sistema hidrogeológico de Sierra Gorda, incluyendo aspectos específicos del subsistema hidrogeológico detrítico que constituye el relleno aluvial del polje de Zafarraya y también del acuífero carbonatado del Hacho de Loja, cuyas relaciones hidrológicas con Sierra Gorda aún no han podido ser bien establecidas. El grado de conocimiento hidrogeológico que se tiene actualmente de esta región se debe a la realización de numerosos estudios desde la pasada década de los sesenta.

Los primeros estudios hidrogeológicos modernos fueron llevados a cabo por el antiguo Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP), concentrados en el polje de Zafarraya (Anguita

y Fernández Montero, 1969), a lo largo de la década de los 60. Durante los años 70 ven la luz numerosos estudios hidrogeológicos sobre la región, dirigidos desde la Universidad de Granada: Delgado Moya (1973) realiza un estudio hidrogeológico y geomorfológico general sobre la unidad de Sierra Gorda; Delgado Moya *et al.* (1974) aportan los primeros valores de parámetros hidráulicos y datos para un balance hídrico del acuífero de Sierra Gorda; Hidalgo (1974 a y b) e Hidalgo y Fernández Rubio (1974) realizan estudios, de gran interés incluso hoy en día, sobre la hidrogeología del polje de Zafarraya y de todo el sistema hidrogeológico de Sierra Gorda, utilizando buena parte de los datos generados por el SGOP durante los años 60; Casares (1978 y 1981) y Casares *et al.* (1979) estudian aspectos hidroquímicos e hidrodinámicos del Hacho de Loja, acuífero con posible conexión hidráulica al de Sierra Gorda.

Los trabajos de investigación del Instituto Geológico y Minero de España, que comenzaron en el sector durante el año 1974, se enmarcaron dentro del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PNIAS o PIAS). Los resultados fueron dados a conocer en sucesivas publicaciones: en el ámbito de las cuencas del sur de España (sector occidental) en IGME (1981); sobre la calidad y contaminación de las aguas subterráneas en IGME (1985); sobre la hidrogeología del Hacho de Loja en IGME (1983 a); y, específicamente sobre el acuífero de Sierra Gorda, en IGME (1983 b). Los estudios del IGME supusieron un importante avance en el conocimiento hidrogeológico del sector, con propuestas de regulación específicas como la de López Geta *et al.* (1981) para el caso del manantial de Guaro. La continuación de los trabajos del PIAS llevó a Rubio y del Valle (1987) a una actualización de balances hídricos en los acuíferos de Granada y Jaén.

Ante la inminencia de la ejecución del trasvase del arroyo de la Madre, la Diputación Provincial de Granada patrocinó trabajos hidrogeológicos y agronómicos en el polje de Zafarraya, cuyos resultados son recogidos por Ollero y García (1983, 1984 a y b). Un nuevo paso en el conocimiento hidrogeológico de Sierra Gorda se da con el estudio del IRYDA-IGME (1986), gracias a la realización de nuevos sondeos de investigación y explotación. También la Confederación Hidrográfica del sur realizó estudios en el área, como el de Guzmán del Pino (1987), DGOH-CHSE (1988 y 1991), Guzmán del Pino *et al.* (1991).

En los Atlas Hidrogeológicos de Granada y Málaga, publicados por la Diputación Provincial de Granada-ITGE (1990) y la Diputación de Málaga (1988), respectivamente, se hace referencia -especialmente en el primero- al acuífero de Sierra Gorda, siempre de una forma muy resumida. Lo mismo ocurre en el Atlas Hidrogeológico de Andalucía (López Chicano y Pulido Bosch, 1998).

En López Chicano (1989 y 1994), López Chicano y Pulido Bosch (1988, 1989, 1993b y 1994 a y b), Pistre *et al.* (1999) y Galindo Zaldívar *et al.* (2000) se recogen aspectos sobre la geometría y estructura fisural del acuífero de Sierra Gorda, sobre la karstificación y ciertos indicios de compartimentación del mismo. En López Chicano y Pulido Bosch (1995 a y b) y López Chicano *et al.* (1996 a) se aporta información adicional sobre su funcionamiento hidrogeológico. Por último, en López Chicano y Pulido Bosch (1993 a) y Pulido Bosch y López Chicano (1995) se comentan los principales aspectos hidrogeológicos, de forma bastante resumida.

Otros trabajos llevados a cabo desde la Universidad de Granada trataron sobre los aspectos de calidad de las aguas, como: López Chicano *et al.* (1992), Castillo *et al.* (1993), Pulido Bosch *et al.* (1994), Morell *et al.* (1994, 1995 y 1996), Cherif *et al.* (1995) y Gámez *et al.* (1995 y 1996).

En los últimos años, la DGOH-CHG (1995) ha establecido las normas de explotación del acuífero de Sierra Gorda y encargó estudios complementarios como el isotópico llevado a cabo por el CEDEX (1995). Además, se han elaborado diversos estudios sobre las inundaciones del polje de Zafarraya gracias a la información obtenida en los años 1996 y 1997 (López Chicano *et al.* 1996 b, 2001 y 2002).

LOCALIZACIÓN Y RASGOS GEOGRÁFICOS

El acuífero de Sierra Gorda constituye un gran macizo carbonatado, relativamente bien individualizado, que se alza en el extremo occidental de la provincia de Granada y se adentra ligeramente en el noreste de la provincia de Málaga. Se sitúa aproximadamente a 45 km de la ciudad de Granada, delimitando por el suroeste la depresión del mismo nombre. Los afloramientos carbonatados que lo constituyen ocupan una extensión de casi 300 km², comprendidos entre las coordenadas geográficas siguientes: 3° 58' - 4° 15' de longitud oeste y 36° 56' - 37° 11' de latitud norte. Coincide con la Sierra de Loja, Sierra Gorda (*s. str.*) y la parte centro-oriental de la Sierra de Alhama. Las dos primeras sierras aparecen escasamente individualizadas, mientras que la Sierra de Alhama se independiza de aquéllas esencialmente por el Llano de Zafarraya, el cual constituye un magnífico ejemplo de polje o depresión kárstica funcional.

La altitud media es de unos 1300 m sobre el nivel del mar. Las cotas más bajas (460 m) se localizan al norte, junto al río Genil y en las proximidades del pueblo de Loja; en este punto el río Genil discurre muy encajado entre los relieves de Sierra Gorda (al sur) y la prominencia del Hacho de Loja (1025 m) situada en el sector septentrional. El Cerro de Santa Lucía, con el vértice Sierra Gorda (1671 m), constituye la máxima elevación del macizo.

La gran depresión interna, el polje de Zafarraya, se extiende en dirección ESE-ONO a lo largo de 10 km. Su anchura es de 3,5 km en el sector centro-occidental, disminuyendo sensiblemente hacia el ESE. La altitud de la llanura oscila entre 1000 m y algo menos de 900 m sobre el nivel del mar (887 m en los sumideros del arroyo de la Madre).

El acuífero y macizo de Sierra Gorda se encuentra a caballo entre las cuencas hidrográficas mayores del río Guadalquivir y la Cuenca sur (incluida en ésta, de forma administrativa, la cuenca cerrada de Zafarraya), no obstante, y debido a la frecuencia de sectores endorreicos en las partes altas de la sierra, el trazado de divisorias hidrográficas es muy impreciso.

El acuífero se reparte mayoritariamente entre los términos municipales de Loja, Alhama de Granada y Zafarraya, y en menor medida entre los de Periana, Salar, Alfarnate y Alcaucín, por ese orden (Figura 1).

Los cultivos en las áreas que rodean el macizo de Sierra Gorda son predominantemente de labor intensiva (cereales), muy frecuentes en la comarca de Tierras de Alhama y en el valle de Alfarnate. En los bordes noreste (Salar y Rincón de Alcaudique), noroeste (sector de Riofrío) y sur (sector de Periana) los terrenos cerealistas se mezclan con otro cultivo dominante de secano: el olivar. En las partes más bajas y marginales del borde septentrional son frecuentes los aprovechamientos basados en el cultivo de almendros (frutal en secano).

Los cultivos en regadío, en los grandes valles fluviales, han sustituido progresivamente la vegetación original. El regadío predomina así en los márgenes del río Alhama y del río Genil. En este último, y en el sector comprendido entre Loja y Riofrío, se cultivan del orden de 900 ha mediante el riego con aguas procedentes de Sierra Gorda y el Hacho de Loja. En Salar, los cultivos en riego ocupan unas 150 ha.

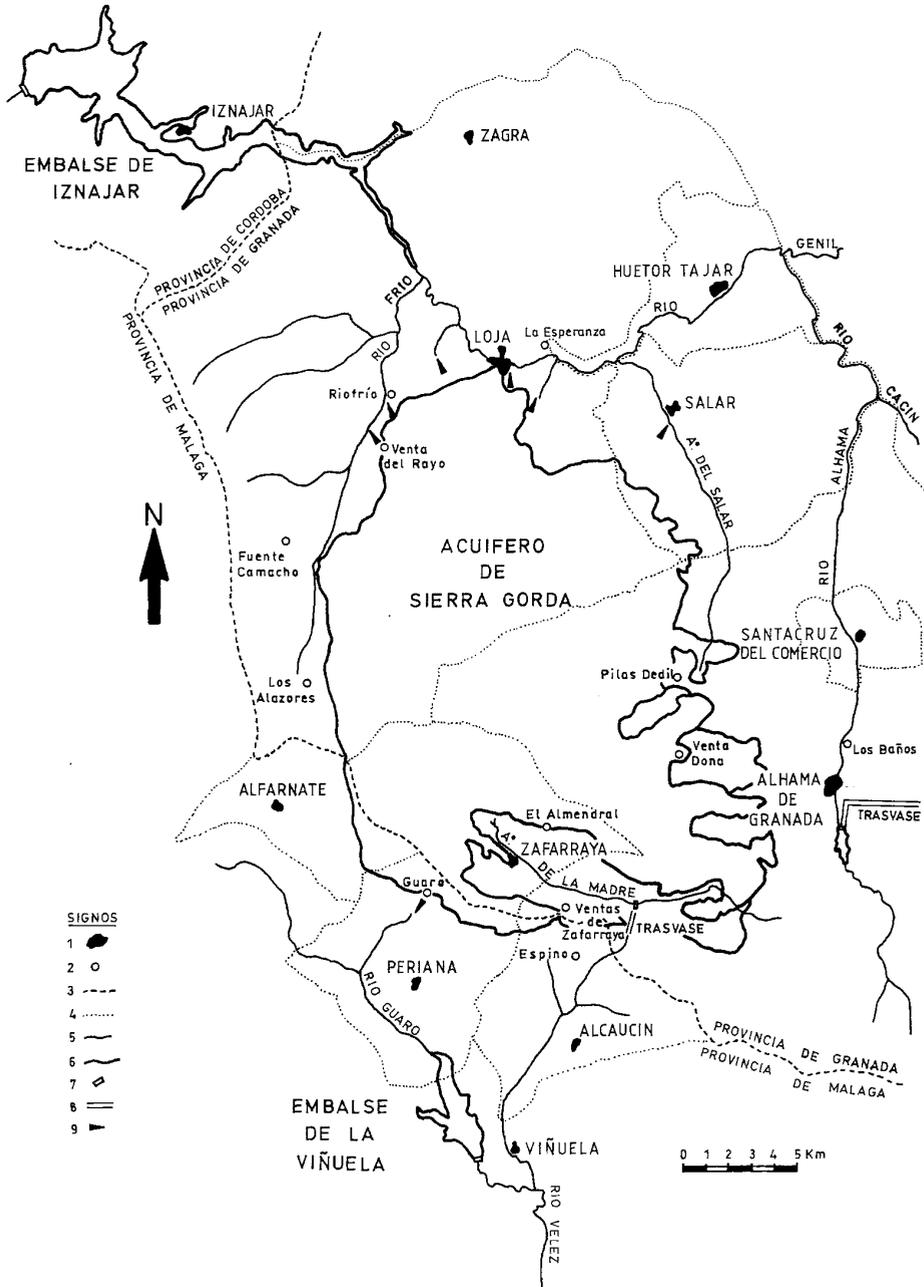


Figura 1.- Localización geográfica e hidrológica del acuífero de Sierra Gorda. 1, población cabeza de municipio; 2, aldea, pedanía o cortijada; 3, límite provincial; 4, límite municipal; 5, curso fluvial; 6, límite de embalse o de acuífero; 7, presa o dique; 8, túnel de trasvase; 9, punto de descarga del acuífero de Sierra Gorda.

En el polje de Zafarraya el regadío (tomate y lechuga, esencialmente) es predominante, consiguiéndose una transformación de cultivos que actualmente se aproxima a 2000 ha. Asimismo, en los Llanos de la Dona y Pilas Dedil se han puesto en riego algo más de 200 ha, gracias a la explotación de aguas subterráneas.

Al igual que ocurre con la vegetación, la cubierta edáfica en el macizo de Sierra Gorda es muy pobre. Sobre las calizas y dolomías apenas se desarrollan suelos poco profundos entre los afloramientos rocosos. Estos litosoles, de carácter básico, aparecen en bolsadas aisladas en la roca madre, a veces asociados a complejos arcillo-regolíticos que rellenan las fisuras abiertas y el lapiaz, o a suelos rojos relictos de disolución de los carbonatos ("terra rossa") que rellenan las depresiones kársticas, como dolinas, etc.

HIDROMETEOROLOGÍA

El clima de la región estudiada puede considerarse como un clima mediterráneo con matiz continental (Csa2 y Csa3 en la clasificación de Köppen), con inviernos suaves y veranos secos y prolongados. Esto es así, al menos para las partes medias y bajas del macizo de Sierra Gorda, y para las áreas más deprimidas que lo rodean (depresión de Granada, depresión de Loja-Riofrío y valle del río Vélez), donde reinan condiciones semiáridas. Por el contrario, en el sector más alto del macizo (en torno a 1400 m y por encima) el tipo de clima puede considerarse como continental (Csb en la clasificación de Köppen), con veranos cortos, secos y frescos, e inviernos fríos (nevadas invernales). Las condiciones reinantes, en estas partes somitales, se aproximarían a las de un sistema templado húmedo o subhúmedo.

La pluviometría en el macizo de Sierra Gorda oscila entre 500 mm y 1000 mm para el año medio (Figura 2), entre 1000 mm y 2000 mm para el año más húmedo, y entre 300 mm y 700 mm para el año más seco. La precipitación media anual sobre el acuífero de Sierra Gorda se ha estimado en 840 mm, lo cual supone una aportación media de 246 hm³/a. La precipitación caída en el área durante el año más húmedo puede triplicar a la correspondiente al año más seco para el conjunto de la región, lo cual ilustra sobre la variabilidad interanual de las precipitaciones.

Más del 75 % de la lluvia que cae en el conjunto del área lo hace, en general, durante el periodo de 6 meses comprendido entre Noviembre y Abril (ambos inclusive), registrándose un máximo absoluto en el mes de Diciembre. Se observa también un nuevo máximo relativo -aunque de importancia secundaria- durante los meses de Febrero y Marzo. La sequía estival es acusada, afectando principalmente a los meses de Julio y Agosto; rara vez se supera una media de 5 mm/mes en este periodo.

La topografía y la procedencia de las borrascas condiciona la existencia de gradientes pluviométricos diferentes en el conjunto del área, que oscilan entre 50 mm/100 m y 100 mm/100 m.

Todo el sector de Sierra Gorda se encuentra entre las isoterma extremas de 17 °C y 12 °C, decreciendo los valores hacia las cumbres más altas. Los valores más bajos, probablemente entre 10 °C y 13 °C, son característicos del sector central y más alto del macizo. Los valores más altos, entre 15 y 17 °C, caracterizan al valle del Genil en Loja y parte de la depresión de Granada, así como al valle del río Guaro, donde las temperaturas medias alcanzan valores superiores a los 18 °C en las proximidades de la franja costera mediterránea.

Los valores extremos de Evapotranspiración potencial oscilan entre 900 mm, para el valle del Genil en Loja, y menos de 700 mm en las partes más altas de los macizos. La ETP aumenta

GEOLOGÍA

El área estudiada es compleja desde el punto de vista geológico, con numerosas unidades geológicas pertenecientes a las Zonas Externas y Zonas Internas de las Cordilleras Béticas (Figura 3). Entre las primeras, aparecen varias unidades geológicas correspondientes al dominio de la Zona Subbética, concretamente al Subbético medio y Subbético interno, apareciendo, también, materiales del "Triás de Antequera". Este último, compuesto fundamentalmente por materiales arcillosos y evaporitas de gran potencia, no constituye un dominio paleogeográfico definido, sino que procede de la base de las unidades subbéticas adyacentes, aunque, desde el punto de vista tectónico es una unidad totalmente independiente. Al Subbético medio central pertenecen unos pequeños afloramientos de margas y margocalizas del Cretácico inferior, dispersos en el sector septentrional de la región, junto al Hacho de Loja. Al Subbético medio meridional se atribuyen, por afinidad, las unidades correspondientes al Complejo de la "Alta Cadena", incluida la unidad del Gallo-Vilo, a cuyo conocimiento geológico contribuyó Manuel del Valle (Magné *et al.*, 1969). Las unidades de Sierra Gorda, Hacho de Loja y Zafarraya se atribuyen al dominio Subbético interno, si bien, las dos últimas muestran características de transición hacia otros dominios situados más al norte y sur, respectivamente.

Una característica litológica común a todas las unidades del Subbético y Penibético es que contienen una formación carbonatada liásica, calizo-dolomítica, bastante potente (más de 200 m), que descansa sobre materiales detrítico-evaporíticos triásicos. Las dolomías, secundarias, se presentan muy brechificadas. Sobre ellas descansan con contacto difuso las calizas, de tonos generalmente claros, con estratificación generalmente masiva, a veces con sílex, crinoides u otros rasgos diferenciadores. El resto de la serie jurásica varía notablemente de unas a otras unidades, constituyendo el criterio diferenciador de los distintos dominios. Así, en la unidad de Sierra Gorda y las unidades correspondientes al Penibético, se observa una formación de potencia decamétrica de calizas nodulosas. En el resto de las unidades la litología es más variada, existiendo además de las calizas nodulosas, radiolaritas, calizas con sílex y materiales margosos y margocalizos que predominan en todos los casos. Los términos más modernos del Cretácico-Paleógeno son también esencialmente margocalizos en todo este dominio.

Al sur y al este de la Unidad de Zafarraya afloran importantes extensiones del Complejo Colmenar-Periana (Blumenthal, 1931), cuya posición paleogeográfica original sería intermedia entre las Zonas Internas y las Zonas Externas. Se trata de un conjunto de unidades tectónicas superpuestas, con estructura bastante caótica, constituidas por materiales oligocenos y del Mioceno inferior, los cuales muestran un desarrollo predominante de facies flysch (materiales margosos o arcillosos de color rojo o verde con intercalaciones poco frecuentes de areniscas).

Como elementos de las Zonas Internas aparecen unidades pertenecientes sobre todo a dos grandes dominios tectónicos y paleogeográficos: Alpujárrides y Rondaides o "Dorsal Bética". Los Alpujárrides están constituidos por un apilamiento de mantos que afloran al sur y sureste del área de estudio, dominando por su extensión la unidad de Sierra Tejada. Los rasgos estratigráficos son comunes a todos ellos: un zócalo pretriásico de esquistos que intercalan mármoles en afloramientos lenticulares, y una cobertera carbonatada, frecuentemente metamorfozizada (mármoles) de edad triásica y en facies alpina. Se distinguen cuatro unidades correspondientes a tres mantos alpujárrides, siendo la más inferior la de Sierra Tejada, de la que sólo afloran en este área los mármoles superiores de la serie (Elorza y García Dueñas, 1979). Según Martín Algarra (1987), en una posición tectónica equivalente a la de los Alpujárrides se situarían los aflora-

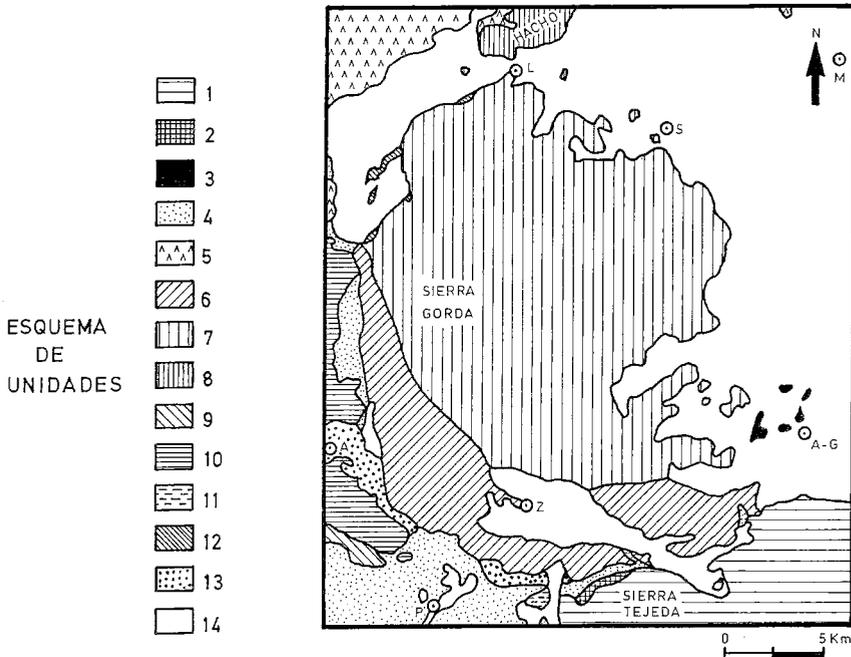


Figura 3.- Unidades y dominios geológicos presentes en el área estudiada: 1, Complejo Alpujárride; 2, Complejo Maláguide; 3, Dorsal Bética o Rondaides; 4, Complejo Colmenar-Periana; 5, Trías de Antequera; 6, Unidad de Zafarraya; 7, Unidad de Sierra Gorda; 8, Unidad del Hacho de Loja; 9, Penibético; 10, Complejo de la Alta Cadena; 11, Unidad de Zalia; 12, Formación Tajea; 13, Formación Santana; 14, materiales neógenos y cuaternarios "postorogénicos". Poblaciones: L, Loja; S, Salar; M, Moraleda de Zafayona; A-G, Alhama de Granada; Z, Zafarraya; A, Alfarnate; P, Periana.

mientos Rondaides de los Baños de Alhama, que otros autores (Busnardo *et al.*, 1969) atribuyen a la "Dorsal Bética". Desde el punto de vista litológico, la serie consiste en una alternancia de bancos calizos decamétricos y margas o margocalizas con intercalaciones ocasionales de calizas nodulosas; a techo de la serie aparecen calizas con sílex. La potencia del conjunto es superior a 120 m.

Por último, hay que señalar la importante extensión que alcanzan los materiales neógeno-cuaternarios "postorogénicos", los cuales rellenaron desde el Mioceno superior las depresiones tectónicas de Granada (y su prolongación occidental al oeste de Loja) y la de Zafarraya. De forma resumida, la sucesión estratigráfica consiste en conglomerados cementados y calcarenitas bioclásticas de cemento calizo, con varias decenas de metros de potencia. Sigue una potente sucesión, de más de 150 m, formada esencialmente por lutitas ocreas y margas azuladas con intercalaciones de algunos niveles finos de calcarenitas bioclásticas hacia la base y de un tramo evaporítico lacustre hacia el techo. A continuación se observan margas y margocalizas, niveles de lignito y brechas calcáreas que, lateralmente y sobre todo hacia el techo, pasan a calizas y margocalizas blancas, rara vez con más de 20 m de potencia.

Los materiales depositados durante el Plioceno-Pleistoceno inferior, discordantes sobre los anteriores, consisten en conglomerados y arenas dominantes, a veces intercalados entre lutitas, de colores blancos o rojizos. Estas facies, a su vez, cambian a margas y calizas claras lacustres, y algunos niveles de lignitos interestratificados. Las calizas son más frecuentes hacia la parte alta de la serie. En conjunto, el espesor de estos materiales puede sobrepasar los 200 m.

Por último, los materiales del Pleistoceno-Holoceno son muy diversos, desde el punto de vista litológico y genético: depósitos coluviales correspondientes a conos de deyección, derrubios y deslizamientos de ladera, y depósitos de piedemonte, compuestos por materiales detríticos cementados o no; materiales detríticos aluviales, asociados a la red de drenaje actual o reciente de los grandes cursos fluviales de la región, así como de los poljes de Zafarraya, la Dona y Pilas Dedil, donde coexisten con arcillas de descalcificación; también travertinos ligados a los principales manantiales.

Respecto a la estructura geológica de esta región, cabe decir que es de gran complejidad debido a las importantes deformaciones tectónicas acontecidas en varias fases compresivas y distensivas, y a la cercanía del contacto Zonas Externas-Zonas Internas. La unidad de Sierra Gorda representa un gran domo alargado según la dirección norte-sur, resultado de la superposición de dos sistemas de plegamiento con ejes de dirección N 30°-50° E y N 150° E. Los primeros son, en general, de gran radio, abiertos, y más visibles en el sector septentrional del macizo, gracias a la buena estratificación que presentan allí las calizas liásicas. Los segundos son pliegues asimétricos vergentes hacia el suroeste, cuyos flancos invertidos son considerablemente más cortos que los normales. En los núcleos de los sinclinales se han preservado con frecuencia los términos más altos de la serie estratigráfica (Figura 4). La estructura general de la unidad de Zafarraya responde a un anticlinorio vergente que sufre un arqueamiento en planta desde la dirección NNO-SSE a ENE-OSO, con la concavidad hacia el noreste, adaptándose a los bordes occidental y meridional de la unidad de Sierra Gorda. Ambas unidades aparecen afectadas de una intensa fracturación. Por último, la estructura interna del Hacho de Loja es, a grandes rasgos, la de un anticlinal muy fragmentado, en cuyo núcleo afloran las dolomías basales. A favor de algunas fracturas se han producido "extrusiones" de los materiales triásicos infrayacentes.

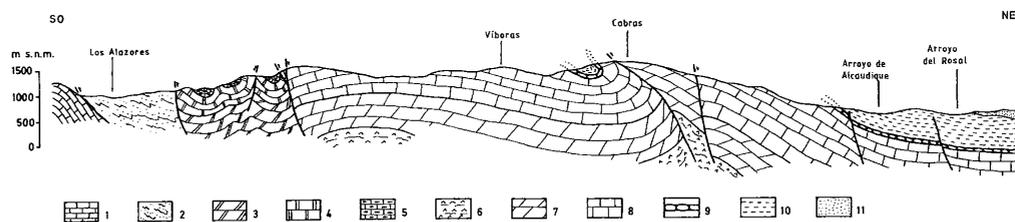


Figura 4.- Corte geológico. 1, Complejo de la Alta Cadena. 2, Complejo Colmenar-Periana. Unidad de Zafarraya: 3, dolomías basales; 4, calizas blancas liásicas; 5, calizas con sílex. Unidad de Sierra Gorda: 6, substrato triásico; 7, dolomías basales; 8, calizas blancas liásicas; 9, calizas nodulosas; 10, margas y margocalizas cretácicas; 11, Mioceno superior.

Los límites de las unidades así como las relaciones mutuas entre conjuntos tectónicos son objeto de numerosas discusiones por parte de los investigadores que han trabajado y trabajan en

las Cordilleras Béticas. Por otra parte, el recubrimiento neógeno y cuaternario impide realizar observaciones directas sobre la disposición de las unidades con materiales preorogénicos en numerosos puntos de la región. Presumiblemente, la unidad de Sierra Gorda, en su borde noroeste y en profundidad, debe entrar en contacto con materiales del Complejo Colmenar-Periana y/o con materiales del Triás de Antequera. En el borde norte, en Loja, su relación con el Hacho de Loja permanece oculta bajo los materiales pliocenos y cuaternarios; se podría pensar (Vera, 1966) que ambas unidades entran en contacto por medio de una superficie de cabalgamiento que superpondría a la unidad de Sierra Gorda sobre la del Hacho de Loja, posibilidad muy remota si, como defienden algunos investigadores (Sanz de Galdeano, 1983), el accidente Cádiz-Alicante discurre por este sector. Otras fracturas de dirección N 140-150° E posiblemente constituyan el límite oriental de esta unidad, mientras que en el borde sureste, la unidad desaparece bajo el relleno neógeno y cuaternario de las depresiones de Pilas Dedil y de la Dona. El contacto con la Unidad de Zafarraya es muy vertical, aunque, en el sector occidental, la unidad de Sierra Gorda se superpone ligeramente, mediante fallas inversas o de desgarre, a la unidad de Zafarraya.

EL ACUÍFERO DE SIERRA GORDA

Definición, geometría y límites

El acuífero de Sierra Gorda se extiende desde Loja (provincia de Granada) hasta las proximidades de Periana (provincia de Málaga), con una longitud próxima a 25 km de norte a sur. Su anchura máxima (20 km de oeste a este) se alcanza en el sector central, desde la sierra de Gibalto a Venta Quesada. Presenta pues una morfología en planta elíptica. Más alargada de norte a sur, con irregularidades en el sector meridional.

El sistema hidrogeológico de Sierra gorda (*s. l.*) se compone esencialmente de la unidad hidrogeológica de Sierra Gorda, del acuífero detrítico del polje de Zafarraya y de materiales neógenos calcareníticos que rellenan esta última depresión. El avance en la investigación y el conocimiento del sistema podría llevar a incluir dentro del mismo a la totalidad o a parte de las unidades geológicas de Gibalto (al oeste) y Hacho de Loja (al norte), así como diversos afloramientos carbonatados jurásicos y otros calcareníticos miocenos situados en el borde suroriental (zona del balneario de Alhama y sector de cabecera del polje de Zafarraya).

Según diversos estudios realizados en la región (Guzmán del Pino, 1987; DGOH-CHSE, 1988 y 1991; López chicano y Pulido Bosch, 1989; Guzmán del Pino *et al.*, 1991; DGOH-CHG, 1995) dentro de la subunidad carbonatada de Sierra Gorda se distinguen varios sectores y compartimentos con cierto grado de independencia en su funcionamiento hidrogeológico, aunque sin desconexión hídrica, definidos sobre la base de criterios estructurales y piezométricos: Sector occidental de Sierra Gorda, Sector oriental de Sierra Gorda, Sector Sierra de Alhama y Sector Torrecilla-Los Revuelos.

Para simplificar, consideraremos que el acuífero carbonatado de Sierra Gorda (*s. str.*) está compuesto principalmente por los materiales calizos y dolomíticos del Triás superior al Lias medio de dos unidades geológicas: la unidad de Zafarraya (sólo parte de la unidad definida originalmente por Vera, 1966) y la unidad de Sierra Gorda. El comportamiento de estos materiales es claramente acuífero debido a la intensa fracturación y karstificación (al menos superficial) que presentan, lo cual permite suponer "*a priori*" una alta conductividad hidráulica y una gran

potencialidad hidrogeológica de todo el conjunto. Estos materiales afloran con una superficie de 293 km² (Figura 5), mientras que en profundidad, bajo otros materiales que los confinan, su extensión debe aproximarse a los 400 km². El espesor de estos materiales es desconocido, aunque podría alcanzar hasta 1000 m. También se deben considerar como parte del acuífero los afloramientos, generalmente minoritarios y de escasa potencia, de materiales calizos (calizas nodulosas o calizas con sílex) de edad jurásico medio y superior de ambas unidades geológicas. Los materiales cretácicos y paleógenos presentan baja permeabilidad, aunque, localmente y a favor de niveles más calizos, estas rocas pueden tener un comportamiento acuitardo, como demuestra la existencia de algunas captaciones de bajo rendimiento.

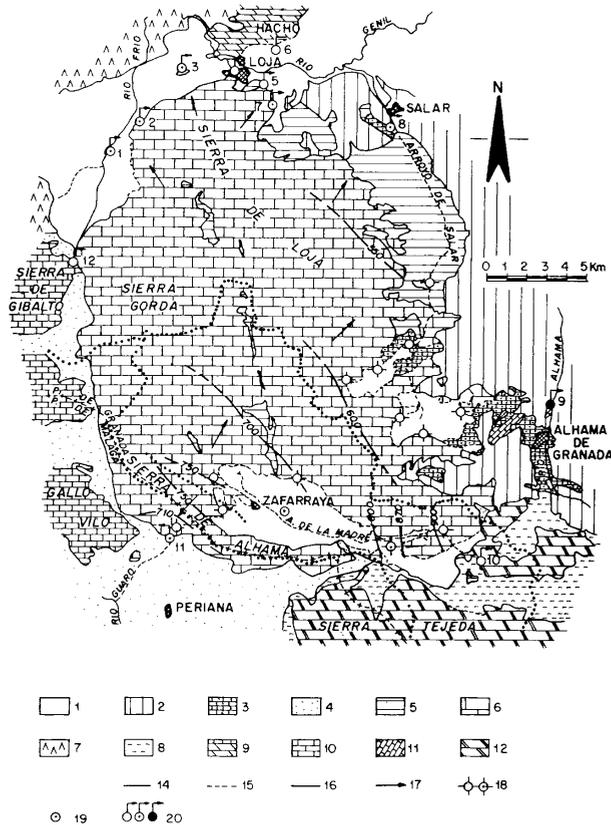


Figura 5.- Esquema hidrogeológico del acuífero de Sierra Gorda. 1, materiales detríticos del Plioceno-Cuaternario; 2, margas y limos del Mioceno; 3, calcarenitas del Mioceno; 4, arcillas y areniscas del Oligoceno-Mioceno; 5, margas cretácicas; 6, calizas y dolomias jurásicas; 7, arcillas, yesos y dolomias del Triásico; 8, esquistos; 9, acuífero del Hacho de Loja (calizas y dolomias jurásicas); 10, acuífero de la Alta Cadena (Jurásico); 11, calizas de la Dorsal o Rondaides; 12, mármoles del dominio Alpujárride; 13, corte hidrogeológico representativo (Figura 6); 14 y 15, curso fluvial perenne o estacional; 16, línea isopieza; 17, línea de corriente estimada; 18, sondeo y grupo de sondeos; 19, grupo de pozos de gran radio; 20, manantial, grupo de manantiales y manantiales termales. Los principales manantiales son: 1, La Tajea; 2, Riofrío; 3, Plines-Genazal; 4, Loja; 5, Yola; 6, Frontil; 7, Manzanal; 8, Bañuelo y Membrillo; 9, Baños de Alhama; 10, Nacimientos de Parrilla; 11, Guaro; 12, Charcón.

De la base impermeable del acuífero kárstico se desconocen sus características y profundidad, pero parece lógico que se trate de los materiales de baja permeabilidad del Triás de Antequera (Figura 6). El borde sur y suroriental está constituido por los materiales, prácticamente impermeables, del Complejo Colmenar-Periana y de la formación Santana, a los que se superpone la unidad de Zafarraya mediante fallas inversas muy verticalizadas. El límite sureste, en el sector de la Alcaicería es similar al anterior. En este caso, los materiales impermeables del Complejo Colmenar-Periana y del Málagaide aseguran la estanqueidad de buena parte del mismo. Entre este sector y las proximidades de Alhama de Granada, el acuífero se encuentra recubierto por materiales postorogénicos de la depresión de Granada, desconociéndose la disposición de las unidades de Zafarraya y de Sierra Gorda con respecto a la unidad de los Baños de Alhama. La desconexión hídrica del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda con los materiales de los Baños de Alhama es segura ya que el nivel piezométrico de Sierra Gorda se sitúa muy por debajo de la cota de emergencia de los manantiales termominerales.

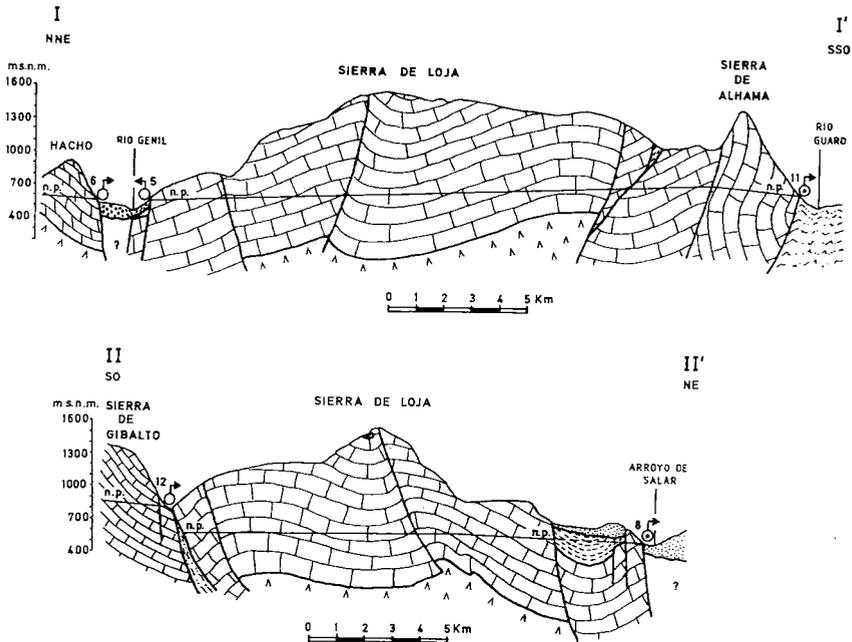


Figura 6.- Cortes hidrogeológicos representativos (Figura 5).

El borde este y noreste, entre Venta Quesada y el Rincón de Alcaudique, está jalonado esencialmente por las margas y margocalizas del Cretácico de la unidad de Sierra Gorda, por lo que se trata de un borde impermeable. Sin embargo se desconoce el límite del acuífero bajo el Cretácico confinante, ya que el flanco oriental del sinclinal que lo afecta está cubierto por materiales neógenos y pliocenos de la depresión de Granada. Es posible que estos materiales constituyan, principalmente, el impermeable que limite al acuífero en profundidad, a favor de las fracturas de dirección NO-SE visibles en superficie sobre los materiales cretácicos. Probablemente todo el sinclinal esté afectado por numerosas fracturas que compartimentan al Jurásico, dejando

bloques levantados y otros hundidos, bajo los materiales cretácicos (Figura 6). El límite septentrional y noroccidental está constituido por formaciones muy diversas. Por un lado, en las proximidades de Loja, aflora el Cretácico de la unidad de Sierra Gorda, produciéndose una descarga importante del acuífero a través de los manantiales del Manzanil y Yola o Terciado. En todo este sector norte y noroeste afloran con frecuencia los materiales del Plioceno en sentido amplio, que se superponen al acuífero de Sierra Gorda o bien lo delimitan en las partes más bajas.

Piezometría

Hidalgo (1974 a y b) trazó los primeros mapas de isopiezas basándose en los datos piezométricos registrados por el SGOP en el sector noroccidental del polje de Zafarraya, correspondientes a los periodos de aguas altas y aguas bajas del año 1969. Este autor identificó en este sector la existencia de una divisoria hidrogeológica que separaría el flujo que se produce hacia el norte (sector de Loja-Riofrío) del que se produce hacia el sur (sector de Guaro). Esta divisoria cambiaría de forma y posición relativa, dependiendo de que se trate de un periodo húmedo o de un periodo seco, pero el gradiente siempre sería menor hacia el norte (mayor transmisividad del acuífero en ese sentido) que hacia el sur. Cabe la posibilidad de que en periodos muy secos esta divisoria desaparezca y todo el acuífero se drene hacia el norte, según se desprende de algunos registros piezométricos llevados a cabo en el sondeo de abastecimiento a Periana, junto al manantial de Guaro (IGME, 1983a).

La construcción de nuevos puntos de observación y el seguimiento temporal de las oscilaciones del nivel freático han podido extender las observaciones sobre la superficie piezométrica a un área mayor. No obstante, la red de piezómetros y la información disponible todavía siguen siendo muy escasos como para llegar a dar una visión correcta del régimen del manto en este acuífero. Así, dada la precariedad de los datos y teniendo en cuenta las peculiaridades que presenta la circulación de las aguas subterráneas en los acuíferos kársticos, parece aconsejar referirse mejor a una pseudopiezometría o piezometría orientativa, más que a una piezometría real. Con estas premisas, se muestra un mapa aproximado con la posición media de los niveles piezométricos (Figura 7). Para la realización de este mapa nos hemos basado en la localización altimétrica de las surgencias que drenan el acuífero, así como en los niveles medios registrados en la mayoría de los piezómetros disponibles actualmente y en la cota de fondo que han alcanzado determinados sondeos que no llegaron a cortar la superficie piezométrica. Cabe destacar la importancia de la componente norte del flujo en buena parte del macizo, así como la existencia de una franja no saturada de espesor medio cercano a 700 m en una amplia extensión del acuífero, cuyo papel en el funcionamiento hidrodinámico del sistema no debe ser nada despreciable.

La cota de los grandes manantiales del sector de Loja-Riofrío desciende paulatinamente hacia el norte, entre 530 y 470 m s.n.m., aunque no hay correspondencia entre el caudal de las surgencias y la altitud a la que se sitúan éstas, es decir, los manantiales más caudalosos no son los de cota más baja. Por otra parte, la divisoria hidrogeológica que se localiza en las proximidades de Zafarraya parece coincidir bastante bien con la posición de un afloramiento de dolomías de la unidad de Zafarraya.

Los niveles piezométricos de mayor cota absoluta corresponden al sector oriental del polje de Zafarraya, especialmente en el entorno de la Alcaicería (unos 900 m s.n.m.). En este sector se establece un flujo en sentido oeste, con gradiente relativamente elevado (2,5 %), que probablemente viene condicionado por la recarga natural procedente de la infiltración del arroyo de la

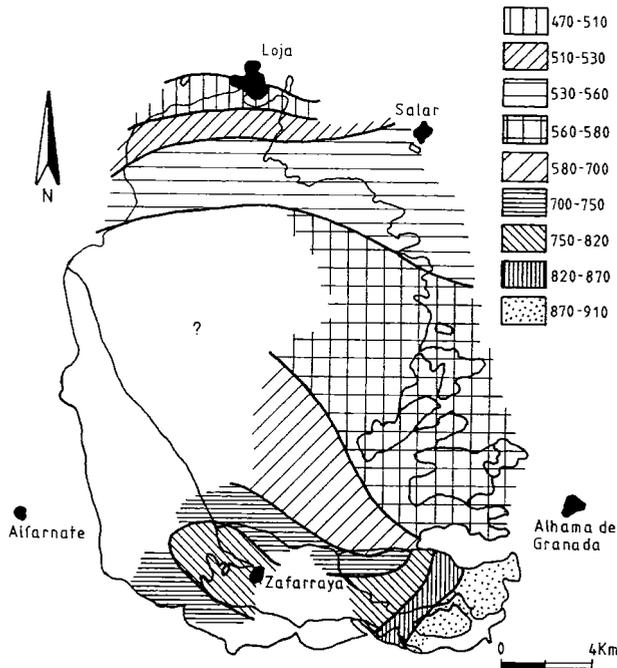


Figura 7.- Posición media aproximada de los niveles piezométricos del acuífero carbonatado de Sierra Gorda. Los valores están expresados en m s.n.m.

Madre a su entrada al polje de Zafarraya. En este área, sobre todo en las proximidades de Venta Pérez y en período de estiaje, aparece una depresión de la superficie piezométrica debida a las extracciones que se llevan a cabo en las excesivamente concentradas captaciones de este sector.

En el sector de los poljes de la Dona y Pilas Dedil y proximidades del cortijo Salcedo (inicio del Barranco de Salar), la cota media de los niveles (550-560 m s.n.m.) es muy próxima a la de los manantiales del sector septentrional del acuífero. Esta cota del nivel piezométrico descarta por completo la conexión hídrica del acuífero de Sierra Gorda con los manantiales termominerales de los Baños de Alhama (López Chicano y Pulido Bosch, 1989), situados 3 km al este, a 790 m de altitud. Manuel del Valle instruyó en la construcción de las primeras captaciones profundas llevadas a cabo en esta zona, las cuales han contribuido decisivamente al conocimiento hidrogeológico de esta parte de Sierra Gorda.

Existe un gran salto piezométrico en el acuífero carbonatado, entre el sector oriental del polje de Zafarraya y el sector de los poljes de la Dona y Pilas Dedil, próximo a 300 m, pese a que la distancia entre ambos lugares sólo es de 5 km. Cabe pensar, por tanto, en una cierta compartimentación del acuífero de Sierra Gorda, y con una cierta independencia del sector oriental del polje de Zafarraya (acuífero Torrecilla-Los Revuelos de Guzmán del Pino *et al.*, 1991). Es probable que exista una barrera de baja permeabilidad próxima al contacto entre las unidades geológicas de Sierra Gorda y Zafarraya, que, sin embargo, no llegaría a producir una descon-

ción total del sector oriental del polje de Zafarraya, sino que permitiría el flujo, aunque con un gradiente muy elevado. La existencia de una fractura que separa dos bloques en los que el substrato impermeable se halla a diferente profundidad (menos profundo en el bloque con niveles piezométricos más altos) podría explicar este salto piezométrico.

Respecto a la evolución temporal de los niveles piezométricos, caben destacar las grandes oscilaciones que puede mostrar el manto freático en los sectores central y occidental del polje de Zafarraya, superiores incluso a 150 m en apenas tres días de lluvias intensas, las cuales tienen repercusiones en la ocurrencia de inundaciones prolongadas del polje (López Chicano *et al.*, 2002), al desaparecer prácticamente la zona no saturada en las inmediaciones de los sumideros del arroyo de la Madre. La Figura 8 muestra algunos de los registros llevados a cabo en la pasada década de los 80, observándose comportamientos diversos, como es frecuente en los acuíferos kársticos. Estas diferencias de detalle en el comportamiento del acuífero kárstico son a veces difíciles de explicar, dado que en la mayoría de los casos no se poseen datos precisos sobre las características constructivas de los piezómetros y la permeabilidad de los materiales atravesados. Sí es claro que responden a la existencia de estructuras con diferente difusividad hidráulica (T/S) en el seno del acuífero (conductos kársticos, macrofracturas, bloques microfisurados, sistemas anexos, "niveles colgados", etc.), junto a situaciones diferentes en las condiciones de alimentación. El piezómetro n° 119 muestra un nivel anormalmente alto y con oscilaciones mínimas, no correspondiendo al nivel piezométrico real del acuífero (se encuentra a menos de 100 m del sondeo n° 120), sino a un nivel colgado en un "bloque" carbonatado de baja conductividad hidráulica. El sondeo n° 115 muestra también un nivel casi estacionario, fiel reflejo del comportamiento hidrodinámico de las calcarenitas confinadas o semiconfinadas que se encuentran en el sector central del polje de Zafarraya.

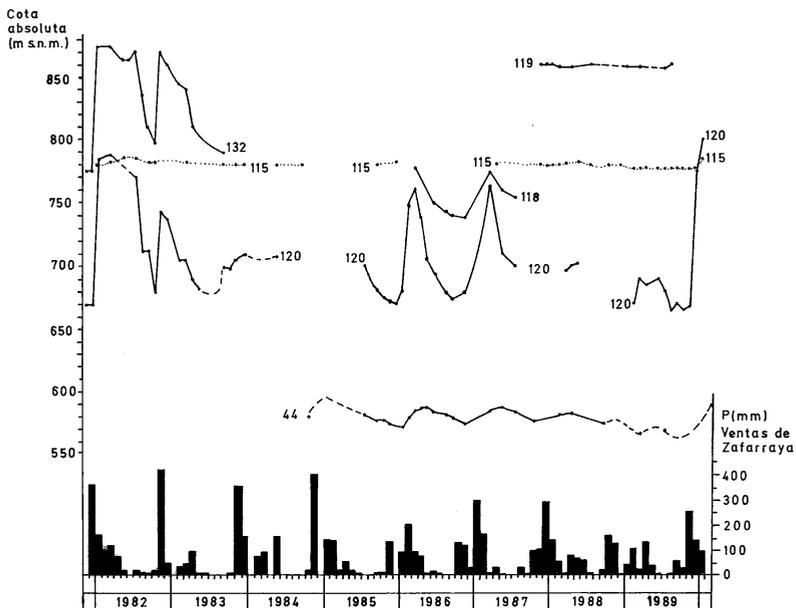


Figura 8.- Algunas series piezométricas mensuales registradas en el sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda durante la pasada década de los 80.

Parámetros hidráulicos

La acusada heterogeneidad y anisotropía que caracteriza con frecuencia a los acuíferos kársticos aconseja llevar prudencia en la interpretación del significado de los valores de los parámetros hidrogeológicos obtenidos por diferentes métodos experimentales. Por otro lado, para alcanzar una idea aproximada del comportamiento general del acuífero kárstico es necesario disponer de una gran cantidad de datos distribuidos estratégicamente por todo el sistema hidrogeológico, lo cual, en el caso que nos ocupa es imposible, ya que los sondeos de explotación e investigación se localizan en sectores muy concretos y marginales; pero, además, pese al número relativamente alto de sondeos realizados, los datos que se poseen sobre los mismos son poco fiables, lo cual dificulta aún más el estudio hidrogeológico. Dicho esto, los valores que se han recopilado aquí deben ser considerados como orientativos.

El gradiente hidráulico de la superficie piezométrica varía de unos sectores a otros y con el tiempo, es decir, según que existan condiciones de recarga intensa o no. En aguas bajas, los valores más altos del gradiente (hasta un 7 %) se han observado para el sector de tránsito entre la unidad de Zafarraya (en su parte oriental) y la unidad de Sierra Gorda, debido a la baja conductividad hidráulica de este área. Entre la divisoria hidrogeológica próxima a Zafarraya y el sector de Loja se deduce un gradiente medio del orden de 1,3 % (próximo al informado por Delgado Moya *et al.*, 1974); sin embargo, este gradiente no parece ser constante, e iría disminuyendo progresivamente hacia el norte (0,8 % entre los poljes de la Dona y Pilas Dedil). Desde esa misma divisoria y hacia Guaro el gradiente es del 2,2 %, superior al establecido hacia el norte. Hidalgo (1974 a) considera que el gradiente más elevado hacia el sur se debe a la existencia de una barrera de baja permeabilidad entre Zafarraya y el sector de Guaro, constituida por los materiales cretácico-paleógenos de la unidad de Zafarraya. En el sector oriental del polje de Zafarraya el flujo que se dirige hacia el oeste muestra un gradiente algo superior al 2 %, tanto en aguas bajas como en aguas altas. En esta última situación, todos los gradientes se muestran con un valor mucho más elevado (1,8 % entre Zafarraya y Loja; 4,9 % entre Zafarraya y Guaro), salvo en el área de tránsito entre la unidad de Zafarraya y la unidad de Sierra Gorda, en el sector oriental del polje de Zafarraya, donde el gradiente parece descender al 2,1 %.

Respecto a la velocidad real o de circulación, los únicos datos disponibles son los correspondientes a las campañas de trazado con colorantes referidos en Hidalgo (1974 a), IGME (1983 a) y los inéditos de Vega Otero (1997). De los datos referidos en el relato de 1930 (IGME, 1983 a) parecen deducirse velocidades muy altas, superiores a 1000 m/d. En la campaña del SGOP (Hidalgo 1974 a) se obtienen valores de 150-200 m/d para el sector occidental del polje de Zafarraya, unos 550 m/d hacia el sector de Riofrío, en torno a 400 m/d o menos hacia los manantiales de Yola y Manzanil, y del orden de 200 a 340 m/d hacia el manantial de Guaro. Vega Otero (1997) obtiene velocidades de flujo comprendidas entre 300 y 500 m/d en una campaña de trazado con LiCl llevada a cabo en el área nororiental del acuífero, en la zona de descarga del Manzanil y núcleo urbano de Loja. En este ensayo de trazado se obtuvieron valores del coeficiente de dispersión longitudinal muy variables, comprendidos entre 0.0088 y 0.1312 m²/s.

En la Tabla 1 se recogen algunos resultados sobre transmisividad y caudales específicos obtenidos en ensayos de bombeo. Estos datos responden a sondeos productivos, mientras que existen otras perforaciones que, tras alcanzar la franja saturada del acuífero, suministraron caudales tan bajos (inferiores a 2 l/s) que no mereció la pena llevar a cabo el ensayo y no se instalaron con bomba.

IGME (1983 a) obtiene unos valores medios de transmisividad en torno a 1500-2500 m²/d, a partir de los valores extremos de recarga anual por surgencias, del gradiente hidráulico medio y de la longitud del borde de descarga. Este valor contrasta con el obtenido por Hidalgo (1974 a), en torno a 90 m²/d, estimado a partir de la descarga anual del acuífero, las oscilaciones piezométricas y la difusividad hidráulica calculada en el polje de Zafarraya.

El hecho de que sean numerosas las surgencias que drenan el acuífero parece sugerir una baja permeabilidad de todo el conjunto kárstico, aunque este parámetro debe aumentar en las proximidades de los puntos de descarga, hacia donde convergen las líneas de flujo. Los altos valores de transmisividad obtenidos en el sondeo de Guaro (Tabla 1), parecen confirmar esta hipótesis.

Sector	Q (l/s)	q _s (l/s.m)	q _{su} (l/s)	T (m ² /d)	K aparente (m/d)
Cjo. Salcedo	80	9	0.1	12000	110
Venta Dona	85	79	1.26	7900	125
Cjo. Revuelos	12	0.5	0.005	12	0.12
Cjo. Revuelos	95	3.3	0.038	430	5
Torrecilla-Revuelos	90	3.2	0.02	790	6
Torrecilla-Revuelos	35	0.4	0.003	40	0.3
Torrecilla-Revuelos	70	1.2	0.009	550	4
Torrecilla-Revuelos	40			1100	
Guaro	104	225	3.5	13600	210

Tabla 1.- Resultados obtenidos en los bombeos de ensayo realizados en algunos de los sondeos que captan el acuífero kárstico de Sierra Gorda. Q = caudal bombeado; q_s = caudal específico o caudal por metro de descenso; q_{su} = caudal específico unitario o caudal específico por metro de espesor saturado captado; T = transmisividad; K aparente = conductividad hidráulica estimada según el espesor captado de franja saturada.

Por otro lado, se tiene escasa información sobre los valores que puede alcanzar el coeficiente de almacenamiento, ya que sistemáticamente no se han usado piezómetros de observación durante las pruebas de bombeo. Hidalgo (1974 a) estima un valor del 1,5 %, a partir del volumen drenado por surgencias durante el año 1969 (100 hm³), y según la oscilación máxima de un piezómetro situado próximo a la divisoria hidrogeológica de Zafarraya. Sin embargo, este autor considera sólo una parte de la descarga por manantiales de Sierra Gorda, por lo que el valor de S sería ligeramente superior, en torno al 2 %, si se considera la descarga de otros manantiales (grupo de Loja, Plines, etc.).

En cuanto a la difusividad hidráulica (relación entre la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento), Hidalgo (1974 a) obtiene un valor del orden de 6000 m²/d, a partir de la variación del nivel de agua en tres piezómetros alineados según el sentido de flujo. Esta cifra podría considerarse representativa del sector nororiental del polje de Zafarraya. IGME (1983 a) obtiene, a partir de los coeficientes de agotamiento calculados en los hidrogramas de las principales surgencias, unos valores de D comprendidos entre 3·10⁵ y 1,3·10⁶ m²/d, en el sector septentrional del acuífero; para el sector de Guaro estiman dos rangos de valores, uno de 5,3·10⁴ a 1,4·10⁵ m²/d (para caudales de la surgencia de 40 a 400 l/s) y otro más alto de 2,4·10⁵ a 1,3·10⁶ m²/d (para caudales de 1 a 350 l/s).

Comportamiento hidrodinámico

En los acuíferos kársticos, la información obtenida del análisis piezométrico y de los ensayos de bombeo llevados a cabo, en lugares muy localizados no suministra una información generalizada sobre el comportamiento hidrodinámico general del acuífero, algo que es necesario conocer para desarrollar una correcta gestión de sus recursos hídricos. En cambio, el análisis de la descarga por los manantiales sí. Por regla general, el hidrograma traduce una respuesta "media" al impulso pluviométrico, siendo más representativa del comportamiento hidrodinámico que los datos puntuales obtenidos en ensayos de bombeo y experiencias con trazadores.

Los datos de caudal de las principales surgencias del acuífero, tomados con una periodicidad diaria como mínimo, son escasos o no existen simplemente, lo cual limita mucho el llegar a conclusiones fiables. No obstante, incluso de los aforos mensuales existentes es posible extraer alguna información. Así, se observan diferencias morfológicas notables entre los manantiales del borde sur (Guaro) y norte del acuífero (por ejemplo Riofrío), tal como se aprecia en la Figura 9. Las variaciones de caudal en Guaro (coeficiente de variación de 146 %) son mucho mayores que en los manantiales del sector de Loja (15 al 70 %), claramente relacionado con una mayor karstificación en el caso de Guaro y su comportamiento como manantial tipo "trop plein". En las surgencias del norte se aprecia una mayor variabilidad de la descarga en los manantiales de mayor cota (la Tajea y el Manzanil). También en el norte se registran los coeficientes de agotamiento más bajos, por regla general inferiores a 0.001 d^{-1} , mientras que en Guaro este coeficiente es próximo a 0.02 d^{-1} . Todo ello podría sugerir un menor desarrollo progresivo de la permeabilidad o de la karstificación funcional hacia las zonas más bajas y profundas del acuífero.

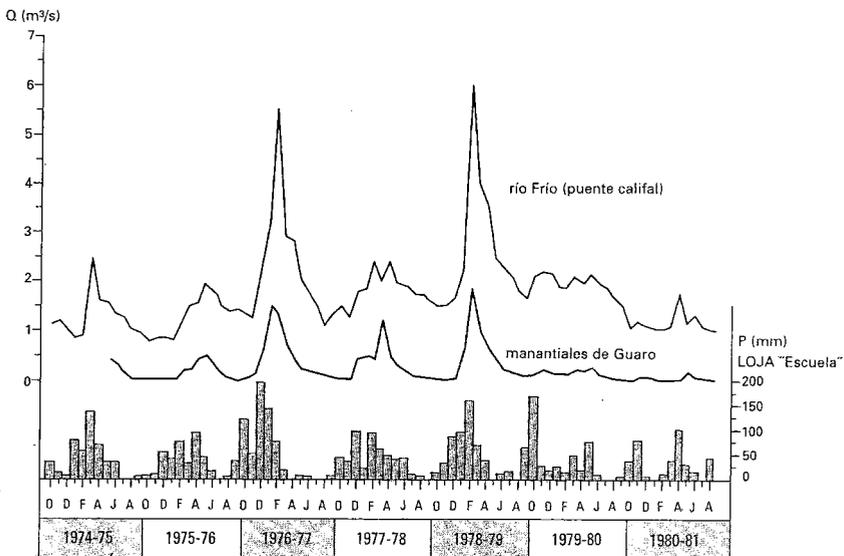


Figura 9.- Caudales mensuales, medios de los diarios, en los manantiales de Guaro y en la estación de aforos del puente califal de Riofrío. Los aportes de Sierra Gorda a este último punto suponen el 91 % del total.

Los tiempos medios de respuesta a los impulsos pluviométricos son importantes, probablemente superiores a una semana, a nivel general. La memoria del sistema también es alta, en cualquiera de los casos superior a 40 días. Así pues, el análisis de la descarga por manantiales, según los datos disponibles, indica que el sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda presenta un comportamiento hidrodinámico más próximo al de un medio fisurado u homogéneamente karstificado que al de un medio fuertemente heterogéneo y anisótropo. La regulación natural del sistema es, por lo tanto, muy importante, pese a tratarse de un acuífero en materiales karstificados.

Ciertas diferencias y desfases observados entre las descargas por distintos manantiales del sector norte del acuífero de Sierra Gorda parecen sugerir un flujo preferencial (aunque no único) a favor de las fracturas que han actuado más recientemente en distensión, como es el caso de Riofrío (López Chicano, 1994).

Hidroquímica, calidad y contaminación

La facies hidroquímica dominante en este acuífero es la bicarbonatada cálcica, y en menor medida la bicarbonatada magnésica, como sería lo esperable de su composición litológica. No obstante, existen surgencias con un quimismo anómalo, como son las del sector de Salar (manantiales del Bañuelo, Menbrillo y Fuente Alta), con facies que va desde bicarbonatada-clorurada cálcico-sódica a bicarbonatada-sulfatada cálcico-magnésica. Estas surgencias muestran, además, un cierto carácter hipotermal, con temperatura media próxima a 20 °C. Todo ello indica un origen profundo para éstas aguas, lo cual está de acuerdo con la geometría del acuífero en ese sector.

La variabilidad hidroquímica espacial que muestran las aguas de las surgencias de Sierra Gorda (Figura 10) puede ser explicada teniendo en cuenta diversos factores:

- Cota de la surgencia: los manantiales más altos están ligados a zonas más transmisivas y a flujos menos profundos, por lo muestran aguas menos mineralizadas, más frías y con una composición que depende únicamente de la disolución de calcita y/o dolomita.
- Relación directa o no con la franja saturada: existen manantiales relacionados con la zona epikárstica, a menudo situados en las partes más altas de la sierra. Muestran aguas frías y de muy baja mineralización, con escasa concentración de sulfato y cloruro, pero frecuentemente están saturadas en bicarbonato cálcico.
- Tiempo de permanencia del agua en el acuífero: las aguas drenadas por los manantiales de Plines, Genazal y Borbollote parecen mostrar una composición química más evolucionada, con mayores contenidos en sulfato y cloruro, pudiendo estar afectadas de procesos de dedolomitización.
- Lavado de sales en profundidad: los contenidos en cloruro (y probablemente de otros iones como sulfato, sodio y potasio) de las aguas drenadas por el borde septentrional no pueden proceder de la concentración por evaporación previa a la infiltración, si no que deben ser aportadas desde el substrato evaporítico de edad Triásico.

El control hidroquímico sistemático de las características fisicoquímicas de algunas de las surgencias revela dos hechos interesantes: la existencia de un flujo pistón, que es interpretado como una movilización de las aguas más profundas de las reservas del acuífero carbonatado de Sierra Gorda, durante los momentos de crecida (López Chicano *et al.*, 1996 a); y un comportamiento hidroquímico de las surgencias relativamente homogéneo, que implica un comporta-

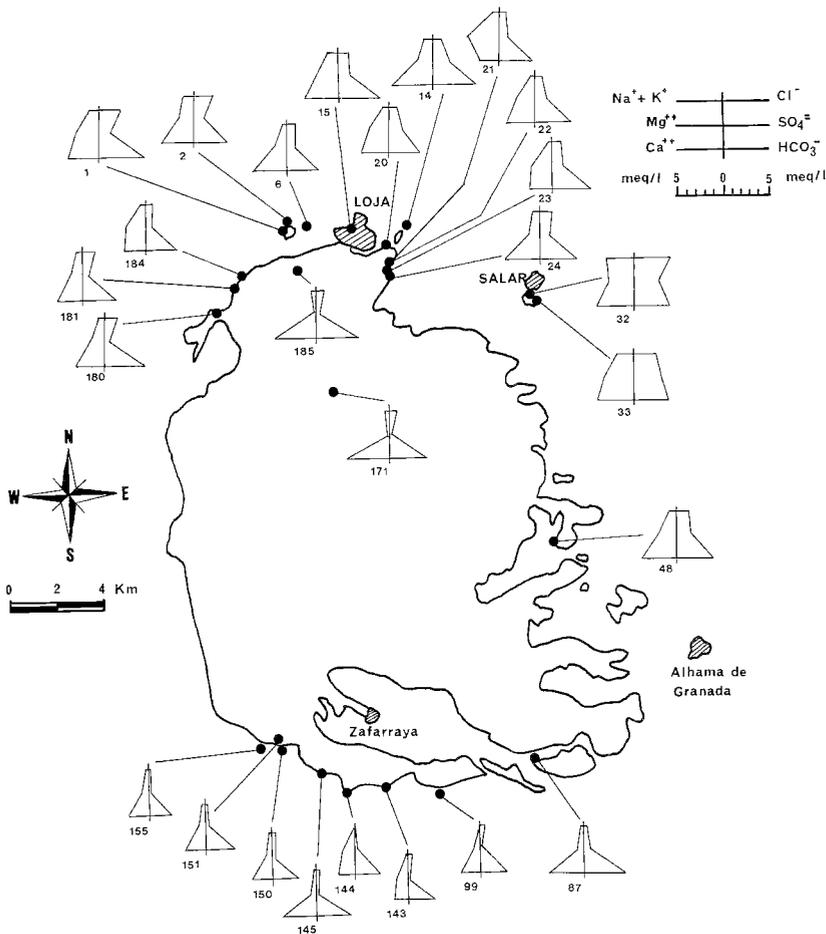


Figura 10.- Diagramas de Stiff modificados para las aguas drenadas por los principales manantiales de Sierra Gorda.

miento hidrodinámico más próximo al de un acuífero fisurado que al de un acuífero kárstico en sentido estricto (López Chicano, 1994).

Las aguas del acuífero carbonatado de Sierra Gorda son potables y de buena calidad para el regdío. No obstante, se han dado casos aislados de contaminación por materia orgánica en el manantial de Guaro y por microorganismos patógenos en los manantiales de la Tajera. Asimismo, la aplicación progresiva de mayores cantidades de fertilizantes en el polje de Zafarraya ha conllevado paralelamente un aumento en la concentración de nitrato (incremento medio anual de un 7 %) de las aguas drenadas por los manantiales del sector septentrional y de Guaro, sin que actualmente se superen los límites tolerables para aguas de consumo humano (López Chicano *et al.*, 1992).

Balance hídrico

Como entradas al sistema se tienen: la recarga de la lluvia (infiltración eficaz o lluvia útil, según los casos); la recarga indirecta por infiltración de aguas superficiales alóctonas (esencialmente por el arroyo de la Madre). Como salidas se tienen: las extracciones en pozos (bombeos netos); la descarga visible por manantiales; una probable descarga oculta a otros sistemas hidrogeológicos (Hacho de Loja ?) y al río Genil. La escorrentía superficial que escapa fuera del macizo se considera despreciable en el balance.

La infiltración eficaz a partir del agua de lluvia constituye la principal alimentación del sistema hidrogeológico, muy por encima de cualquier otra fuente de recarga. Ésta se estima en unos 120 hm³/a de media para los afloramientos carbonatados de Sierra Gorda y de unos 13 hm³/a para los acuíferos detríticos aluviales de los poljes de Zafarraya, de la Dona y de Pilas Dedil. Las entradas por este concepto totalizan, así, unos 133 hm³/a, siendo próxima a 10 hm³/a la transferencia oculta desde los acuíferos detríticos de los poljes al acuífero carbonatado.

Respecto a la recarga por infiltración de aguas superficiales procedentes del exterior del sistema hidrogeológico, una parte de la misma se produce en los acuíferos detríticos de los poljes, actuando éstos de filtro, y otra parte accede directamente al acuífero carbonatado de Sierra Gorda. Esta recarga indirecta se puede estimar en unos 5 hm³/a por término medio. Sumando esta cantidad a las entradas por infiltración de la lluvia resultan 138 hm³ de recarga media anual para todo el sistema hidrogeológico.

Aproximadamente, en la totalidad del sistema hidrogeológico, se bombean unos 12.2 hm³/a (DGOH-CHG, 1995), correspondiendo unos 3,6 hm³/a a las extracciones netas realizadas en los pozos excavados en materiales detríticos (López Chicano, 1994), y unos 8.6 hm³/a a los bombeos netos llevados a cabo sobre el acuífero carbonatado, destinados al regadío en los poljes y al abastecimiento de los núcleos urbanos del polje de Zafarraya y de la zona de Periana. La mayor parte de esos bombeos (unos 6.4 hm³/a) se llevan a cabo en el sector occidental del polje de Zafarraya o sector Torrecilla-Revueles.

La evaluación de las salidas por manantiales se estima en unos 114.2 hm³/a, correspondiendo más del 90 % a las surgencias de la zona de Loja, junto al valle del río Genil. Una pequeña parte (9 %) corresponde a la descarga del manantial de Guaro, al sur del macizo.

Sin tener en cuenta más términos que los reseñados anteriormente se observaría un claro desajuste en el balance hídrico, no justificándose totalmente las entradas al sistema. El valor residual resultante (11.6 hm³/a) se atribuye a la existencia de una descarga oculta hacia el río Genil, alimentación oculta a otro acuífero o bien a una falta de control de la descarga visible (López Chicano, 1994). Estos recursos podrían justificar la alimentación oculta hacia el acuífero del Hacho de Loja, aunque todavía existen muchos puntos oscuros en esa interpretación, como se verá más adelante.

EL ACUÍFERO DETRÍTICO DEL POLJE DE ZAFARRAYA

Este acuífero está compuesto por materiales aluviales arenosos y conglomeráticos sueltos, más o menos continuos y de escasa potencia, que se intercalan entre formaciones arcillosas aluviales o de descalcificación. Las arenas y conglomerados constituyen los niveles productivos, siendo su comportamiento el de acuífero poroso. Las arcillas intercaladas constituyen un acuícludo. Estos materiales, tienen un comportamiento de acuífero por porosidad intergranular primaria, aunque en general no suministran un gran caudal en las captaciones.

El relleno detrítico del polje de Zafarraya tiene una extensión próxima a 22 km², si bien no parece estar saturado en toda esa extensión, y muestra un espesor máximo de 60 m en la zona central. En el sector central del polje este relleno cuaternario se coloca encima de los materiales miocénicos, mientras que en el sector occidental y oriental descansa directamente sobre los materiales carbonatados del acuífero de Sierra Gorda. El aluvial muestra dos niveles litológicos claramente diferenciables en campañas geoelectricas (López Chicano, 1989), siendo el inferior de carácter más arcilloso que el tramo superior. Este hecho ya lo pusieron en evidencia Martín Vivaldi *et al.* (1971) al analizar muestras del Cuaternario procedentes de sondeos mecánicos.

Su transmisividad varía entre 20 y 90 m²/d según Hidalgo (1974 a) y entre 30 y 200 según Ollero y García (1984 b). Estos últimos autores estiman un valor medio del 13 % para el coeficiente de almacenamiento. Se trata de un acuífero libre, de nivel piezométrico localizado a pocos metros de profundidad, cuyo drenaje natural se realiza esencialmente hacia el acuífero kárstico de Sierra Gorda. El flujo general se produce hacia el noroeste, con un gradiente hidráulico que oscila entre 0,085 % y 1,7 % (Hidalgo, 1974 a), o del 3,3 % de media según IGME (1983 a).

El nivel piezométrico está próximo a la superficie (no más de 15 m), lo que, unido a su escaso relieve, ha permitido una gran proliferación de captaciones (más de 400). En la Figura 11 se representan tres mapas distintos de isopiezas del acuífero detrítico del polje de Zafarraya, según diversos autores (Hidalgo, 1974 a, IGME, 1983 a y Ollero y García, 1983) y para épocas distintas. Se observan notables diferencias entre los tres mapas presentados, como sería lo lógico, ya que se trata de situaciones cronológicamente distintas (al margen de las diferencias en el número de puntos utilizados para el trazado de las curvas); sin embargo, un rasgo común a todos ellos es que el flujo subterráneo, en el sector central y occidental del polje, se produce sistemáticamente hacia el noroeste; hacia los sectores de sumideros del noroeste y oeste de Zafarraya.

La forma de las isopiezas del acuífero detrítico del polje de Zafarraya está controlada esencialmente por tres factores principales: la relación entre el acuífero y el arroyo de la Madre (principal cauce que atraviesa el polje); la relación entre el acuífero detrítico y el acuífero carbonatado subyacente; y la explotación por bombeo en las numerosas captaciones existentes en el sector central.

Respecto a la relación entre el acuífero detrítico y el arroyo de la Madre, Hidalgo (1974 a) describe extensa y claramente los principales fenómenos que se observan. En general, al este del meridiano de Ventas de Zafarraya, y hasta las Pilas de Algaida, el acuífero parece alimentar al cauce (habría que decir al eje longitudinal que sigue el trazado del cauce, ya que el arroyo discurre seco en el momento de las mediciones del nivel piezométrico), al igual que en las proximidades de Zafarraya. Sin embargo, al sur de El Almendral y en las inmediaciones de los ponors noroccidentales, es el arroyo el que alimenta al acuífero, marcando una divisoria de aguas (Figura 11 A). Al sur de Zafarraya existe otra divisoria que sigue el trazado de los pequeños arroyos que desaguan en los sumideros del oeste de Zafarraya.

La relación entre el acuífero detrítico y el acuífero carbonatado subyacente, condiciona notablemente el trazado de las isopiezas, las cuales se disponen paralelas al contacto entre ambos acuíferos, descendiendo el nivel bruscamente en el límite. Sin embargo, el mapa de isopiezas trazado por el IGME (1983 a) para Octubre de 1974 (Figura 11 B), parece indicar una situación radicalmente distinta en el sector noroccidental del polje, dando a entender que son las calizas las que alimentan al aluvial. Esta situación de inversión del gradiente normal sólo se produce en periodos de recarga pluviométrica intensa (Hidalgo, 1974 a), por remonte brusco del nivel pie-

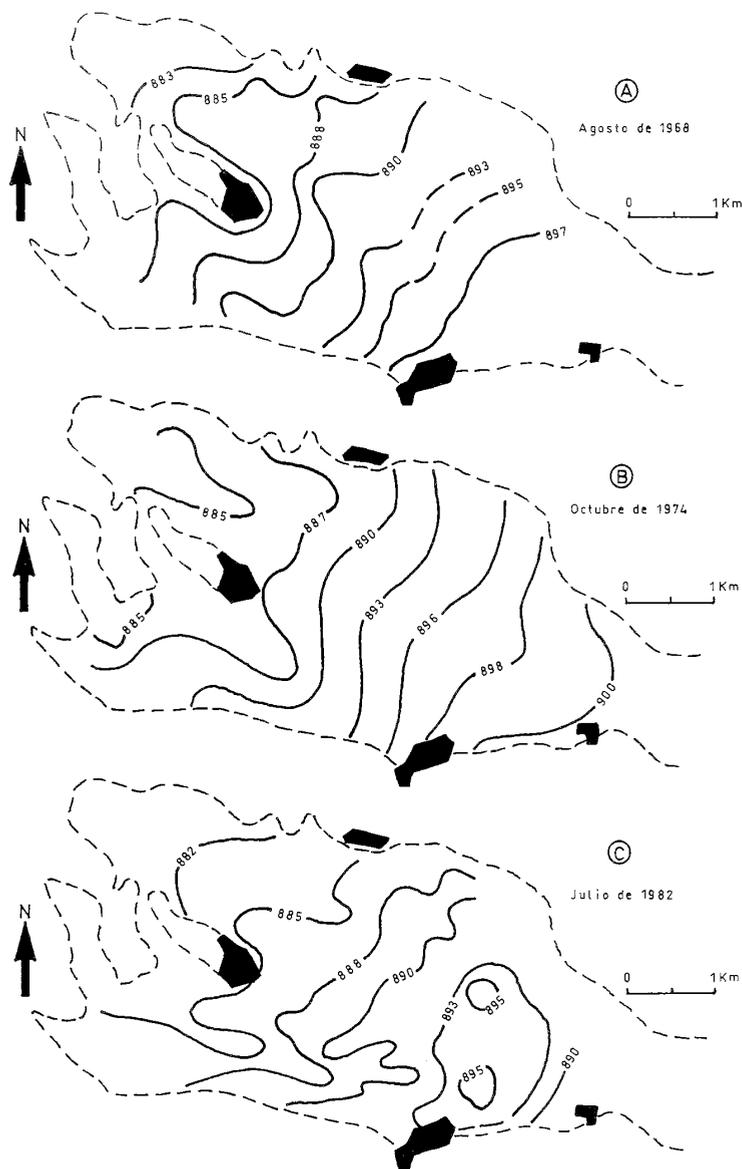


Figura 11.- Tres situaciones de la superficie piezométrica en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya. A, según Hidalgo (1974 a); B, según el IGME (1983 a); C, según Ollero y García (1983).

zométrico del acuífero carbonatado, como se verá más adelante; sin embargo, el año hidrológico 1973/74 no parece presentar tales periodos, por lo que pienso que debe tratarse de una mala interpretación de los datos de base. En el mapa de Julio de 1982 (Figura 11 C), si bien existen

diferencias entre los valores absolutos de cota de la superficie piezométrica, la situación general es similar a la de Agosto de 1968, año considerablemente más húmedo que 1982.

El estudio realizado por Ollero y García (1983 y 1984 b) aporta datos interesantes y originales sobre la superficie piezométrica del acuífero en el sector comprendido entre Ventas de Zafarraya y Pilas de Algaida. Estos autores ponen de manifiesto la presencia de una divisoria de aguas subterráneas al NNE de Ventas de Zafarraya (Figura 11 C), revelando así la existencia de un flujo hacia el este, causado por el drenaje en profundidad hacia el acuífero carbonatado. En el borde sur del polje, estos autores consideran la existencia de cierta aportación de aguas subterráneas del acuífero carbonatado al acuífero detrítico, ya que las isopiezas se disponen de forma paralela al contacto; mientras que Hidalgo (1974 a) considera que es un límite de intercambio nulo (isopiezas perpendiculares al contacto en la Figura 11 A), debido a la presencia de los materiales impermeables que lo jalonan.

La influencia de los bombeos en la piezometría del acuífero debe ser notable, aunque no se pone claramente de manifiesto en la Figura 11. Tal vez, la irregularidad de las líneas isopiezas, más marcada en el mapa de Julio de 1982 se deba en parte a estas extracciones. Ollero y García (1983) realizan otros dos mapas de isopiezas en periodo de bombeos, también para el año 1982, en los que se observan importantes conos de depresión.

En cuanto a los aspectos hidrogeoquímicos, la facies dominante en este acuífero es la bicarbonatada cálcica o magnésica, especialmente en las proximidades a los bordes (Hidalgo, 1974 a). En el sector central, coincidiendo con el área principal de regadíos, la facies dominante es la sulfatada cálcico-magnésica. Esta facies anómala se da en los sectores con mayor concentración de sales disueltas en el agua subterránea, con residuo seco superior a 450 mg/l.

El mismo autor considera que esa distribución hidrogeoquímica está influenciada por la existencia de sales evaporíticas y materia orgánica intercaladas entre los materiales detríticos cuaternarios, que se depositaron en las inundaciones históricas del polje. No obstante, es preciso tener en cuenta el aumento progresivo de la salinidad por reconcentración de las aguas de retorno de riego, así como los aportes de materia orgánica y otras sales que se producen en las prácticas de abonado.

En este sentido, Ollero y García (1984 a) ponen de manifiesto la existencia de una estrecha relación entre la distribución del contenido en nitratos y la del contenido en sulfatos de las aguas subterráneas. Gran parte del sector central del acuífero presenta concentraciones superiores a 50 mg/l de NO_3^- , alcanzándose valores de hasta 140 mg/l. Al noreste de Zafarraya los SO_4^{2-} alcanzan valores superiores a 150 mg/l.

En cuanto al balance hídrico, López Chicano (1994) estima una infiltración procedente de la lluvia de aproximadamente 11-12 hm^3/a . Existe también una recarga indirecta desde el arroyo de la Madre próxima a 3 hm^3/a por término medio. Otra parte de la escorrentía de este arroyo (40 % ó 2 hm^3/a) se puede considerar que se infiltra directamente en el acuífero carbonatado a través de los sumideros del borde occidental del polje. Las salidas se producen por bombeo para regadío (unos 3,6 hm^3/a de bombeos netos) y sobre todo de forma oculta hacia el acuífero carbonatado de Sierra Gorda, en una cuantía cercana a 10 hm^3/a .

EL ACUÍFERO DEL HACHO DE LOJA

Características hidrogeológicas generales

Este acuífero se sitúa inmediatamente al norte de la ciudad de Loja, en la margen derecha del río Genil (Figuras 5 y 6) y está compuesto por los materiales calizo-dolomíticos del Jurásico de la unidad geológica de igual nombre, los cuales pueden alcanzar potencias de hasta 600 m. Estos materiales tienen un comportamiento acuífero gracias a la fisuración y karstificación que presentan. Esencialmente se trata de un acuífero libre con unos 10 km² de extensión, si bien, parte del acuífero podría estar confinado bajo el relleno neógeno de la depresión de Granada en los sectores meridional y oriental del mismo. El substrato impermeable corresponde a materiales del Trías (Keuper) que afloran al norte y oeste.

Un sondeo emplazado en los materiales acuíferos, cercano al manantial de Agicampe arrojó valores de transmisividad del orden de 13000 m²/d, con 50 l/s de caudal de bombeo (DGOH-ITGE, 1993). Sin embargo, en el sondeo de abastecimiento a los Ventorros de San José se obtuvieron valores de sólo 3 m²/d para 4 l/s de bombeo, resultados similares a los obtenidos en el sondeo de Los Arenales, con 3.5 m²/d de transmisividad con un bombeo de 2.2 l/s. Todo ello ilustra sobre la heterogeneidad de la permeabilidad en este tipo de medio acuífero.

Las recesiones de los manantiales, al menos en los casos del Frontil y Agicampe, son bastante lentas, en cualquier caso con un coeficiente de agotamiento inferior a 0.02 d⁻¹ y coeficientes de variación menores del 20 %, lo que indica que el acuífero está más próximo a los de comportamiento fisurado que kárstico en sentido estricto.

Aparentemente, el acuífero del Hacho de Loja se muestra muy bien independizado, sin embargo, en el detalle, la estructura geológica es relativamente compleja, en el sentido de existir importantes fracturas que involucran materiales de baja permeabilidad, todo lo cual conduce a una compartimentación compleja del sistema hidrogeológico. Así, no es de extrañar que en el sondeo que regulaba el manantial de Agicampe (uno de los puntos que abastecían de agua potable a Huetor Tájar) se hayan producido descensos del nivel piezométrico muy superiores a los esperados, habida cuenta de los importantes recursos renovables del acuífero (más de 11 hm³/a de media). Tampoco extraña que la descarga visible supere ampliamente la infiltración de la lluvia (estimada por cualquier método); de manera que deben existir importantes aportes laterales ocultos desde otro u otros acuíferos cercanos que expliquen las discrepancias en el balance entre las entradas de agua aparentes y las salidas visibles. La existencia de un caudaloso manantial, el Frontil, el cual drena por sí sólo más del 90 % de los recursos del sistema, debe ser la clave para entender el extraño funcionamiento de este acuífero.

El problema del Frontil

Ya se ha mencionado anteriormente que la descarga por este manantial, superior a 350 l/s de media, es muy elevada para un afloramiento de materiales carbonatados tan discreto como el del Hacho de Loja, quedando claro que esa descarga pone en evidencia una alimentación lateral oculta hacia el acuífero del Hacho de Loja. También se ha dicho que su vaciado traduce un comportamiento bastante inercial o lento de su cuenca hidrogeológica, típico de acuíferos poco permeables o con dificultades en el drenaje por la existencia de heterogeneidad y anisotropía de la conductividad hidráulica. El origen de esta recarga oculta ha sido (y sigue siendo) objeto de una importante controversia (IGME, 1983 a). En principio, se podría pensar en Sierra Gorda como área fuente del flujo oculto, dada la proximidad entre ambos acuíferos.

Los datos disponibles sobre las características hidrogeoquímicas de las aguas del Frontil, en comparación a las de los manantiales de Sierra Gorda, no suministran una información que permita resolver claramente si es esta última la zona de procedencia del aporte oculto. Su composición fisicoquímica es similar a la de los manantiales más septentrionales de Sierra Gorda, si acaso algo más mineralizada y rica en sulfato (explicable por la influencia del substrato evaporítico triásico, según Casares, 1978) y con unas décimas de grado de temperatura más alta. Desde el punto de vista isotópico no hay tampoco datos que se puedan considerar concluyentes. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos por CEDEX (1995) son similares a los de los manantiales de Sierra Gorda en el sector de Loja, indicando cotas del área de alimentación poco diferentes, si bien, los contenidos en tritio son ligeramente más bajos, en torno a 1 ó 2 UT, lo cual indica únicamente que existe una cierta mezcla con aguas relativamente antiguas o bien que en la cuenca hidrogeológica del Frontil este proceso es más importante.

En cuanto a las experiencias de trazado llevadas a cabo con fluoresceína en el acuífero de Sierra Gorda, en los años 1930 y 1969 (Anguita y Fernández Montero, 1969; Hidalgo, 1974 a; IGME, 1983 a), ninguna ha puesto de manifiesto la conexión hídrica con la unidad del Hacho de Loja; al menos, no hay referencias explícitas al paso del trazador por el manantial de Frontil. En agosto de 1997 (Vega Otero, 1997) se llevó a cabo una nueva experiencia de trazado con LiCl, inyectado en un piezómetro de la CHG situado a unos 4 km en línea recta del manantial del Frontil, aunque claramente excavado sobre el acuífero de Sierra Gorda. Se tomó una muestra diaria a partir del décimo día desde el momento de la inyección del trazador en el sondeo, contabilizándose al final 18 muestras. En dos muestras consecutivas, tomadas a las 3 semanas de la inyección, se registró una concentración de Li de 0.04 y 0.06 mg/l, ligeramente superiores a la concentración de base que fue de 0.02 mg/l. El hecho de que este “pico” tan aislado y tan pequeño se produjese tras unas fuertes precipitaciones que pudieron movilizar sales del acuífero (incluidas sales que contuviesen Li) resta valor a esta “prueba de conexión hidráulica”. Otros aspectos, relativos a las condiciones en que se llevó a cabo el trazado, aconsejan ser cautos en la interpretación de los resultados. Así, pues, el “misterio” del Frontil todavía continúa.

La conexión hídrica de Sierra Gorda con el Hacho de Loja se hace muy difícil teniendo en cuenta el nivel de drenaje impuesto por el río Genil (Casares, 1979) y la presencia de potentes formaciones impermeables bajo el aluvial cuaternario del mismo. Esta conexión, invocada en varias ocasiones para explicar el origen de la descarga por el manantial del Frontil (IGME, 1981 y 1983 a; Diputación Provincial de Granada - ITGE, 1990), sólo sería posible si los materiales carbonatados de Sierra Gorda tuvieran continuidad en profundidad, confinados bajo las formaciones impermeables que rellenan la depresión. Ello es posible, si bien, estas condiciones ideales se cumplen difícilmente, ya que todo el sector se halla afectado de una importante tectónica de fractura, discurriendo por él el accidente Cádiz-Alicante (Sanz de Galdeano, 1983).



Los manantiales de La Tajea (Loja)

De izquierda a derecha: Alberto Padilla, Antonio Pulido, Leopoldo Mittelbrum y Manuel del Valle

BIBLIOGRAFÍA

- Anguita, F. y Fernandez Montero, A. 1969. Estudio Hidrogeológico de Zafarraya (Granada). III Curso de Hidrogeología Subterránea, Barcelona, 82 p. Inédito.
- Blumenthal, M. 1931. Géologie des chaînes pénibétiques et subbétiques entre Antequera et Loja, et des zones limitrophes (Andalousie). Bulletin Société Géologique France, 5 (1), 23-94.
- Busnardo, R., Linares, A. y Mouterde, R. 1969. Trias fossilifère à facies pélagique près de Alhama de Granada (Andalousie). Comtes Rendues Academie Sciences Paris, 268, 1354-1367.
- Casares, J. 1978. Investigaciones hidrogeológicas en los macizos kársticos de Parapanda y del Hacho de Loja (Provincia de Granada). Tesis de Licenciatura, Universidad Granada, 218 pp.
- Casares, J. 1981. Quimismo y evolución hidrogeoquímica de los acuíferos kársticos de Parapanda y del Hacho de Loja (provincia de Granada). I Simposio Agua en Andalucía, Granada, 1, 429-444.
- Casares, J.; Fernandez Rubio, R. y Pulido Bosch, A. 1979. Aspectos hidrogeológicos de dos macizos carbonatados del dominio Subbético interno. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Pamplona, 3, 147-165.
- Castillo, A., López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1993. Temporal evolution of Riofrio nitrate content (Sierra Gorda, Granada). En: Pulido-Bosch, A. (ed.) Some Spanish Karstic Aquifers. Universidad de Granada, Granada, 117-126.
- CEDEX 1995. Estudio de la hidrología isotópica del Alto Genil. Informe parcial nº 2 para la DGOH-CHG, 197 pp. Inédito.
- Cherif, L., Pulido Bosch, A., López Chicano, M., Morell, I. y Gámez, J.A. 1995. Las actividades agrícolas en el polje de Zafarraya y la evolución del contenido en nitratos en dos manantiales del acuífero de Sierra Gorda (Granada y Málaga). Geogaceta, 18, 146-149.

- Delgado Moya, S. 1973. Estudio Hidrogeológico del Karst de Sierra Gorda (Granada). Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada, 99 pp.
- Delgado Moya, S.; Hidalgo, J.; Fernandez Rubio, R. y del Valle, M. 1974. Características hidrogeológicas del embalse subterráneo de Sierra Gorda (Prov. de Granada). Documentos Investigación Hidrológica, Barcelona, 16, 54-68.
- DGOH-CHG 1995. Normas de explotación de las unidades hidrogeológicas con afección directa a los embalses de regulación y fuentes de abastecimiento a poblaciones de la Cuenca del Guadalquivir. Unidad hidrogeológica 05.40. Sierra Gorda y Zafarraya.
- DGOH-CHSE 1988. Estudio 01/88. Estudio hidrogeológico de la problemática hídrica del Llano de Zafarraya (Granada). Propuesta para la ordenación de sus recursos.
- DGOH-CHSE 1991. Informe sobre las relaciones de dependencia existentes entre las unidades hidrogeológicas de Sierra Gorda y Polje de Zafarraya (Granada).
- DGOH-ITGE 1993. Propuesta de Normas de Explotación de unidades hidrogeológicas con afección a embalses de regulación y fuentes de abastecimiento a poblaciones de la Cuenca del Guadalquivir. Unidad hidrogeológica 05.39 Hacho de Loja.
- Diputación de Málaga 1988. Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga. Servicio Arquitectura, Urbanismo y Ordenación Territorial, Málaga, 151 pp.
- Diputación Provincial de Granada - ITGE 1990. Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Granada. Diputación Provincial de Granada - ITGE, Granada, 107 pp.
- Elorza, J.J. y García Dueñas, V. 1979. Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1040 (Zafarraya) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. IGME.
- Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P., Jabaloy, A. y López-Chicano, M. 2000. Kinematics of faults between Subbetic Units during the Miocene (central sector of the Betic Cordillera). Comptes Rendues Académie Sciences Paris, Série II, 331, 811-816.
- Gámez, J.A., Pulido Bosch, A., Morell, I., Cherif, L., y López Chicano, M. 1995. Problemática del uso de los tomamuestras de succión en el estudio de la ZNS en el polje de Zafarraya (Granada y Málaga). Geogaceta, 18, 142-145.
- Gámez, J.A., Pulido Bosch, A., Morell, I., López Chicano, M. y Cherif, L. 1996. Evolución espacial y temporal del contenido en nitratos en el Polje de Zafarraya (Granada). IV Simposio Agua en Andalucía, Almería, 2, 269-274.
- Guzman del Pino, J.L. 1987. Estudio hidrogeológico del polje de Zafarraya y áreas adyacentes. Informe técnico para la CHSE, Málaga, 115 pp. Inédito.
- Guzman del Pino, J.L.; Delgado Pastor, J. Castillo Perez, E. y Lupiani, E. 1991. Problemática hídrica del Llano de Zafarraya. XXIII Congreso A.I.H., Puerto de la Cruz, 531-534.
- Hidalgo, J. 1974 a. Estudio hidrogeológico del Polje de Zafarraya y zonas adyacentes (provincias de Granada y Málaga). Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada, 165 pp.
- Hidalgo, J. 1974 b. Fluctuaciones del nivel piezométrico en el polje de Zafarraya (Provincia de Granada). Documentos Investigación Hidrológica, Barcelona, 16, 95-112.
- Hidalgo, J. y Fernandez Rubio, R. 1974. Vulnerabilidad a la polución de las aguas subterráneas en el polje de Zafarraya y zonas adyacentes (Granada y Málaga). Boletín Geológico y Minero, 85 (3), 300-307.
- IGME 1981. Investigación hidrogeológica en las cuencas del sur de España. (Sector Occidental). Colección Informe, IGME, Madrid, 78 pp.
- IGME 1983 a. Investigación hidrogeológica de las cuencas del sur de España (Sector Occidental). Informe técnico nº 9. Sistema acuífero nº 40-E. Mesozoico calizo-dolomítico de la Sierra Gorda. PIAS, IGME, 142 pp.
- IGME 1983 b. Proyecto de investigación hidrogeológica infraestructural de los sistemas acuíferos 30 y 31. Cuenca alta del Guadalquivir. Informe técnico. Inédito.
- IGME 1985. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Informe de síntesis. Ministerio de Industria y Energía, 281 pp.

- IRYDA-IGME 1986. Investigación de Recursos Hidráulicos en la zona Alhama-Temple (Granada). Informe técnico, 156 pp. Inédito.
- López Chicano, M. 1989. Geometría y estructura de un acuífero kárstico perimediterráneo: Sierra Gorda (Granada y Málaga). Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada, 77 p.
- López Chicano, M. 1994. Hidrogeología del Acuífero Kárstico de Sierra Gorda. Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Granada, 429 pp.
- López-Chicano, M., Calvache, M.L., Martín-Rosales, W. y Gisbert, J. 2001. Factores condicionantes de las inundaciones en poljes kársticos. Caso del polje de Zafarraya. V Simposium Agua en Andalucía, Almería, 1, 231-243.
- López-Chicano, M., Calvache, M.L., Martín-Rosales, W. y Gisbert, J. 2002. Conditioning factors in flooding of karstic poljes. The case of the Zafarraya polje (South Spain). *Catena*, 49, 331-352.
- López Chicano, M.; Castillo Martín, A y Pulido Bosch, A. 1992. Algunas consideraciones acerca de la evolución temporal del contenido de nitratos en un río con importante influencia kárstica: el río Frío (Granada). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, Alicante, 16, 195-203.
- López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1988. Aproximación al conocimiento de las direcciones preferenciales de karstificación en el acuífero carbonático de Sierra Gorda (Granada). II Congreso Geológico de España, Granada, comunicaciones, 2, 403-406.
- López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1989. Compartimentación y descenso de niveles piezométricos en un sector del sistema de Sierra Gorda (Granada y Málaga). En: ITGE (ed.), *La sobreexplotación de acuíferos*. Temas Geológico-mineros, ITGE, Almería, 10, 577-591.
- López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1993 a. The Sierra Gorda karstic aquifer (Granada and Malaga). En: Pulido-Bosch, A. (ed.), *Some Spanish Karstic Aquifers*. Universidad de Granada, Granada, 85-93.
- López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1993 b. The fracturing in the Sierra Gorda karstic system (Granada). En: Pulido-Bosch, A. (ed.), *Some Spanish Karstic Aquifers*. Universidad de Granada, Granada, 95-116.
- López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1994 a. Estudio comparativo entre fracturación y karstificación en Sierra Gorda (Granada y Málaga). *Espeleotemas*, 4, 3-14.
- López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1994 b. La estructura fisural y kárstica del acuífero de Sierra Gorda (Cordilleras Béticas, Granada y Málaga, España). En: Pulido-Bosch, A., Fagundo, J.R. y Rodríguez-Rubio, J.E. (eds.), *El karst y los acuíferos kársticos. Ejemplos y métodos de estudio*. Universidad de Granada, Granada, 63-80.
- López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1995 a. Los manantiales termominerales de Salar (Granada). Un sistema de flujo profundo ligado esencialmente a la descarga de Sierra Gorda. *Geogaceta*, 18, 138-141.
- López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1995 b. Observaciones hidrogeológicas e hidroquímicas sobre los manantiales termominerales de Alhama de Granada (Cordilleras Béticas. España). *Geogaceta*, 19, 134-137.
- López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. 1998. El Acuífero de Sierra Gorda y Polje de Zafarraya. En ITGE-Junta de Andalucía (eds.), *Atlas Hidrogeológico de Andalucía*. Instituto Tecnológico y Geominero de España – Junta de Andalucía, Madrid, 198-200.
- López-Chicano, M., Pulido-Bosch, A., Cherif, L. y Castillo, A. 1996 a. Interpretación preliminar de las variaciones de temperatura y conductividad del agua de dos manantiales correspondientes al sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda. En: Morell, I. y Fagundo, J.R. (eds.), *Contribuciones a la investigación y gestión del agua subterránea*. Publicacions de la Universitat Jaume I, Valencia, 87-105.
- López Chicano, M., Pulido Bosch, A., Cherif, L. y Gámez, J.A. 1996 b. Aportación al conocimiento hidrogeológico del Polje de Zafarraya. IV Simposio Agua en Andalucía, Almería, 1, 143-156..
- Lopez Geta, J.A.; del Valle, M. y Trenado, L. 1981. Adecuación de los recursos hídricos de las surgencias naturales de "Guaro" a la demanda de la zona. I Simposio Agua en Andalucía, Granada, 2, 767-784.
- Magne, J.; Peyre, Y.; del Valle, M. y Vera, J.A. 1969. La serie estratigráfica del Gallo-Vilo (provincia de Málaga, España). *Acta Geologica Hispana*, 4 (3), 67-71.
- Martin Algarra, A. 1987. Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas

- Externas de la Cordillera Bética. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 1171 pp.
- Martin Vivaldi, J.; Caballero, M.A.; Calle, M. y Lhenaff, R. 1971. Estudio mineralógico de los niveles arcillosos del polje de Zafarraya, Granada (España). *Estudios Geológicos*, 27, 137-144.
- Morell, I., López Chicano, M., Pulido Bosch, A., Gámez, J.A. y Cherif, L. 1994. Contaminación del sistema kárstico de Sierra Gorda debida a la actividad agrícola en el polje de Zafarraya (Granada, España). Estudio preliminar. En: Pulido-Bosch, A., Fagundo, J.R. y Rodríguez-Rubio, J.E. (eds.), *El karst y los acuíferos kársticos. Ejemplos y métodos de estudio*. Universidad de Granada, Granada, 239-249.
- Morell, I., López-Chicano, M., Pulido Bosch, A., Gámez, J.A. y Cherif, L. 1995. Procesos de lixiviado de nitratos en el acuífero detrítico del polje de Zafarraya (Granada). En: Gonzalo, J.M. y Antigüedad, I. (eds.) *Avances en la Investigación en Zona No Saturada*. Servicio Central Publicaciones Gobierno Vasco, Bilbao, 63-69.
- Morell, I., Pulido-Bosch, A., López-Chicano, M., Cherif, L. y Gámez, J.A. 1996. Bilan des nitrates dans le système karstique de la Sierra Gorda (Grenade, Espagne). *L'eau souterraine en region agricole, ESRA'96*, Poitiers, S-4, 69-72.
- Ollero, E. y Garcia, J.L. 1983. Estudio Hidrogeológico y Agronómico del Polje de Zafarraya. Informe para la Diputación Provincial de Granada, 196 pp. Inédito.
- Ollero, E. y Garcia, J.L. 1984 a. Características hidroquímicas del acuífero aluvial del polje de Zafarraya. *I Congreso Español de Geología*, 4, 287-294.
- Ollero, E. y Garcia, J.L. 1984 b. Incidencias de las aportaciones del arroyo de la Madre en el balance hídrico del polje de Zafarraya. *I Congreso Español de Geología*, 4, 295-305.
- Pistre, S., López-Chicano, M., Pulido-Bosch, A. y Drogue, C. 1999. The role of western Mediterranean tectonic evolution in the geometry of a karstic domain in the Betic Cordilleras (Sierra Gorda, Spain): importance of a tardy extensional regime. *Geodinamica Acta*, 12, 11-24.
- Pulido Bosch, A. y López Chicano, M. 1995. Importancia de algunos acuíferos carbonatados representativos de la cuenca del Guadalquivir. *Tierra y Tecnología*, 9, 29-35.
- Pulido-Bosch, A., López-Chicano, M., Morell, I., Castillo, A., Gámez, J.A. y Cherif, L. 1994. The influence of agricultural activities in the Polje of Zafarraya on the water quality of the karstic aquifer of the Sierra Gorda (Southern Spain). *XXV Congress of IAH, Water Down Under 94*, Adelaide, 2 (B), 727-730.
- Rubio, J.C. y del Valle, M. 1987. Actualización de balances en los acuíferos de las provincias de Granada y Jaén. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, Palma de Mallorca, 11, 669-683.
- Sanz de Galdeano, C. 1983. Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas. *Estudios Geológicos*, 39, 157-165.
- Vega Otero, R.E. 1997. Experiencia de trazado de aguas subterráneas en Sierra Gorda (del 3 al 30 de agosto de 1997). Informe inédito para el Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Granada, 32 p.
- Vera, J.A. 1966. Estudio geológico de la Zona Subbética en la transversal de Loja y sectores adyacentes. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 191 pp.