

LÓPEZ CHICANO, M.; PULIDO BOSCH, A.; CHERIF, L. y CASTILLO, A. (1996)
"Interpretación de las variaciones de temperatura y conductividad del agua en dos manantiales
correspondientes al sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda"
En "Contribuciones a la investigación y gestión del agua subterránea". ISBN: 84-8021-105-9.
Eds. I. Morell y J.R. Fagundo. Col. Summa. Universitat Jaume I. 87-105

Interpretación preliminar de las variaciones de temperatura y conductividad del agua en dos manantiales correspondientes
al sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda
Contribuciones a la investigación y gestión del agua subterránea, pp.87- 105
Eds. I. Morell, J.R. Fagundo

**INTERPRETACION PRELIMINAR DE LAS VARIACIONES DE TEMPERATURA
Y CONDUCTIVIDAD DEL AGUA EN DOS MANANTIALES
CORRESPONDIENTES AL SISTEMA HIDROGEOLOGICO KARSTICO DE
SIERRA GORDA**

M. López-Chicano¹, A. Pulido Bosch¹, L. Cherif¹ y A. Castillo²

*1. Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada. España
2. CSIC - Instituto de Agua (Universidad de Granada). España*

RESUMEN

Con una superficie de materiales carbonatados del orden de los 300 km², el macizo de Sierra Gorda muestra un paisaje kárstico muy completo, típicamente mediterráneo. Este desarrollo de la karstificación en superficie no tiene una gran repercusión en la funcionalidad hidrodinámica del sistema, de manera que -a escala de todo el acuífero- su comportamiento se asemeja más al de un medio fisurado u homogéneamente karstificado (karst inercial o de flujo difuso). Pese a ello, los manantiales que lo drenan muestran diferencias de detalle en sus evoluciones hidroquímicas e hidrodinámicas.

A fin de analizar los diferentes comportamientos de las surgencias de este acuífero, en Marzo de 1994 se colocaron equipos de registro en continuo en dos de los principales puntos de descarga: el manantial de Riofrío (principal surgencia del sistema) y el manantial de Terciado (principal abastecimiento a la ciudad de Loja). En ambos se instalaron sendos dispositivos "data loggers" de almacenamiento de información y sensores de pluviometría, temperatura del aire, conductividad eléctrica (25°C) y temperatura del agua.

Se dispone de más de dos años de registro en estas surgencias, con la ventaja de que los ciclos 1994/95 y 1995/96 han sido muy distintos en lo que respecta a la recarga pluviométrica. El primero de ellos se caracterizó por ser el año más seco de un prolongado período de sequía, mientras que el segundo está siendo muy húmedo. Ante este cambio drástico en las condiciones de recarga, los manantiales han respondido de forma espectacular, observándose diferencias notables en los comportamientos de ambos. Las variaciones de temperatura y conductividad se interpretan en función del grado de desarrollo de la karstificación, las condiciones estructurales y el funcionamiento hidrodinámico de las respectivas cuencas hidrogeológicas.

Palabras clave: manantiales kársticos, flujo difuso, series temporales, flujo pistón.

ABSTRACT

With a surface area of carbonated materials of around 300 km², the Sierra Gorda mountain range shows a typically Mediterranean and very complete karstic landscape. This development of surface karstification does not greatly affect the hydrodynamic functioning of the system and so, throughout the aquifer, its behaviour is more like that of a fissured or homogeneously karstified medium, i.e. inertial karst or diffuse flow. Nevertheless, the springs that drain it exhibit differences in the details regarding their hydrochemical and hydrodynamic evolution.

With the object of analysing these differences in the behaviour of the spring arising from this aquifer, in March 1994, a continuous monitoring device was installed at two of the main output points: the Riofrio spring (the system's principal emergence) and the Terciado spring (which provides the main supply for the town of Loja). At each site, data logger systems were established, together with rainfall, air temperature, electrical conductivity (25°C) and water temperature sensors.

Over two years' records are available for these springs. A positive aspect is that the 1994/95 and 1995/96 hydrologic cycles were very different in terms of pluviometric recharge. The first period was characterized as being the driest year within a prolonged period of drought, while the latter period is proving to be one of high rainfall. The springs have shown a spectacular response to this drastic change in recharge conditions, and notable differences have been observed in their respective behaviour patterns. The variations in temperature and conductivity are interpreted in terms of the degree of development of karstification, the structural conditions and the hydrodynamic functioning of the respective hydrogeological catchment areas.

Key words: karstic springs, diffuse flow, time series, piston flow.

INTRODUCCION

Como indican Marjolet y Salado (1975), las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas en los sistemas hidrogeológicos kársticos están determinadas en buena parte por la litología de los medios rocosos que éstas van atravesando, los procesos fisicoquímicos que predominan en estos medios, el tiempo de permanencia del agua y las diversas condiciones o modalidades de circulación que coexisten en los mismos. Es por ello que, desde los trabajos de Shuster y White (1971), el registro de las variaciones temporales de las características hidrogeoquímicas de los manantiales kársticos se ha venido empleando como una herramienta de gran utilidad en la interpretación de la estructura y del comportamiento hidrodinámico de este tipo de acuíferos.

Debido a que el agua en los acuíferos kársticos circula a velocidades muy distintas, en general con gran rapidez a través de conductos de disolución y fracturas distensivas y más lentamente a través de pequeñas fisuras y poros, el control temporal de las oscilaciones hidrogeoquímicas debe ser lo más frecuente posible, siempre adaptado a la variabilidad propia del sistema estudiado, a fin de no perder parte de la información suministrada naturalmente (Bakalowicz, 1979).

Aunque un seguimiento con una cadencia de muestreo superior a una o dos semanas -como el que llevan a cabo Jacobson y Langmuir (1974) o Hess y White (1993)- permite una cierta aproximación a la clasificación del acuífero en uno de los

dos modelos establecidos por Atkinson (1977), es decir de flujo difuso o de flujo en conducto, los resultados más interesantes se obtienen con registros de corto período durante las crecidas de los manantiales (Bakalowicz y Mangin, 1980), episodios de tormenta (Hess y White, 1988) o al menos el tránsito aguas bajas-altas (Aguayo et al., 1988). No obstante, ya Bakalowicz (1979) indica que las respuestas hidroquímicas pueden ser diferentes dependiendo de la posición de la crecida a lo largo del ciclo hidrológico. En casos sencillos, con un comportamiento hidroquímico de la surgencia repetitivo para cada crecida, es posible realizar incluso la descomposición del hidrograma a partir de los datos de caudal y de determinados parámetros fisicoquímicos, como hacen Blavoux y Mudry (1983) y Dreiss (1989).

Por otra parte, en determinadas circunstancias en las que es importante la influencia de la modalidad de la recarga principal del acuífero (recarga autóctona por infiltración del agua de lluvia o alóctona a partir de cursos superficiales) o la longitud del trayecto del flujo, la variabilidad hidrogeoquímica de los manantiales no permite distinguir las particularidades físicas o estructurales que predominan en los acuíferos que los alimentan (Scanlon y Thraill, 1987). Además, como hacen notar Ford y Williams (1989), la interpretación de un mismo fenómeno varía en función del modelo conceptual del acuífero kárstico que se utilice de partida; ello es debido en cierta medida a que no todos los investigadores controlan los mismos parámetros fisicoquímicos en las surgencias.

En este estudio se realiza una interpretación preliminar de los registros en continuo de temperatura y conductividad eléctrica del agua de dos de los principales manantiales kársticos del acuífero de Sierra Gorda, con el objeto de comprobar o matizar su comportamiento inercial o difuso (López Chicano, 1992), establecido a partir del empleo de otras técnicas como el análisis correlatorio y espectral (Mangin, 1984). El trabajo realizado incluía de forma complementaria la toma mensual de muestras de agua en ambos manantiales y el posterior análisis químico completo, junto con la recopilación de datos de caudal medidos en una estación de aforos situada aguas abajo de uno de los manantiales. Determinadas circunstancias ajenas a nuestra voluntad han impedido hasta ahora disponer de estos datos que habrían sido de gran utilidad; de ahí el carácter provisional en la interpretación de los resultados.

DESCRIPCION DEL ACUIFERO

El macizo de Sierra Gorda constituye uno de los acuíferos carbonatados más importantes del sur de la Península Ibérica (Figura 1), tanto por su extensión cercana a 300 km² como por sus recursos medios renovables superiores a 130 hm³/año. Con cotas que oscilan entre 470 y casi 1700 m s.n.m., se localiza estratégicamente en el sector central de las Cordilleras Béticas y en el curso medio del río Genil, a sólo 50 km al oeste de Granada.

Se trata de una región montañosa que muestra un paisaje exokárstico ampliamente desarrollado y típicamente mediterráneo. Pese a que se observan numerosas formas de lapiaz, superficies de aplanamiento, cañones y valles secos, los rasgos más característicos de este karst son los extensos campos de pequeñas dolinas (más de 1600 individuos cartografiados por Pezzi, 1977) y los grandes

poljes. Uno de estos últimos, el polje de Zafarraya, se muestra todavía funcional, es decir, con un drenaje endorreico a través de ponors y sumideros, y sometido a inundaciones periódicas en momentos de intensa y continuada recarga pluviométrica por ascenso del nivel piezométrico del acuífero carbonatado (López Chicano, 1995). La red endokárstica conocida es de escasa importancia -apenas 3 km de desarrollo en planta para todo el macizo- y su distribución estadística direccional se adapta mal a la de las familias de fracturas; por ello, y puesto que ninguna cavidad conocida alcanza la zona saturada (a excepción de los sumideros de Zafarraya que lo hacen en determinados momentos), se considera una red paleokárstica en su mayor parte, representativa sólo de la zona de infiltración (López Chicano y Pulido Bosch, 1988).

Desde el punto de vista geológico, el acuífero está compuesto por calizas y dolomías del Jurásico inferior, con una potencia superior a 1000 m, que yacen sobre un substrato triásico detrítico-evaporítico. Los materiales carbonatados han sido plegados y sobre todo intensamente fracturados durante la Orogenia Alpina. Se distinguen cuatro familias principales de fracturas: N 0-10 E, N 40-50 E, N 90-100 E y N 140-150 E; todas las cuales han actuado recientemente en abertura debido a una fase de distensión casi radial, aunque la extensión afectó especialmente a las últimas (López Chicano y Pulido Bosch, 1993).

Sierra Gorda se presenta en la actualidad casi totalmente desprovista de una cobertura vegetal y edáfica importante, recibiendo una recarga pluviométrica media del orden de 840 mm/año. La tasa de infiltración de la lluvia en este karst desnudo es próxima al 50 %, mientras que las aportaciones por cursos superficiales alóctonos apenas representa el 3,6 % del total de recursos puesto en juego (López Chicano, 1992).

Casi el 95 % del drenaje de este acuífero -esencialmente libre- se produce de forma notablemente dispersa a través de una veintena de surgencias localizadas en la proximidades de Loja; en torno a 500 m s.n.m. y en el borde septentrional del acuífero. La Figura 1 muestra la posición de los grupos de manantiales más importantes, de los cuales Riofrío (número 2) es el más caudaloso. En este sector, el río Genil y sus afluentes por la margen izquierda constituyen aproximadamente el nivel de base del drenaje subterráneo del acuífero. Además de lo visible, el Genil recibe una importante descarga oculta o poco controlada procedente de Sierra Gorda (López Chicano, 1992). El resto de la descarga natural del sistema hidrogeológico se produce a través del grupo de surgencias de Guaro (número 9 en la Figura 1), manantiales de tipo "trop plein" localizados a 700 m de cota en el borde sur del acuífero.

La aplicación de técnicas de análisis correlatorio y espectral a los caudales diarios medidos en los sectores de Riofrío y Guaro (López Chicano, 1992) refleja un comportamiento hidrodinámico global del acuífero más parecido al de un medio fisurado -con una zona saturada bien desarrollada- que al de un medio fuertemente karstificado y heterogéneo. En apoyo de este concepto general se tiene: los bajos valores del coeficiente de agotamiento estimados para las surgencias (sólo superiores a 0,01 días⁻¹ en el manantial de Guaro) que traducen un fuerte poder regulador del sistema frente a la recarga pluviométrica; una gran continuidad lateral del nivel piezométrico, de manera que éste se alcanza en todas las captaciones que profundizan suficientemente en los carbonatos jurásicos, y además por el escalonamiento de la cota de los manantiales septentrionales en el sentido del flujo; una evolución hidrogeoquímica normal de las aguas en el sentido del flujo, muy poco variable y acorde con la posición espacial-tridimensional de las surgencias, siendo ilustrativo en este sentido la existencia de un flujo profundo hipotermal asociado al sistema acuífero (López Chicano y Pulido Bosch, 1995). El papel regulador de una potente zona no saturada -de al menos 700 m de espesor en más del 50 % de la extensión del acuífero- debe ser determinante en el comportamiento hidrodinámico general del sistema.



Figura 1. Esquema hidrogeológico y de localización del acuífero de Sierra Gorda. Se señalan las posiciones de los principales grupos de manantiales o áreas de descarga, así como las direcciones aproximadas de flujo, establecidas a partir de la medición de niveles piezométricos en sondeos y la cota de los manantiales.

En favor de la existencia de una heterogeneidad y anisotropía del sistema, significativa a pequeña escala o en ciertas localidades como el pozo de Zafarraya, se tiene que: los manantiales más caudalosos no tienen por que ser los de cota más baja; las oscilaciones piezométricas, con rangos que pueden alcanzar los 100 m o más (Hidalgo, 1974), pueden ser de muy distinta importancia entre puntos relativamente cercanos; los valores de conductividad hidráulica aparente, estimados a partir de ensayos de bombeo y espesores captados, varían de manera considerable entre menos de 0,1 y más de 200 m/día (López Chicano, 1992); la complejidad tectónica del área favorece la existencia de determinados compartimentos hidrogeológicos de funcionamiento particular (López Chicano y Pulido Bosch, 1989); las escasas pruebas realizadas con trazadores parecen indicar altas velocidades de flujo, comprendidas entre 200 y 500 m/día, aunque hay que reconocer que las condiciones en las que se realizaron fueron pésimas (López Chicano, 1992).

La Figura 1 muestra las direcciones aproximadas del flujo subterráneo en buena parte del acuífero; se observa que los manantiales del sector septentrional se posicionan alineados con tres de los juegos de fracturas antes definidos. Aunque todas las familias de fracturas parecen participar en la transmisión del flujo, la diferente historia geológica de estas discontinuidades puede repercutir en la existencia de distintos comportamientos hidrodinámicos e hidrogeoquímicos de detalle (López Chicano y Pulido Bosch, 1993).

MATERIALES Y METODOS

Con objeto de profundizar en el comportamiento hidrodinámico e hidrogeoquímico del acuífero de Sierra Gorda se instalaron sendos equipos de registro en continuo en dos de las principales surgencias del sector norte del acuífero. La idea original consistía en equipar una de las surgencias del borde nororiental y otra del borde noroccidental. La ubicación definitiva de los costosos equipos estuvo fuertemente condicionada por la necesidad de su protección frente a posibles ataques vandálicos. Así, se decidió y consiguió su instalación en las captaciones de agua para abastecimiento urbano -propiedad del Ayuntamiento de Loja- ubicadas en los manantiales de Riofrío y Terciado (Figura 1), ambas protegidas por pequeñas casetas de acceso restringido.

El manantial de Riofrío constituye el principal punto de descarga de todo el sistema hidrogeológico. Situado a cota 515 m s.n.m., su caudal medio es del orden de 1100 l/s (un 25 % del total de los recursos medios renovables), con un coeficiente de variación del 34 %. El caudal máximo registrado en el período 1974-90 fue de unos 2300 l/s, mientras el mínimo fue de 535 l/s (López Chicano, 1992). Terciado (502 m de cota y principal abastecimiento de la ciudad de Loja) presenta una descarga mucho más modesta -en torno a 90 l/s de media (2 % de los recursos renovables)- y modulada que Riofrío; en el mismo período, el caudal máximo fue del orden de 180 l/s y el mínimo de 50 l/s, con un coeficiente de variación del 21 %.

Para cada manantial, el equipamiento consistió en un sistema de procesamiento y almacenamiento de información ("data logger") de la marca británica Delta-T, de 62 canales, alimentado por una batería y programado para registrar datos cada hora. A este dispositivo se conectaron sensores -estandarizados por el mismo

fabricante- de temperatura del agua, temperatura del aire y un pluviómetro de balancín de 0,2 mm de precisión. Obviamente, estos últimos se instalaron en el exterior. La precisión de los sensores de temperatura, fabricados con resistencias de platino, es de una centésima de grado. Además, al data logger se adaptaron un conductímetro (0,1 μ S/cm de precisión) y un pH-metro portátiles convencionales, alimentados desde la misma batería de aquél, de la firma alemana WTW y provistos de sensores de temperatura para compensación automática de la lectura a 25 °C. Los electrodos de éstos últimos, junto al de temperatura del agua se sumergieron con ayuda de un pequeño lastre adicional. En el caso de Terciado su ubicación fue una pequeña arqueta de control de la conducción que capta por gravedad una parte o la totalidad del agua del manantial, dependiendo del caudal natural surgente; mientras que en Riofrío fue un pequeño depósito de unos 20 m³ construido bajo la superficie del terreno, donde una parte del agua del manantial entra y sale continuamente con un caudal variable según la altura de la lámina de agua natural en la surgencia. Hemos estimado que el tiempo máximo de renovación total del agua de este depósito es de unas 4 horas. Además, la entrada en funcionamiento de una pequeña bomba destinada al suministro de la aldea de Riofrío favorece la renovación del agua y apenas perturba la composición química de ésta.

Con esta configuración, se comenzaron los registros en Marzo de 1994 y pronto se detectaron los primeros problemas. El pH-metro y el conductímetro interferían sus señales entre sí produciendo bruscos saltos en las lecturas, pero aún peor fue que su elevado consumo eléctrico -ante la necesidad de que ambos funcionaran continuamente- agotaba rápidamente la batería, de manera que, a medida que ésta se iba descargando, se observaban paralelamente tendencias sospechosas. Se decidió prescindir del registro del pH que nunca dio valores fiables y se procedió a alimentar el conductímetro a partir de la red eléctrica, con la mediación de un pequeño transformador provisto de estabilizador de corriente.

Un problema más añadido al proceso de instrumentación de los manantiales fueron los cortes en el suministro eléctrico, que se producían casi sistemáticamente en los períodos de lluvia intensa, los cuales afectaron únicamente a la medición de la conductividad del agua; éstos son los responsables de las interrupciones en el registro de este parámetro que se observan en las Figuras 2, 3 y 4. Una vez producido el corte del fluido eléctrico era necesario reinicializar manualmente el conductímetro, pues la escala de trabajo por defecto del mismo es de 0-100 mS/cm, así, aunque la corriente fuera repuesta inmediatamente, los registros del "data logger" se efectuaban siempre fuera de rango hasta la llegada del investigador para efectuar un nuevo volcado de datos. Este problema fue solucionado en Riofrío a partir de Diciembre de 1995 con la instalación de una placa solar que consigue mantener a plena carga una batería autónoma para la alimentación del conductímetro.

Por último, es necesario decir que las complejas derivaciones de agua existentes en el manantial de Terciado y la protección legal a la que está sometida la ribera del río Frío, junto con las fuertes inversiones necesarias para la construcción de sendas estaciones de aforo, no nos ha permitido hasta ahora realizar el control de los caudales de ambos manantiales, pese a disponer de equipos electrónicos adecuados para la medición automatizada de alturas de lámina de agua.

RESULTADOS

En las Figuras 2 y 3 se presentan las series temporales de los totales de lluvia diaria, temperaturas medias diarias del aire y del agua y conductividad eléctrica media diaria registradas en los manantiales de Riofrio y Terciado, respectivamente, para el periodo comprendido entre el 1 de Abril de 1994 y el 12 de Agosto de 1996. La Tabla 1 complementa los gráficos de evolución cronológica con algunos cálculos estadísticos descriptivos.

Un primer hecho que debe ser resaltado es que el ciclo hidrológico 1994/95 (Octubre a Septiembre) ha sido, desde el punto de vista pluviométrico, el año más seco de los últimos 40 años al menos, con una precipitación total un 50 % más baja que la media anual de esta región. En ninguna de las estaciones de registro se superan los 250 mm (Tabla 1). Este año, la infiltración eficaz en el acuífero fue extremadamente baja, no siendo apreciable a simple vista el aumento del caudal de las surgencias, aunque éste debió existir. En cambio, durante el año hidrológico 1995/96 se ha producido un buen número de episodios lluviosos, entre los meses de Noviembre y Mayo, de manera que la precipitación total -unos 700 mm- es aproximadamente un 40 % más alta que la media anual. Ante este cambio drástico en las condiciones de recarga pluviométrica, el caudal de los manantiales ha aumentado de forma espectacular, a la vez que es evidente que se ha producido una respuesta importante de las características fisicoquímicas del agua drenada por el acuífero, al menos así lo pone de manifiesto la crónica de conductividad (Figuras 2 y 3).

Las temperaturas medias diarias del aire siguen una evolución totalmente normal de acuerdo a la sucesión característica de las estaciones del año. En invierno los valores mínimos se aproximan a cero grados, mientras que en verano los máximos rondan los 35 °C. Los rangos de oscilación son similares en ambas estaciones de control, sin embargo, las temperaturas medias son del orden de 1 °C más altas en Terciado que en Riofrio. Ello es acorde con la caracterización térmica realizada por López Chicano (1992) para esta región, donde se pone de manifiesto que el borde nororiental de Sierra Gorda es ligeramente más cálido que el noroccidental.

Respecto a las temperaturas del agua, se observa que los rangos de variación en ambos manantiales son extremadamente bajos, con máximos para todo el periodo de 1,54 °C en Riofrio y de sólo 0,11 °C en Terciado; los coeficientes de variación son del orden de 1,6 y 0,2 %, respectivamente (Tabla 1). La constancia de la temperatura del agua en estas surgencias es sorprendente para un acuífero carbonatado, tanto más cuando se observa con bastante claridad que hasta Noviembre de 1995 -momento en que comienza el periodo de lluvias más importante de todo el registro- la variabilidad de éste parámetro está condicionada esencialmente por la de la temperatura del aire. La correlación entre ambas temperaturas es buena salvo a partir del verano de 1995, debido a que el descenso del nivel del agua -a consecuencia de la sequía- en los puntos donde se sumergieron los electrodos aumentaba la exposición de éstos a la transmisión de calor desde el aire, o bien disminuía el volumen de agua a calentar por la radiación solar. Este hecho explica, por ejemplo, que en ambos manantiales la temperatura del agua fuese mayor en el año 1995 que en el 1994 (Figuras 2 y 3).

Periodo		RIOFRIO				TERCIADO			
		Lluvia	T aire	T agua	Cond.	Lluvia	T aire	T agua	Cond.
1993/94	n	193	192	193	109	193	193	193	156
	$\bar{x}/\Sigma x$	70.2	20.87	14.29	397.9	74.0	22.05	15.80	510.7
	máximo	14.4	33.50	14.54	403.4	16.6	34.19	15.81	516.5
	mínimo	0.0	7.05	13.68	392.1	0.0	8.19	15.79	502.5
	rango		26.45	0.86	11.3	26.01	0.02	0.02	14.0
	σ_n	1.5	6.21	0.22	2.4	1.7	6.32	0.00	4.4
	c.v.(%)		29.77	1.54	0.6	28.65	0.03	0.9	
1994/95	n	365	365	365	217	365	351	353	264
	$\bar{x}/\Sigma x$	244.6	15.83	14.39	395.6	222.4	16.85	15.80	513.8
	máximo	33.6	33.13	14.84	403.8	33.6	34.19	15.86	518.4
	mínimo	0.0	-0.80	13.98	389.6	0.0	-0.14	15.76	510.4
	rango		33.93	0.86	14.2	34.33	0.10	0.10	8.0
	σ_n	2.9	7.15	0.23	2.8	2.7	7.55	0.03	1.7
	c.v.(%)		45.15	1.59	0.7	44.81	0.17	0.3	
1995/96	n	317	317	317	310	317	317	192	288
	$\bar{x}/\Sigma x$	713.6	14.89	14.28	428.6	686.8	15.61	15.83	529.0
	máximo	63.6	31.37	14.72	469.9	61.8	31.84	15.87	596.1
	mínimo	0.0	1.78	13.30	398.9	0.0	1.93	15.78	468.6
	rango		29.59	1.43	71.0	29.91	0.09	0.09	127.5
	σ_n	6.4	6.30	0.23	20.2	5.9	6.87	0.04	39.8
	c.v.(%)		42.33	1.61	4.7	44.02	0.22	7.5	
TODO	n	875	874	875	636	875	861	738	708
	$\bar{x}/\Sigma x$	1028.4	16.59	14.33	412.1	983.2	17.55	15.81	519.3
	máximo	63.6	33.50	14.84	469.9	61.8	34.19	15.87	596.1
	mínimo	0.0	-0.80	13.30	389.6	0.0	-0.14	15.76	468.6
	rango		34.30	1.54	80.3	34.33	0.11	0.11	127.5
	σ_n	4.4	7.04	0.23	21.5	4.1	7.46	0.03	26.7
	c.v.(%)		42.41	1.63	5.2	42.51	0.18	5.2	

Tabla 1. Parámetros estadísticos básicos de las series de datos diarios en los manantiales de Riofrio y Terciado (lluvia en mm, temperaturas en °C y conductividad en $\mu S/cm$ a 25 °C), para los ciclos hidrológicos 1993/94 a 1995/96 y para todo el periodo de registro (Abril de 1994 a Agosto de 1996).

Es posible minimizar ese efecto no hidrogeológico transformando las series de temperatura del agua en función de la temperatura del aire y aplicando un filtro que puede ser proporcional al vaciado exponencial del acuífero.

En tanto se realiza esta labor, es posible hacer algunas observaciones más sobre las crónicas de temperatura del agua. En Riofrío se observa un brusco descenso durante el mes de Octubre de 1995 que rompe la tendencia decreciente. No debe ser tenido en cuenta ya que en ese período se estuvieron realizando obras de mejora en la captación del manantial, debido al descenso de cota del punto de surgencia natural. En cambio, sí es evidente el hecho de que, a partir de Diciembre de 1995, coincidiendo con el período de lluvias continuadas y después de éste, la temperatura del agua sigue una evolución en la que no se aprecia tan marcadamente la influencia de la temperatura del aire. La Figura 4 permite ver, con datos horarios, cómo la periodicidad diaria en la temperatura del manantial se pierde cuando comienza a llover a finales de Diciembre de 1995, momento en el que es apreciable a simple vista el aumento de caudal de la surgencia. Se trata por tanto de un período en el que las oscilaciones de temperatura se pueden interpretar como cambios físicos propios del campo térmico del manantial, de respuesta ante la recarga pluviométrica. Es significativo un brusco descenso de la temperatura durante el mes de Febrero de 1996, manteniéndose los bajos valores hasta comienzos de Marzo en que la recuperación se hace también de forma más o menos brusca. La interpretación de este mínimo relativo, aislado dentro de una serie de 8 meses de duración en que la tendencia general es hacia un paulatino aumento de la temperatura con oscilaciones del orden sólo de la décima de grado (Figuras 2 y 4), será discutida en el apartado siguiente.

En Terciado, la temperatura media del agua es aproximadamente 1 °C más alta que la de Riofrío, lo que podría sugerir que su agua circula en el acuífero en torno a 50 m más profunda que la de aquí. No obstante, hay que recordar que su cota es 13 m más baja y que la mitad oriental de Sierra Gorda es algo más cálida que la occidental, como ya se sugirió anteriormente. Como en el caso de Riofrío, la parte interpretable -en términos hidrogeológicos- de la crónica de temperaturas del agua comienza a finales de Diciembre de 1995, cuando se amortigua la periodicidad diaria del registro (Figura 4). Tras las lluvias de finales de Diciembre de 1995 y de Enero de 1996, la temperatura del agua desciende muy suavemente (sólo escasas centésimas), hasta finales de Marzo de 1996 en que comienza la recuperación. Por desgracia ésta última no ha podido ser caracterizada convenientemente debido a que el aumento del caudal soltó el lastre de los electrodos y el rozamiento contra el muro de la arqueta cizalló el cable del sensor.

Respecto a la conductividad eléctrica del agua, las evoluciones de ambos manantiales son muy diferentes entre sí. En primer lugar, se observa que la conductividad eléctrica en Terciado es siempre superior a la de Riofrío, unos 100-120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a nivel medio anual o de todo el período de estudio (Tabla 1); sólo a finales de Febrero de 1996 sus valores se aproximan, aunque sin llegar a ser exactamente iguales (Figura 4). En períodos de recarga pluviométrica esporádica y poco importante, como en el ciclo 1994/95, la variabilidad de los registros es mayor en Riofrío que en Terciado, siendo los coeficientes de variación muy bajos en ambos (0,7 y 0,3 %, respectivamente). En años más húmedos (ciclos 1993/94 y 1995/96) ocurre lo contrario, los cambios en la mineralización del agua en Terciado

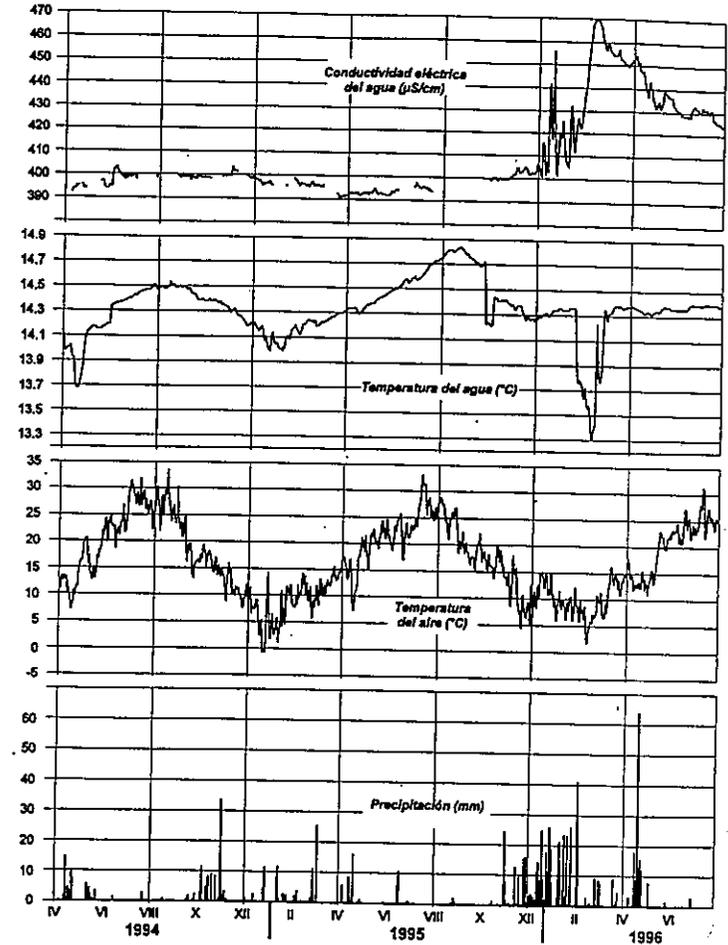


Figura 2. Conductividad eléctrica, temperatura del agua, temperatura del aire y precipitación registradas en el manantial de Riofrío entre Abril de 1994 y Agosto de 1996. Los valores son medias diarias para los tres primeros y totales diarios para la precipitación.

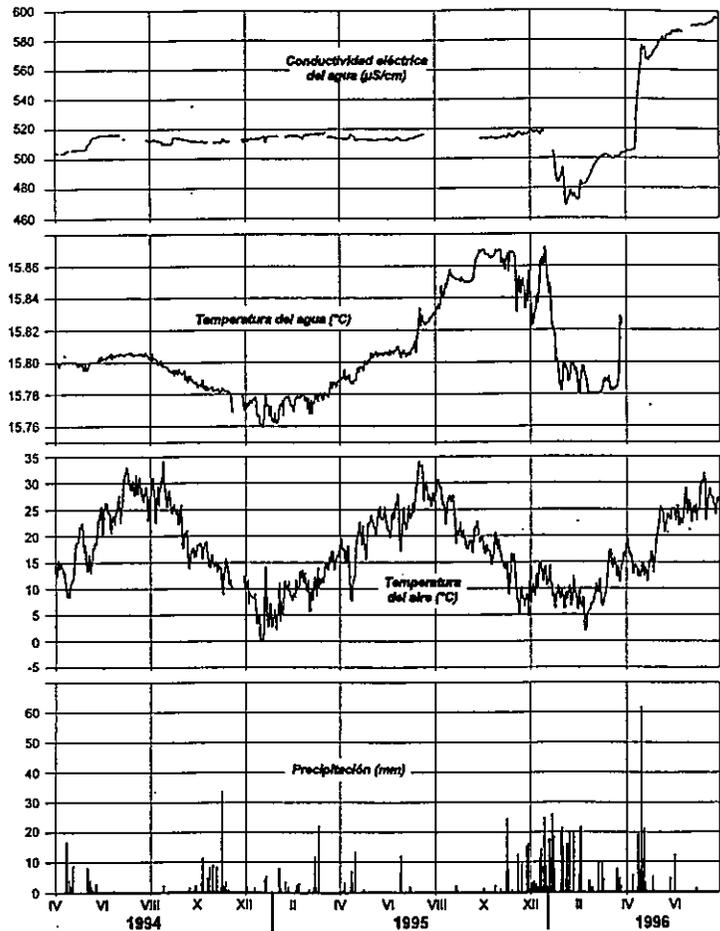


Figura 3. Conductividad eléctrica, temperatura del agua, temperatura del aire y precipitación registradas en el manantial de Terciado entre Abril de 1994 y Agosto de 1996. Los valores son medias diarias para los tres primeros y totales diarios para la precipitación.

son cuantitativamente más importantes que en Riofrío. Para ambos manantiales, no existe gran diferencia en el comportamiento de este parámetro a nivel diario (Figuras 2 y 3) o a nivel horario (Figura 4).

En estos gráficos es posible apreciar cómo las perturbaciones hidroquímicas se producen de una forma más rápida en Riofrío que en Terciado. Esto ocurre también en el caso de los caudales (López Chicano, 1992). En Riofrío, la respuesta del manantial frente a la recarga es casi sistemáticamente la misma. En escasas horas se produce un aumento rápido de la mineralización y un suave descenso posterior que puede durar varios días o varios meses. Este flujo pistón se muestra como fuertes pulsaciones en los primeros momentos de la recarga otoñal-invernal, como ocurre entre Noviembre de 1995 y comienzos de Febrero de 1996. La morfología de estas pulsaciones depende de la intensidad y duración de los aguaceros, así como del estado de saturación precedente del acuífero; así, por ejemplo, las lluvias de mediados de Febrero de 1996 son las que provocan los efectos más espectaculares. Tras ellas se alcanzan los valores de conductividad más altos y probablemente también los caudales punta del manantial. Durante la recesión, en un período en el que se observa un progresivo aumento de la dilución por la llegada más importante de las aguas de infiltración reciente, la lluvias primaverales (como las ocurridas a comienzos de Mayo de 1996) provocan un comportamiento semejante a las del resto del año, aunque mucho más atenuado pese a ser éstas de gran intensidad. Llama la atención el hecho de que durante el ciclo 1994/95 la escasa recarga pluviométrica consigue una dilución ligera aunque apreciable de las aguas drenadas por el manantial; mientras que en el período representado para 1995/96 nunca se retorna a los valores de conductividad de partida al comienzo del ciclo.

En Terciado, a parte del retraso ya comentado en el comienzo de la primera respuesta hidrogeoquímica significativa, es patente que ésta es de signo contrario a la de Riofrío (Figuras 3 y 4). A partir de comienzos de Enero de 1996, se entra en un período generalizado en el que la conductividad -con pequeñas fluctuaciones- descende notablemente. Tres meses después del comienzo de la bajada aún no se han recuperado totalmente los valores de mineralización previos, cuando, coincidiendo con las precipitaciones de principios de Mayo, tiene lugar un aumento espectacular en la mineralización. Esta tendencia se mantiene posteriormente hasta el final del registro, en ausencia de precipitaciones significativas. Aunque mucho más amortiguado, un comportamiento similar puede ser observado durante la primavera de 1994 (Figura 3).

DISCUSION Y CONCLUSIONES

La evolución de la temperatura y la conductividad del agua de los manantiales de Riofrío y Terciado, frente a la recarga pluviométrica, admite una interesante discusión sobre el comportamiento de manantiales kársticos en un sistema general de flujo difuso o muy inercial. Este comportamiento global del acuífero -a nivel de la zona saturada- debe ser mantenido como modelo conceptual para Sierra Gorda, en vista de la escasa variabilidad de ambos parámetros y para ambos manantiales, de acuerdo con las ideas de Shuster y White (1971) y Atkinson (1977), y al margen de los argumentos expuestos en el apartado de descripción del acuífero. Los bajos

coeficientes de variación obtenidos para estos parámetros, aunque diferentes según la intensidad y magnitud de la recarga pluviométrica, son representativos de su funcionamiento ya que el periodo de control incluye un ciclo hidrológico muy seco y otro húmedo.

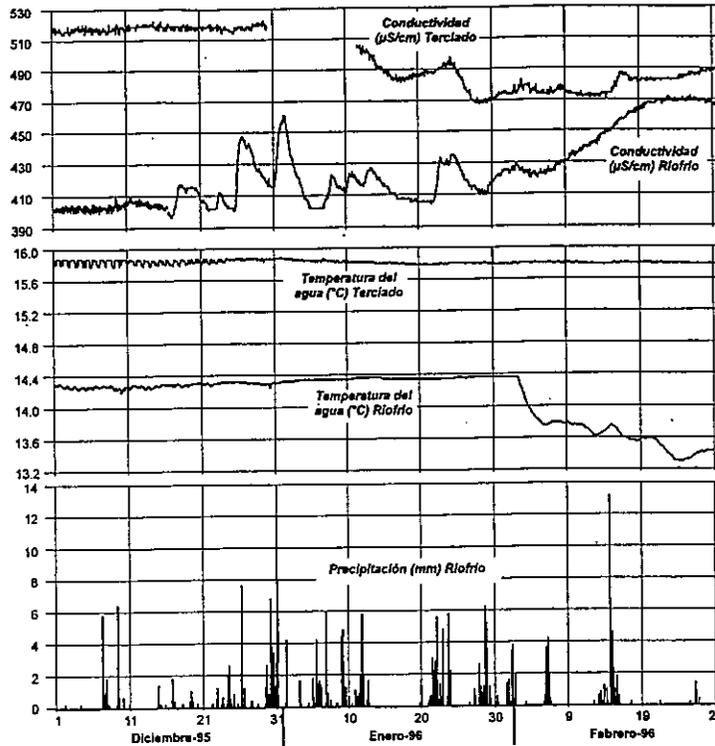


Figura 4. Conductividad eléctrica y temperatura del agua en los manantiales de Riofrío y Terciado y precipitación en Riofrío, registradas desde Diciembre de 1995 a Febrero de 1996. Los valores son medidas horarias puntuales para los dos primeros parámetros, mientras que el gráfico de precipitación representa totales de lluvia acumulados cada hora.

En principio, ambos manantiales muestran áreas de recarga con características litológicas y geomorfológicas similares, constituyendo el drenaje regional de cuencas hidrogeológicas de distinta superficie, pero de longitudes semejantes, que pueden alcanzar -como parecen sugerir los ensayos de trazado (López Chicano, 1992)- incluso al polje de Zafarraya. Por ello, es factible interpretar las diferencias en el comportamiento fisicoquímico de las surgencias (sobre todo las de conductividad) principalmente como cambios en el desarrollo de la permeabilidad por fisuración y karstificación en sus respectivas cuencas hidrogeológicas, obviando así, en parte, otros factores como los indicados por Scanlon y Thrailkill (1987).

Admitiendo, de acuerdo con Custodio (1986) y Dreiss (1989), que el agua drenada por un manantial kárstico constituye una mezcla de proporciones variables en el tiempo entre aguas propias del acuífero -con gran tiempo de residencia en el mismo y equilibradas con la roca- y aguas de renovación infiltradas recientemente tras los episodios lluviosos, menos mineralizadas y más frías (en el caso de Sierra Gorda, por el hecho de situarse el área de recarga preferente a unos 1200 m s.n.m. (López Chicano, 1992), habría que concluir que la temperatura del agua de estos manantiales apenas permite discriminar entre aguas de distinta procedencia, pues la homotermia de los mismos es considerable. La explicación de éste fenómeno puede ser sencilla si tenemos en cuenta que el acuífero muestra una zona no saturada de gran espesor (varios cientos de metros en cualquier caso), de manera que el agua de reciente infiltración alcanza las surgencias casi totalmente equilibrada desde el punto de vista térmico con la roca y el agua preexistente en la zona saturada, con la cual se mezcla.

Una excepción a ésta norma es la brusca bajada detectada en Riofrío durante el mes de Febrero de 1996, configurando un mínimo relativo que debe traducir la llegada al manantial de aguas de renovación muy frías, que no han tenido tiempo de alcanzar el equilibrio térmico a pesar del espesor de zona no saturada que han debido atravesar. Durante ningún otro periodo lluvioso importante se detecta un comportamiento similar, siendo llamativo que éste se produzca en un momento en el que las temperaturas medias diarias del aire en la parte superior de la sierra debían ser próximas a cero grados (unos 6 °C más bajas que en Riofrío o Terciado). Por ello, pensamos que la explicación del mínimo aislado en la crónica de temperaturas de Riofrío debe estar en relación a la fusión de la nieve acumulada en los meses de Enero y Febrero de 1996 en la parte alta de la sierra, y a la rápida percolación de este agua muy fría. Este fenómeno no se reproduce en el caso de Terciado, quizás porque la altitud media de su cuenca de alimentación es algo más baja que la de Riofrío (las cotas más altas del macizo, por encima de 1500 m, se encuentran principalmente en la mitad occidental). No obstante, desde mediados de Enero y hasta finales de Febrero de 1996, se aprecia que las aguas drenadas por este manantial son ligerísimamente más frías, aunque en este caso no es necesario pensar únicamente en la llegada de aguas de fusión de nieve.

Las series temporales de conductividad para ambos manantiales permiten extraer una mayor información sobre el comportamiento hidrodinámico de la parte del acuífero drenada por cada uno de los manantiales, complementada a veces con algunos de los datos térmicos del agua. La mineralización del agua de estos manantiales, según se desprende de estudios hidrogeoquímicos básicos (López Chicano, 1992), está ligada estrechamente a la concentración en bicarbonatos,

calcio y magnesio, pero también a la de cloruros, sulfatos, sodio y potasio, pues se demuestra que la zona saturada (con la participación del substrato impermeable) aporta importantes cantidades de éstos últimos. Ello quiere decir que el aumento de la mineralización del agua, detectado tarde o temprano en los dos manantiales, frente a la recarga pluviométrica, no es consecuencia del aporte -por ejemplo- de cloruros acumulados por evaporación en la zona subcutánea o epikárstica del macizo, tal y como ocurre en otros acuíferos kársticos (Marjolet y Salado, 1975; Williams, 1983; Blavoux y Mudry, 1986; Pulido Bosch y Cerón, 1991), sino de la descarga preferente de agua residente en la zona saturada durante largos períodos.

El comportamiento de la conductividad en el manantial de Riofrío es el de un flujo de tipo pistón llevado al extremo. Se podría pensar que el aumento de la mineralización del agua tras cada evento lluvioso es consecuencia de la llegada de aguas de renovación que, con un alto poder de agresión hacia la roca carbonatada, se cargan de sales en su recorrido previo por el acuífero. No obstante, debido a que el proceso de disolución de los carbonatos requiere un cierto tiempo, sin duda superior a las pocas horas en las que se produce la respuesta de la conductividad tras el comienzo de las precipitaciones, permite descartar esta hipótesis. Es mucho más verosímil interpretar los aumentos de conductividad como debidos a la subida del nivel piezométrico y subsecuente puesta en carga de la red kárstica en la zona saturada por la infiltración rápida a través de conductos muy transmisivos de la zona no saturada. El aumento de la carga hidráulica produce una transferencia de masa hacia la surgencia (aumento de caudal), pero de aguas relativamente mineralizadas y de gran tiempo de permanencia que ocupan la zona saturada. El posterior descenso de la conductividad traduce la llegada progresiva y retardada de las aguas de renovación menos mineralizadas.

El hecho de que, durante el ciclo 1995/96, nunca se recuperen los valores de conductividad previos al período de recarga, indica que en todo ese lapsus de tiempo siempre predominan en la mezcla las aguas "antiguas". Cuanto mayor es la altura piezométrica menor -o más lenta- es la recuperación de los valores de conductividad por dilución, probablemente debido a que el aumento del gradiente hidráulico favorece la expulsión de aguas más profundas y más mineralizadas. Todo ello es acorde con un modelo conceptual de la zona saturada del acuífero en el que la capacidad de almacenamiento es grande y la permeabilidad desarrollada por fracturación y karstificación, sin ser baja, es relativamente homogénea (Pulido Bosch, 1986) incluso en profundidad, no existiendo desarrollo de grandes conductos de disolución aislados en la masa carbonatada. No obstante, en la cuenca drenada por este manantial subsiste una cierta heterogeneidad y anisotropía, pues es evidente que los rápidos incrementos y recuperaciones de la mineralización en los primeros momentos del período lluvioso son consecuencia de la actuación de estructuras más transmisivas (en contra de lo argumentado por Kiraly y Muller, 1979), en tanto que -a partir de mediados de Febrero de 1996- es toda la masa carbonatada la que participa en la conducción del flujo.

En este contexto, de predominio de las aguas de larga residencia frente a las de renovación en la mezcla evacuada, la existencia de un mínimo acusado en la temperatura (antes explicado como llegada de aguas de fusión de nieve) frente a un continuo ascenso en la mineralización, indica que la temperatura es un

parámetro sensible sólo a la llegada de esas aguas frías y no permite detectar la llegada de otras aguas de infiltración reciente que consiguen equilibrarse térmicamente. Así, el hecho de tener en cuenta ambos parámetros, temperatura y conductividad del agua, enriquece la interpretación.

La respuesta hidroquímica a la infiltración del agua de lluvia es considerablemente más rápida en Riofrío que en Terciado, lo que se interpreta como la existencia de una mayor difusividad hidráulica en la cuenca hidrogeológica del primero. Puesto que el flujo hacia Riofrío parece tener una componente SE-NO importante, esta observación es acorde con los resultados de los estudios sobre fracturación realizados en Sierra Gorda (López Chicano y Pulido Bosch, 1993).

El comportamiento hidroquímico de Terciado es realmente llamativo. En la bibliografía utilizada nunca se reportan comportamientos similares al de este manantial. Por un lado se tiene su gran constancia térmica, con variaciones significativas muy pequeñas que se está tentado de no interpretar; por otro, la evolución de la conductividad refleja funcionamientos hidrodinámicos incluso contrapuestos. Los escasos datos de caudal disponibles para este manantial ya indicaban un comportamiento muy regular y algo anómalo del hidrograma (López Chicano, 1992). El retraso en el comienzo de las perturbaciones en la conductividad respecto a Riofrío, antes comentado, debe ser sin duda consecuencia de una menor permeabilidad y un menor desarrollo de la karstificación en su cuenca hidrogeológica (menor difusividad), lo que está de acuerdo con las deducciones estructurales antes referidas, en el sentido de que las fracturas predominantes en su cuenca (NE-SO) son menos transmisivas.

Una vez producida la respuesta, se observa que predomina en el manantial la llegada de aguas de infiltración reciente, produciéndose un claro descenso de la mineralización y un ligerísimo enfriamiento del agua evacuada. Hay que tener en cuenta que las dimensiones de su área de alimentación son más pequeñas que las de Riofrío y su descarga considerablemente menos voluminosa, pero ello no implica forzosamente que el grado de dilución tenga que ser menor en esta parte del acuífero. La explicación podría estar en el funcionamiento independiente de una parte de su área de alimentación por un menor desarrollo de la permeabilidad a nivel de la zona saturada, de manera que el flujo pistón reconocido en Riofrío alcanza a éste manantial con varios meses de retraso, después incluso de la punta de la crecida principal. No se puede descartar, por tanto, la posibilidad de la existencia de compartimentos de funcionamiento hidrodinámico distinto en el seno del acuífero, o los cambios temporales en la posición de las divisorias hidrogeológicas.

La reflexión sobre el reconocimiento de la existencia de un flujo de tipo pistón en los manantiales estudiados conduce a pensar que la mayor parte de las reacciones químicas de disolución de los carbonatos se lleva a cabo en la zona no saturada y en partes de la saturada alejadas de los manantiales, de forma que la red kárstica actual es relativamente joven, poco jerarquizada y poco desarrollada en general. Los datos sobre la evolución geodinámica reciente de este macizo son congruentes con esta idea (López Chicano, 1995).

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca dentro de los proyectos AMB92-0211 y AMB95-0439, financiados por la CICYT. También se ha beneficiado del soporte económico del Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Junta de Andalucía. Agradecemos la colaboración del Ayuntamiento de Loja por permitir la instalación de los equipos de registro en las captaciones de su propiedad ubicadas en los manantiales.

BIBLIOGRAFIA

- AGUAYO, J.; ANTIGUEDAD, I.; ERASO, A.; GARCIA de CORTAZAR, A. y TAMES, P. (1988). Respuesta hidroquímica en el tránsito aguas bajas-altas en las principales surgencias de la unidad hidrogeológica Gatzume-Zestoa (Gipuzkoa). Implicaciones sobre la organización del drenaje kárstico. *Hidrogeología*, 3: 35-49.
- ATKINSON, T.C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (GB). *Journal of Hydrology*, 35: 93-110.
- BAKALOWICZ, M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. *Thèse Doct. és Sciences Univ. Pierre et Marie Curie, Paris-VI*, 269 p.
- BAKALOWICZ, M. y MANGIN, A. (1980). L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. *Mém. h. sér. Soc. Géol. France*, 11: 71-79.
- BLAVOUX, M. y MUDRY, J. (1983). Séparations des composantes de l'écoulement d'un exutoire karstique à l'aide des méthodes physico-chimiques. *Hydrogéologie-Géologie de l'ingénieur*, 4: 269-278.
- BLAVOUX, B. y MUDRY, J. (1986). Impact des pluies estivales sur la qualité des réserves de l'aquifère karstique: le rôle du sol et de l'epikarst dans la concentration des chlorures. *Bull. Soc. Géol. France*, 8: 667-674.
- CUSTODIO, E. (1986). Hidroquímica del Karst. *Jornadas sobre el Karst en Euskadi*, 2: 131-180. Donostia-San Sebastián.
- DREISS, S.J. (1989). Regional Scale Transport in a Karst Aquifer. 1. Component Separation of Spring Flow Hydrographs. *Water Resources Research*, 25: 117-125.
- FORD, D. y WILLIAMS, P. (1989). Karst Geomorphology and Hydrology. *Unwin Hyman*, 601 p. London.
- HESS, J.W. y WHITE, W.B. (1988). Storm response of the karstic carbonate aquifer of southcentral Kentucky. *Journal of Hydrology*, 99: 235-252.
- HESS, J.W. y WHITE, W.B. (1993). Groundwater geochemistry of the carbonate karst aquifer, southcentral Kentucky, USA. *Applied Geochemistry*, 8: 189-204.
- HIDALGO, J. (1974). Fluctuaciones del nivel piezométrico en el pozo de Zafarraya (Provincia de Granada). *Doc. Inv. Hidrol.*, 16: 95-112. Barcelona.
- JACOBSON, R.L. y LANGMUIR, D. (1974). Controls on the quality variations of some carbonate spring waters. *Journal of Hydrology*, 23: 247-265.
- KIRALY, L. y MULLER, I. (1979). Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le Karst: effect sur la variation du chimisme des sources karstiques. *Bull. Centre Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel*, 3: 237-285.
- LOPEZ CHICANO, M. (1992). Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda y su entorno (Granada y Málaga). *Tesis Doctoral Univ. Granada*, 429 p.
- Interpretación preliminar de las variaciones de temperatura y conductividad del agua en dos manantiales correspondientes al sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda
- LOPEZ CHICANO, M. (1995). El paisaje kárstico de Sierra Gorda. Formas y evolución Geodinámica reciente. *Espeleotemas*, 5: 31-50.
- LOPEZ 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, comunicaciones*, 2: 403-406. Granada.
- LOPEZ CHICANO, M. y PULIDO BOSCH, A. (1989). Compartimentación y descenso de niveles piezométricos en un sector del sistema de Sierra Gorda (Granada y Málaga). In: La sobreexplotación de acuíferos. *Temas Geológico-mineros, I.T.G.E.*, 10: 577-591. Almería.
- LOPEZ CHICANO, M. y PULIDO BOSCH, A. (1993). The fracturing in the Sierra Gorda karstic system (Granada). In: PULIDO-BOSCH, A. (ed.) Some Spanish Karstic Aquifers. *University of Granada*: 95-116.
- LOPEZ CHICANO, M. y PULIDO BOSCH, A. (1995). Los manantiales termominerales de Salar (Granada), un sistema de flujo profundo ligado esencialmente a la descarga de Sierra Gorda. *Geogaceta*, 18: 138-141.
- MANGIN, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatrice et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67: 25-43.
- MARJOLET, G. y SALADO, J. (1975). Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de la Source du Lez (Hérault). Etude des écoulements d'eau dans les calcaires fissurés et karstifiés du site du futur captage des eaux de la Source du Lez. *Thèse 3ème cycle, Univ. Montpellier*, 163 p.
- PEZZI, M.C. (1977). Un Karst caractéristique de montagne moyenne méditerranéenne: Sierra Gorda (Grenade), Cordillères Bétiques. *St. Trentini Sci. Nat.*, 54: 37-54.
- PULIDO BOSCH, A. (1986). Reflexiones sobre la hidrogeología kárstica basadas en ejemplos de las Cordilleras Béticas. *Jornadas sobre el Karst en Euskadi*, 2: 31-50. Donostia-San Sebastián.
- PULIDO BOSCH, A. y CERON, J.C. (1991). Variaciones hidrogeológicas de periodicidad anual en surgencias kársticas. Ejemplo del manantial de La Yedra (Málaga). *Rev. Soc. Geol. España*, 4, 1-2, 51-59.
- SCANLON, B.R. y THRAILKILL, J. (1987). Chemical similarities among physically distinct spring types in a karst terrain. *Journal of Hydrology*, 89: 259-279.
- SHUSTER, E.T. y WHITE, W.B. (1971). Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible mean for characterising carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 14: 93-128.
- WILLIAMS, P.W. (1983). The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61: 45-67.