

**Análisis de las características hidrogeológicas de los principales manantiales y estudio isotópico ( $\delta^{34}\text{S}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ ) de los acuíferos carbonáticos de las sierras Tejeda, Almirajara, Guájares y Albuñuelas**

**Proyecto *TEJAL***



**Jorge Prieto Mera**

**Bartolomé Andreo Navarro**

**2017**

## Índice

1.- INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 Metodología.....	3
1.2 Contexto Geológico .....	4
2. Características hidrogeológicas generales .....	7
2.1 Límites y geometría.....	7
2.2 Inventario de puntos de agua .....	10
2.3 Piezometría .....	11
2.4 Hidroquímica.....	13
2.5.- Características isotópicas .....	16
2.5.1.- $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ .....	16
2.5.2.- Carbono 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) .....	19
2.5.3.- Isótopos del azufre y del oxígeno del sulfato ( $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ ) .....	20
3. Evoluciones temporales de los manantiales .....	24
3.1.1.- La Fájara .....	24
3.1.2.- Manantiales del norte de Sierra Tejeda (Río Alhama y Játar) .....	30
3.1.3.- Manantial de Maro .....	33
3.1.4.- Manantial Cijancos.....	35
4. Conclusiones .....	37
5. Referencias .....	38
Anexo: Fichas de inventario de puntos de agua .....	40

## 1.- INTRODUCCIÓN

El proyecto *TEJAL* tiene como objetivo ampliar el conocimiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos de las sierras Tejeda, Almijara, Guájares y Albuñuelas. Para ello, el trabajo se divide en dos partes, por un lado se están analizando y tratando los datos recopilados por Isaac Pérez Ramos durante el periodo comprendido entre 2003 y 2006, así como los datos históricos de la red de control de aguas subterráneas del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Por otro lado, desde junio de 2015 se mantiene un control de las respuestas naturales en 10 manantiales, considerados como los más representativos, después de hacer un estudio preliminar de los datos antecedentes.

En el presente informe se presentan resultados del control mantenido en las surgencias seleccionadas desde junio de 2015 hasta la actualidad. Pretende ser una primera aproximación al funcionamiento hidrogeológico regional. Para ello, se caracterizará la distribución espacial de la composición química e isotópica del agua y se analizarán las evoluciones temporales de las respuestas naturales en los principales manantiales del área de estudio (Maro, La Fájara, Nacimiento del río Alhama, Nacimiento de Játar y Cijancos).

### 1.1 Metodología

Los parámetros físico-químicos del agua han sido medidos *in situ*. Para la conductividad eléctrica (CE) y la temperatura, se ha utilizado un equipo *WTW* modelo 3310 cuya precisión es de  $\pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$  y  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  respectivamente. Por otro lado, la medida del pH se llevó a cabo con un equipo *HACH LANGE*, modelo HQ10d, cuya precisión es de  $\pm 0,01$  unidades de pH.

Los análisis químicos e isotópicos se han llevado a cabo en el laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Los componentes químicos mayoritarios de cada muestra se han analizado mediante cromatografía iónica, con un equipo *METROHM*, modelo 881 *Compact IC Pro* para aniones y modelo 930 *compact IC Flex* para cationes.

Las determinaciones isotópicas se han realizado con equipos *PICARRO Cavity Ringdown spectrometer*, para obtener  $\delta^{13}\text{C}$  (modelo G1111-i) y  $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$  (modelo L2120-i).

### 1.2 Contexto Geológico

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio se sitúa dentro de la Zona Interna de la Cordillera Bética, los materiales que constituyen estos macizos montañosos forman parte del Complejo Alpujárride (Fig. 1). Se pueden diferenciar dos unidades tectónicas principales (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 2003): Almirajara y Guájares.

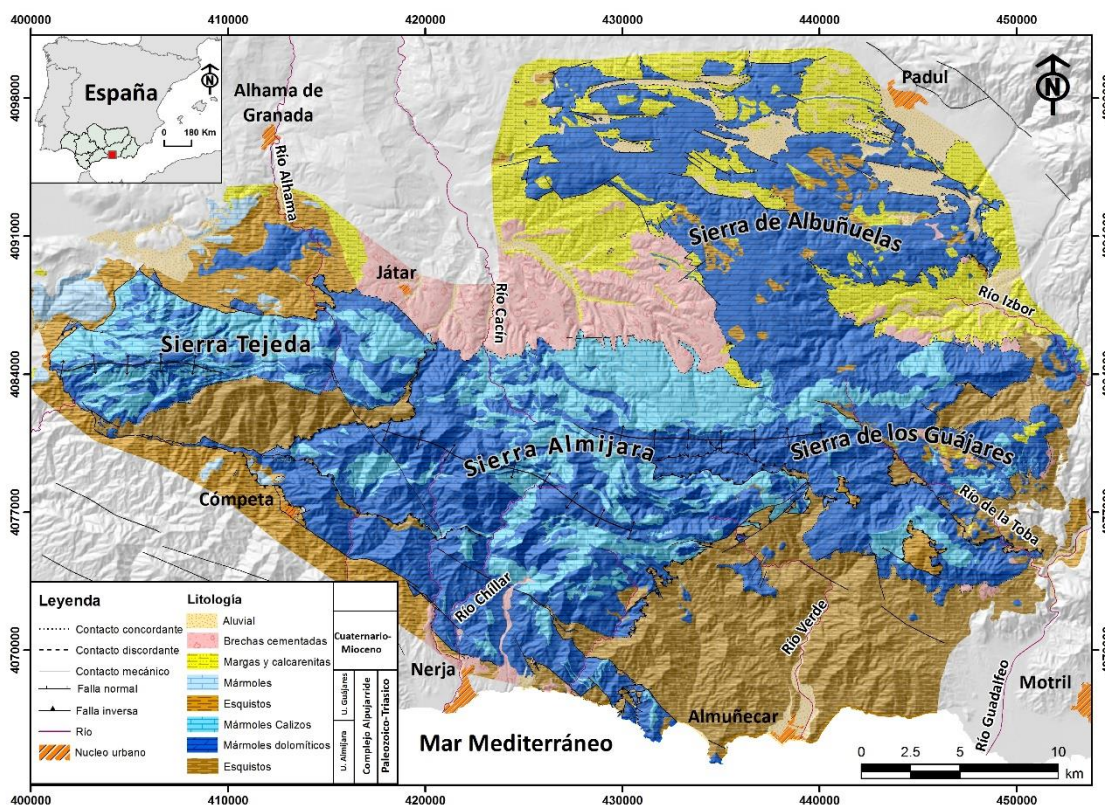


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio

La unidad de Almirajara (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 2003) aflora extensamente (Fig. 2) y tiene una sucesión estratigráfica que, de muro a techo, presenta esquistos del Paleozoico-Triásico Inferior de colores oscuros que pasan a tonos progresivamente más claros, cuya potencia total puede llegar a los 500 m. Inmediatamente encima se sitúan mármoles dolomíticos y calizos del Triásico

Medio con una potencia cercana a los 800 m y presentan intercalaciones de calcoesquistos de escasa continuidad lateral. Hacia techo, se encuentran mármoles dolomíticos blancos del Triásico Superior, de aspecto sacaroideo muy recrystalizados, se pueden observar en las zonas más altas de las sierras Tejeda y Almijara y más extensamente en la Sierra de Albuñuelas.

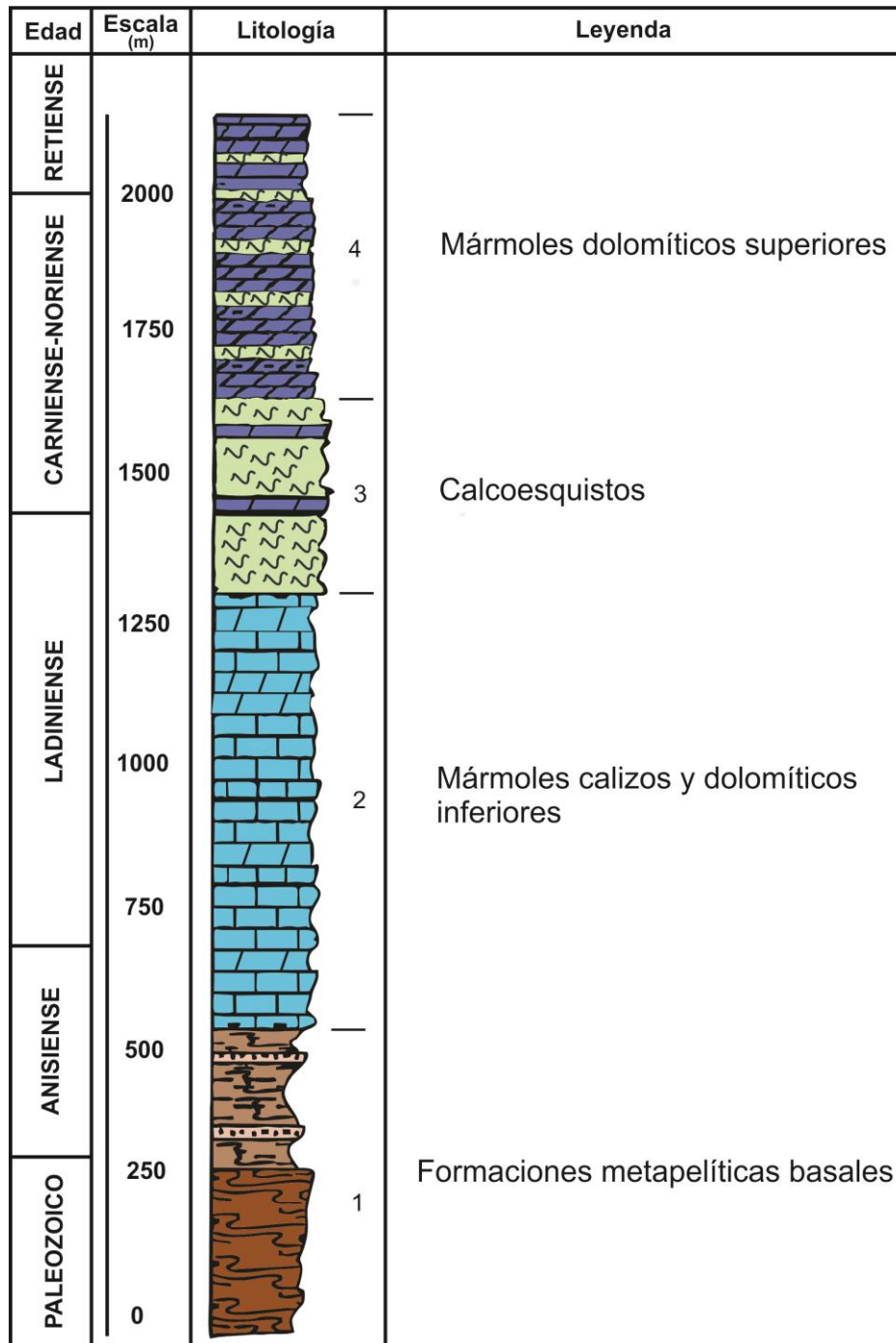


Figura 2. Columna estratigráfica de la U. Almijara (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 2003)

La unidad de Guájares se sitúa tectónicamente por encima de la unidad Almirajara (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 2003). Su tramo basal está formado por esquistos de color oscuro, con una potencia en torno a 500-600 m, y se atribuyen al Paleozoico. Encima aparecen unos esquistos de colores claros y tonos verdosos, de grano fino, cuya máxima potencia es de unos 300 m, y se podrían asignar al Trías Inferior. Sobre éstos, se sitúan mármoles dolomíticos de color claro, de los que se conservan algunos afloramientos pero son escasos y de reducidas dimensiones generalmente.

Por último, en el entorno de las sierras de Tejeda, Almirajara y Albuñuelas se pueden observar materiales del Terciario, más concretamente del Neógeno, los cuales permanecen horizontales o poco inclinados, con escasa deformación. Fueron depositadas sobre el sustrato alpujarride después de las principales fases de deformación orogénica, por lo que el contacto entre ambos conjuntos es de naturaleza discordante.

La estructura geológica de sierra Tejeda, Almirajara y Guájares consiste, a grandes rasgos, en una serie de grandes pliegues de dirección E-O aproximadamente. En detalle, la estructura es mucho más complicada. Existe gran número de repliegues a todas las escalas, desde kilométricos a centimétricos, los cuales son muy apretados generalmente. Sin embargo, la sierra de Albuñuelas tiene una estructura más o menos tabular.

## 2. Características hidrogeológicas generales

### 2.1 Límites y geometría

Las sierras Tejeda, Almirajara, Guájares y Albuñuelas constituyen un afloramiento de mármoles de más de 700 km<sup>2</sup> de extensión, cuyo espesor supera ampliamente los 500 m. Estos mármoles descansan sobre una potente serie de metapelitas.

Al noroeste, Sierra Tejeda, está limitada por fallas normales (Fig. 3), con buzamientos que varían entre 40° y 80° aproximadamente. Estas fallas separan los mármoles de la sierra de los esquistos que circundan dicho relieve. El borde sur, a diferencia del anterior, es un contacto estratigráfico entre los mármoles y los esquistos de la base. En el corte 1 (Fig. 4) se puede observar el antiforme de dirección E-O, que domina la estructura general de Sierra Tejeda.

Sierra Almirajara también tiene una estructura antiforme, cuya zona de charnela coincide aproximadamente con la línea de cumbres de mayor altitud (Fig. 3). Al igual que ocurre en Sierra Tejeda, la presencia de los anticlinales favorece la existencia de divisorias hidrogeológicas que llegan a delimitar acuíferos dentro del área de estudio (Fig. 4, cortes 1, 2 y 3). Al norte, el límite es discordante entre los mármoles y el relleno neógeno de la Cuenca de Granada. Por el sur, sin embargo, el borde lo forman fallas normales plurikilométricas, de dirección NO-SE (Fig. 3).

En la Sierra de los Guájares, la mayor parte de los límites son contactos estratigráficos; los mármoles descansan directamente sobre la serie metapelítica (Fig. 4, corte 4). La estructura es más o menos tabular, poco buzante hacia el S-SE.

El acuífero de la Sierra de Albuñuelas es un gran afloramiento de mármoles en disposición tabular (Fig. 4, corte 5). En este caso, los límites son una combinación de fallas normales y también contactos discordantes con el relleno neógeno de las depresiones de Granada, al norte y oeste, y del valle del Lecrín, al este y al sur.

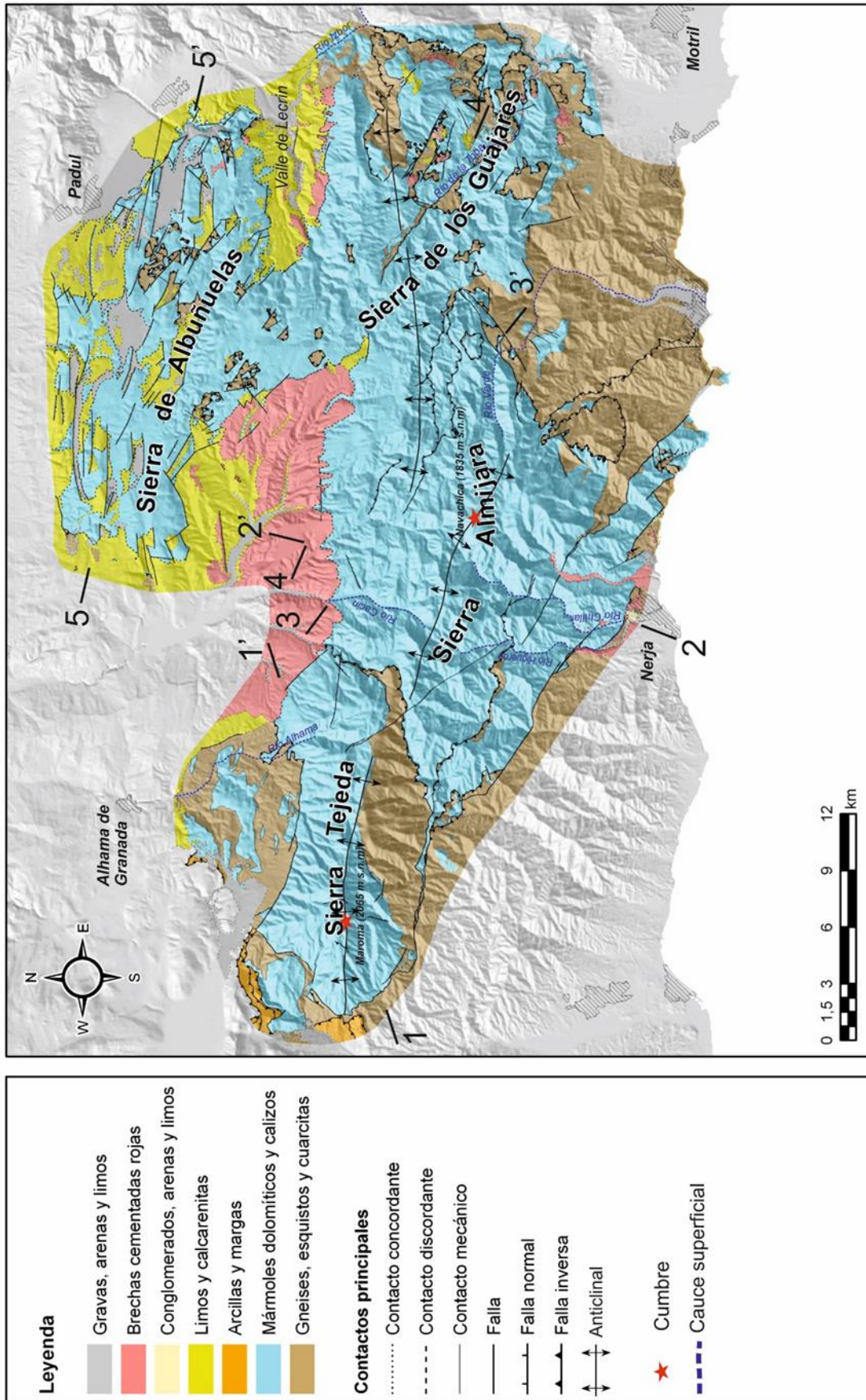


Figura 3. Mapa general del área de estudio. Contactos principales y situación de cortes hidrogeológicos



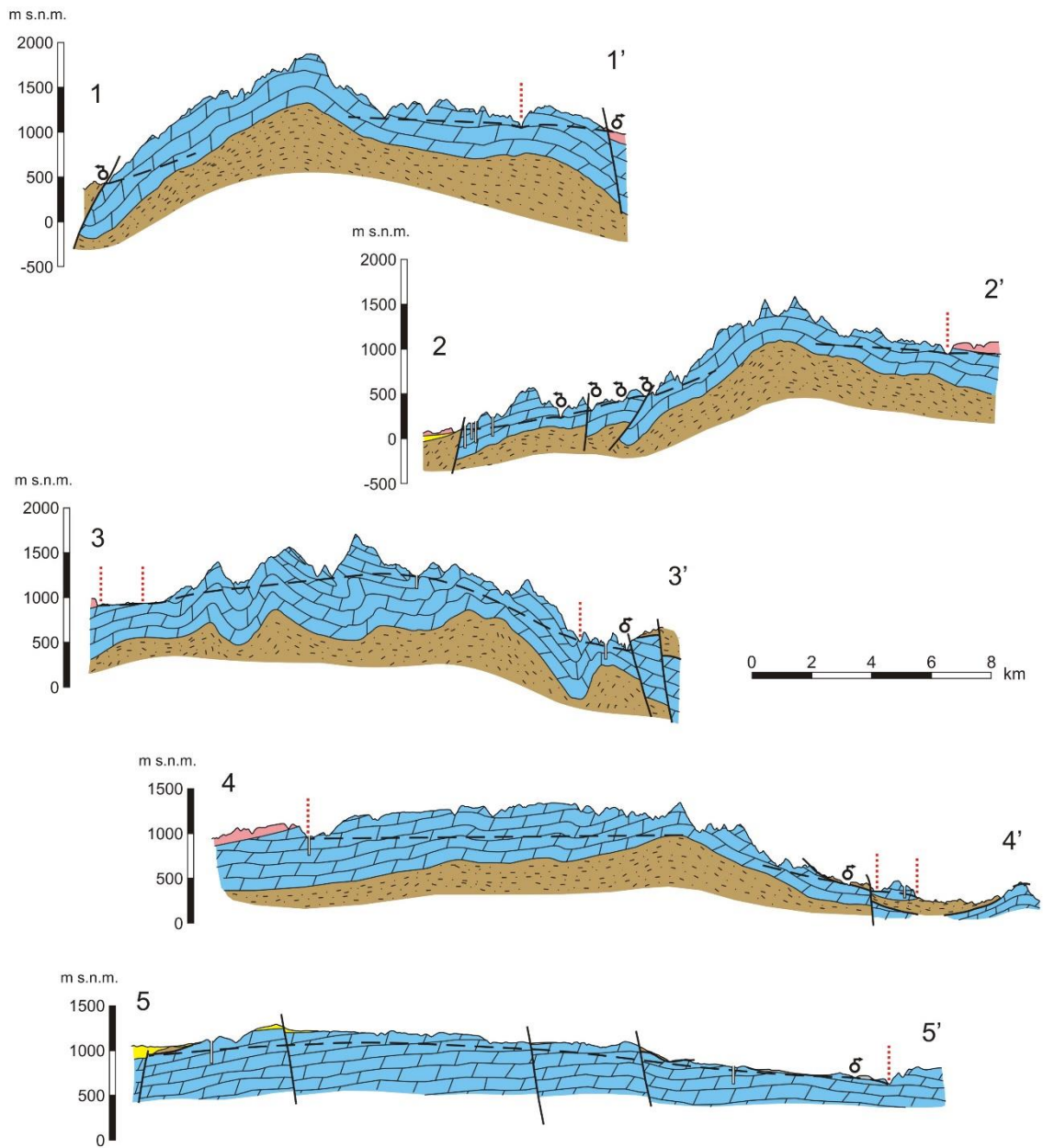


Figura 4. Cortes hidrogeológicos del macizo de Sierra Tejada-Almijara. Véase la situación en la figura 3

## 2.2 Inventario de puntos de agua

En la tabla 1 se incluyen los puntos que se han considerado representativos y en los que ha sido posible tomar, al menos, una muestra de agua para su análisis químico e isotópico, durante el periodo comprendido entre 2015 y 2017.

Nº	TIPO	NOMBRE	Coordenadas		COTA (m s.n.m)	CUENCA	MUNICIPIO
			UTM (S30) X	Y			
1	Manantial	La Fájara	402321	4082550	420	C.Mediterráneas Andaluzas	Canillas de Aceituno
2	Manantial	Rio Alhama	412225	4087334	1020	Guadalquivir	Alhama de Granada
3	Manantial	Játar	418662	4087816	990	Guadalquivir	Arenas del Rey
4	Manantial	Linarejo	419830	4085742	1020	Guadalquivir	Arenas del Rey
5	Manantial	Rodaderos	414856	4091028	940	Guadalquivir	Alhama de Granada
6	Manantial	Baños de Alhama	412563	4097359	775	Guadalquivir	Alhama de Granada
7	Manantial	Cijancos	447009	4093023	700	C.Mediterráneas Andaluzas	Villamena
8	Manantial	Molino	444693	4095913	729	C.Mediterráneas Andaluzas	Padul
9	Manantial	La Zaza	450761	4083931	680	C.Mediterráneas Andaluzas	El Pinar
10	Manantial	Fte.Santa	444630	4078634	430	C.Mediterráneas Andaluzas	Los Guájares
11	Manantial	Fte.Negra	435696	4076585	420	C.Mediterráneas Andaluzas	Otivar
12	Manantial	Socavon	433298	4076620	580	C.Mediterráneas Andaluzas	Otivar
13	Manantial	Maro	425248	4068886	120	C.Mediterráneas Andaluzas	Nerja
14	Sondeo	Piezometro Cantarrijan	430606	4066912	55	C.Mediterráneas Andaluzas	Almuñecar
15	Sondeo	Playa Cantarrijan	430679	4066662	33	C.Mediterráneas Andaluzas	Almuñecar
16	Sondeo	Cantarrijan 2	430337	4067762	110	C.Mediterráneas Andaluzas	Almuñecar
17	Sondeo	Marina	429834	4067315	100	C.Mediterráneas Andaluzas	Nerja
18	Sondeo	Sondeo Cueva Nerja	424624	4068811	124	C.Mediterráneas Andaluzas	Nerja
19	Sondeo	Cañuelo	429139	4067917	160	C.Mediterráneas Andaluzas	Nerja

Tabla 1. Inventario de los principales puntos de agua (2015-2017)

En el presente informe se presentan resultados de los manantiales en los que se ha mantenido un control periódico de las respuestas naturales. Han sido diez: La Fájara, Rio Alhama, Játar, Linarejo, Cijancos, Molino, La Zaza, Fuente Santa, Fuente Negra y Maro. La ubicación de cada uno se muestra en la figura 5. Como anexo del presente trabajo se adjunta la ficha de inventario de cada manantial anteriormente citado.

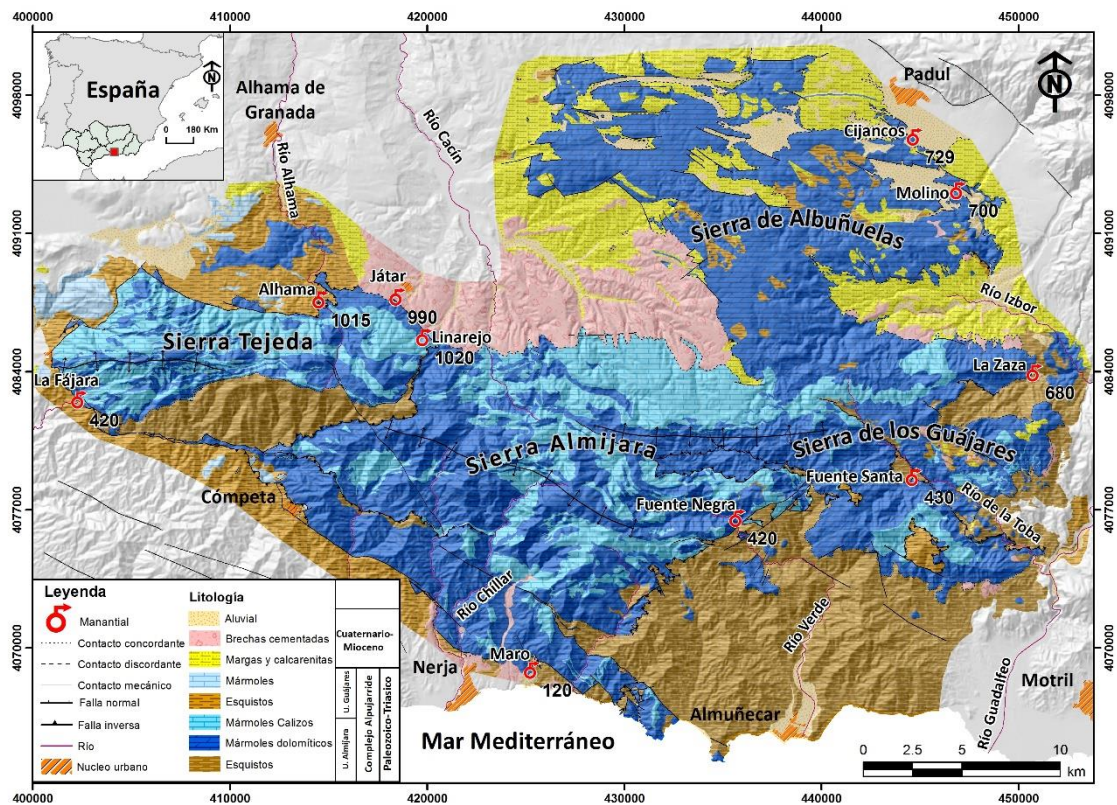


Figura 5. Localización de los manantiales principales junto con su correspondiente cota (m s.n.m)

### 2.3 Piezometría

Para elaborar un mapa de isopiezas de toda el área de estudio, se han utilizado tanto los datos recopilados durante el periodo de 2003 a 2006 por Isaac Pérez Ramos como los existentes en la bibliografía, especialmente en el informe del SGOP (1991). Aunque se dispone de muchos datos de piezometría, en la mayoría de los casos es insuficiente para realizar un mapa de isopiezas, ya que los puntos de agua suelen situarse en zonas marginales del acuífero. Por ello, en el mapa piezométrico general (Fig. 6) sólo se muestra la cota media del nivel en cada punto de agua. Aun así, es posible determinar la dirección de flujo general, si se tiene en cuenta la información que aporta el conocimiento de la estructura geológica.

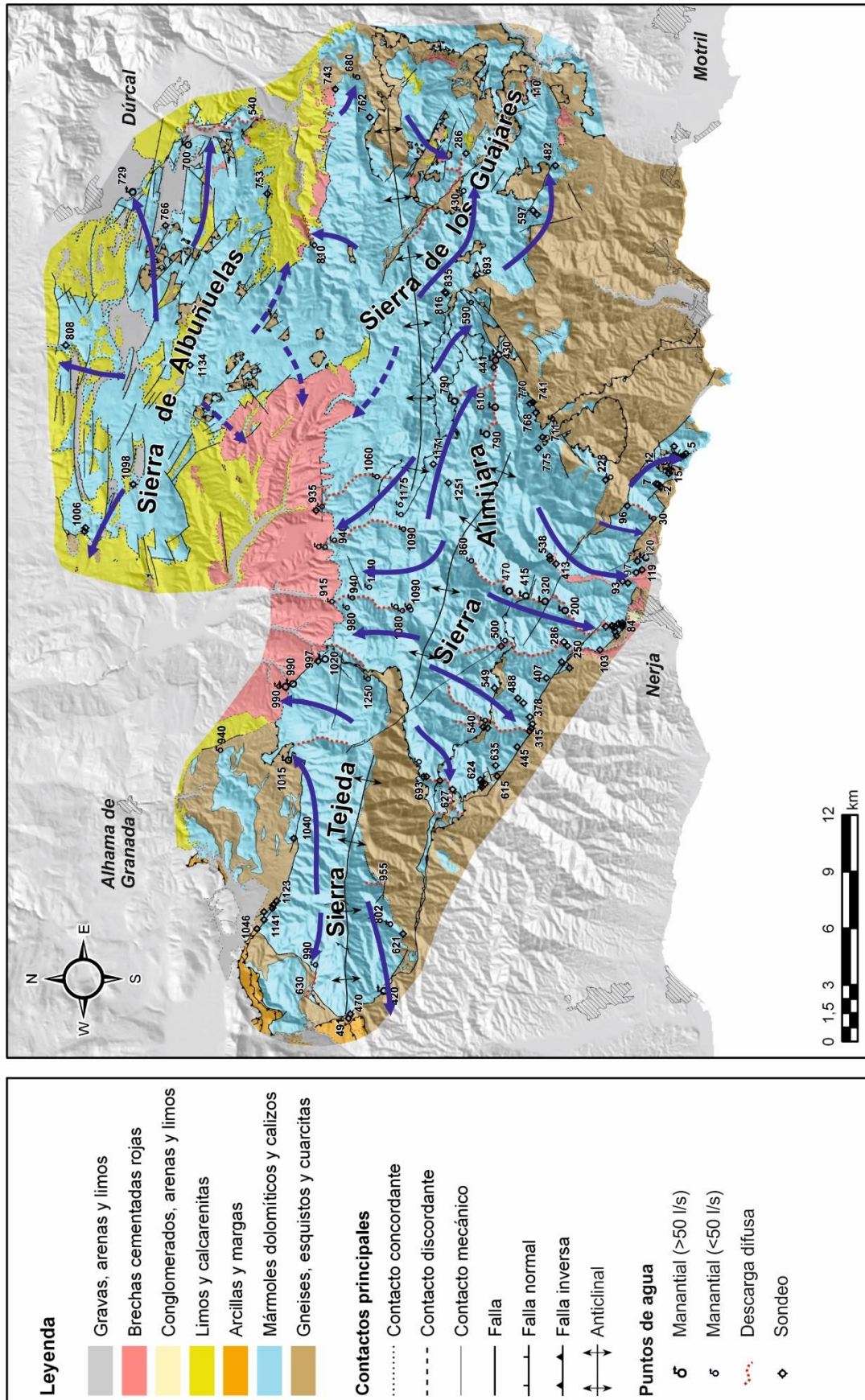


Figura 6. Mapa de cotas piezométricas y direcciones de flujo.

## 2.4 Hidroquímica

En la tabla 2 se muestran los parámetros físico-químicos (CE, temperatura y pH) y concentraciones medias de los componentes químicos mayoritarios del agua en los manantiales controlados.

Las aguas subterráneas del área de estudio son, en general, poco mineralizadas (Tabla 2), con valores medios de conductividad eléctrica comprendidos entre 315  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (nacimiento de Játar) y 729  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (manantial de Maro). La temperatura media más baja es de 11,6°C en el nacimiento del Río Alhama y la más elevada ha sido 19,4°C en el manantial de Maro (Tabla 2).

A partir de los datos se ha llevado a cabo un diagrama de Piper (Fig. 7) que pone de manifiesto la existencia de tres facies hidroquímicas principales: bicarbonatada cálcica, bicarbonatada cálcico-magnésica y sulfatada cálcica.

El agua de los manantiales del borde norte de Sierra Tejeda tienen las concentraciones más bajas de  $\text{SO}_4^-$  (<8 mg/l). Los manantiales de Maro y Fuente Negra (Fig.8) presentan elevadas concentraciones de  $\text{SO}_4^-$  (225,1 y 81,9 mg/l, respectivamente) en comparación con el resto de surgencias estudiadas.

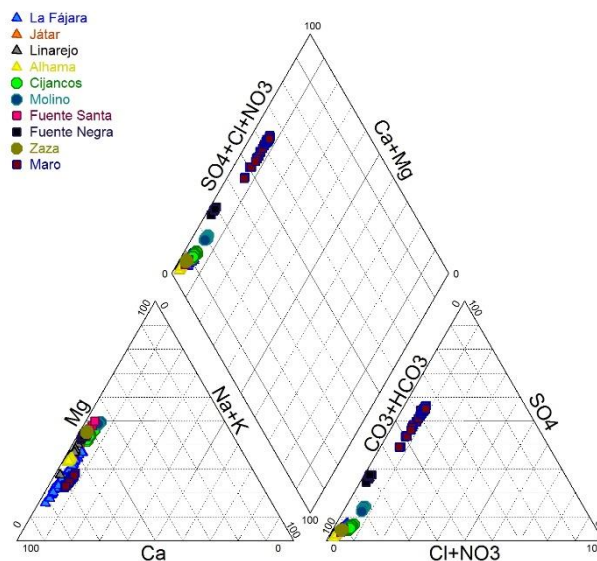


Figura 7. Diagrama de Piper de las muestras de agua recogidas

	Manantial (Ref.)	CE punt. (µS/cm)	Tª (°C)	pH	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	TAC (mg/l)	Cl-	SO42-	NO3-	F-
n	<b>La Fájara</b>	50	50	50	46	46	46	46	46	46	46	46	46
mín		272.00	13.50	7.42	50.31	6.27	1.47	0.69	179.24	1.92	6.33	1.67	0.07
máx		399.00	16.60	7.89	62.79	21.00	4.68	1.63	270.35	6.57	15.35	5.38	0.37
m		338.08	15.08	7.66	56.53	13.77	2.93	0.98	223.63	3.80	11.43	2.74	0.21
CV (%)		9.38	5.96	1.17	5.85	31.31	32.60	23.38	9.31	27.21	23.35	28.70	40.67
n	<b>Maro</b>	47	47	44	47	47	47	47	47	47	47	47	47
mín		558.00	19.20	7.42	91.71	18.31	7.82	1.30	213.96	15.53	122.63	0.78	0.39
máx		810.00	19.60	7.83	136.87	34.28	15.80	3.48	224.92	28.47	267.81	2.41	0.67
m		729.34	19.42	7.64	120.26	28.16	12.63	1.98	218.94	23.62	225.10	1.28	0.55
CV (%)		8.79	0.46	1.38	9.22	14.74	14.48	16.63	1.23	14.72	18.43	23.23	13.40
n	<b>Alhama</b>	34	34	32	33	33	33	33	33	33	33	33	33
mín		314.00	11.60	7.57	45.06	14.13	1.23	0.71	208.86	1.35	2.28	2.07	0.06
máx		318.00	11.70	7.95	54.59	17.86	1.94	1.11	221.31	2.81	8.98	3.56	0.10
m		315.53	11.61	7.77	50.73	15.97	1.46	0.84	216.74	2.26	6.67	2.66	0.07
CV (%)		0.30	0.30	1.19	3.83	4.52	13.28	9.80	1.29	18.25	27.17	10.49	11.40
n	<b>Játar</b>	34	34	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
mín		313.00	12.00	7.60	43.24	13.76	1.10	0.65	201.54	1.31	2.25	2.14	0.08
máx		316.00	12.30	8.00	53.16	19.48	1.84	1.18	220.31	2.98	9.50	3.34	0.12
m		314.26	12.15	7.78	48.71	16.56	1.40	0.88	215.77	2.29	6.82	2.59	0.09
CV (%)		0.26	0.50	1.06	4.21	6.93	12.35	12.07	1.78	19.77	27.39	9.87	9.93
n	<b>Cijancos</b>	18	18	16	18	18	18	18	18	18	18	18	18
mín		436.00	16.30	7.44	51.83	27.84	4.48	1.22	271.82	5.28	11.51	7.86	0.26
máx		445.00	16.40	7.60	61.44	30.75	5.38	1.65	289.95	7.46	17.79	9.19	0.36
m		441.06	16.38	7.53	57.89	29.82	4.73	1.49	283.90	6.35	14.91	8.63	0.31
CV (%)		0.54	0.23	0.53	3.79	2.63	4.47	6.91	1.59	10.09	13.55	4.02	7.88
n	<b>Molino</b>	15	15	13	15	15	15	15	15	15	15	15	15
mín		495.00	16.60	7.50	52.18	35.03	5.84	1.83	285.77	8.98	35.14	7.61	0.30
máx		502.00	17.00	7.62	61.00	39.38	6.44	2.18	299.32	9.93	41.78	9.26	0.39
m		499.00	16.76	7.55	58.92	37.83	6.17	2.06	293.34	9.37	38.36	8.32	0.34
CV (%)		0.47	0.87	0.40	3.74	3.14	3.04	4.63	1.20	3.02	5.05	4.85	9.31
n	<b>Fte. Negra</b>	11	11	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11
mín		519.00	15.10	7.50	65.44	33.60	2.43	0.94	255.22	3.43	75.28	1.24	0.40
máx		546.00	17.10	7.55	76.91	38.30	2.94	1.24	297.83	4.62	85.88	1.98	0.62
m		534.55	15.73	7.53	73.14	36.52	2.63	1.07	283.39	4.15	81.95	1.76	0.51
CV (%)		1.41	4.23	0.18	3.93	4.14	4.93	8.70	3.80	8.86	3.43	16.95	10.39
n	<b>La Zaza</b>	16	16	13	16	16	16	16	16	16	16	16	16
mín		411.00	15.60	7.40	52.62	27.86	2.36	1.05	270.60	4.33	10.33	1.92	0.06
máx		425.00	15.90	7.76	58.50	31.13	2.96	1.77	293.83	5.19	11.20	2.80	0.09
m		418.00	15.78	7.61	55.37	29.39	2.56	1.20	286.22	4.88	10.90	2.30	0.08
CV (%)		0.80	0.65	1.13	3.53	3.81	7.22	13.99	1.81	5.51	2.06	9.28	10.12
n	<b>Fte.Santa</b>	13	13	11	13	13	13	13	13	13	13	13	13
mín		501.00	17.90	7.34	57.91	32.84	3.24	0.96	339.40	5.79	9.99	1.79	0.11
máx		519.00	18.90	7.56	70.60	37.40	4.02	1.31	356.20	6.91	14.87	2.78	0.16
m		513.69	18.61	7.41	66.43	35.21	3.74	1.12	348.34	6.39	13.15	2.44	0.13
CV (%)		1.01	1.63	0.70	5.82	3.02	5.64	9.74	1.37	4.29	12.65	9.66	9.23
n	<b>Linarejo</b>	31	31	28	31	31	31	31	31	31	31	31	31
mín		322.00	12.40	7.95	46.41	13.31	1.17	0.36	226.73	1.86	5.37	1.10	0.04
máx		346.00	13.20	8.40	56.55	19.70	1.94	0.86	248.83	3.12	7.23	2.79	0.10
m		339.77	12.83	8.13	53.51	17.91	1.39	0.56	240.36	2.52	6.73	2.10	0.07
CV (%)		1.24	1.46	1.65	4.62	6.34	14.41	20.34	2.12	10.82	5.21	16.78	15.01

Tabla 2. Parámetros físico-químicos del agua, componentes químicos mayoritarios del agua de los manantiales controlados (**n**= número de análisis, **mín**= valor mínimo, **máx**= valor máximo, **cv** (%)= coeficiente de variación expresado en tanto por ciento)

En la figura 8 se puede observar la distribución espacial de la composición química del agua subterránea del área de estudio. Sierra Tejeda está formada mayoritariamente por mármoles calizos, lo cual explica por qué sus manantiales (La Fájara, Játar, Alhama y Linarejo) drenan aguas de facies bicarbonatada cálcica. El agua del resto de surgencias del área de estudio presenta facies bicarbonatada cálcico-magnésica, debido al predominio de mármoles dolomíticos en los acuíferos que drenan. Esto es particularmente patente en las aguas de los manantiales de la sierra de Albuñuelas (Molino y Cijancos). Por otro lado, el agua de los manantiales de Maro y Fuente Negra tiene una composición química diferente al resto. La del primero es de facies sulfatada cálcica y tiene mayor mineralización, mientras que la de Fuente Negra es bicarbonatada cálcico-magnésica (Fig. 7) pero tiene una elevada concentración de  $\text{SO}_4^-$ .

La figura 8 pone de manifiesto que las aguas de dos manantiales como Maro y Fuente Negra presentan un elevado contenido de  $\text{SO}_4^-$ , lo que no es coherente con la litología marmórea de los materiales que se observan en superficie. Andreo y Carrasco (1993) plantearon dos posibilidades para explicar el origen de los sulfatos contenidos en el agua del manantial de Maro: disolución de yesos u oxidación de sulfuros. El elevado grado de metamorfismo experimentado por los mármoles alpujárrides, con temperaturas por encima de  $700^\circ\text{C}$  (López y Gómez Pugnaire, 1993), incompatible con la presencia de yeso, parece apoyar la opción de la oxidación de sulfuros. Sin embargo, Vadillo *et al.* (2016), mediante el análisis isotópico del azufre y el oxígeno ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ ) en el agua del manantial de Maro, determinaron que el origen más probable de los sulfatos es la disolución de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ). Para precisar el origen de este componente en el agua de estos manantiales, en el presente trabajo, se ha llevado a cabo un estudio isotópico ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ ), cuyos resultados se exponen en el siguiente apartado.

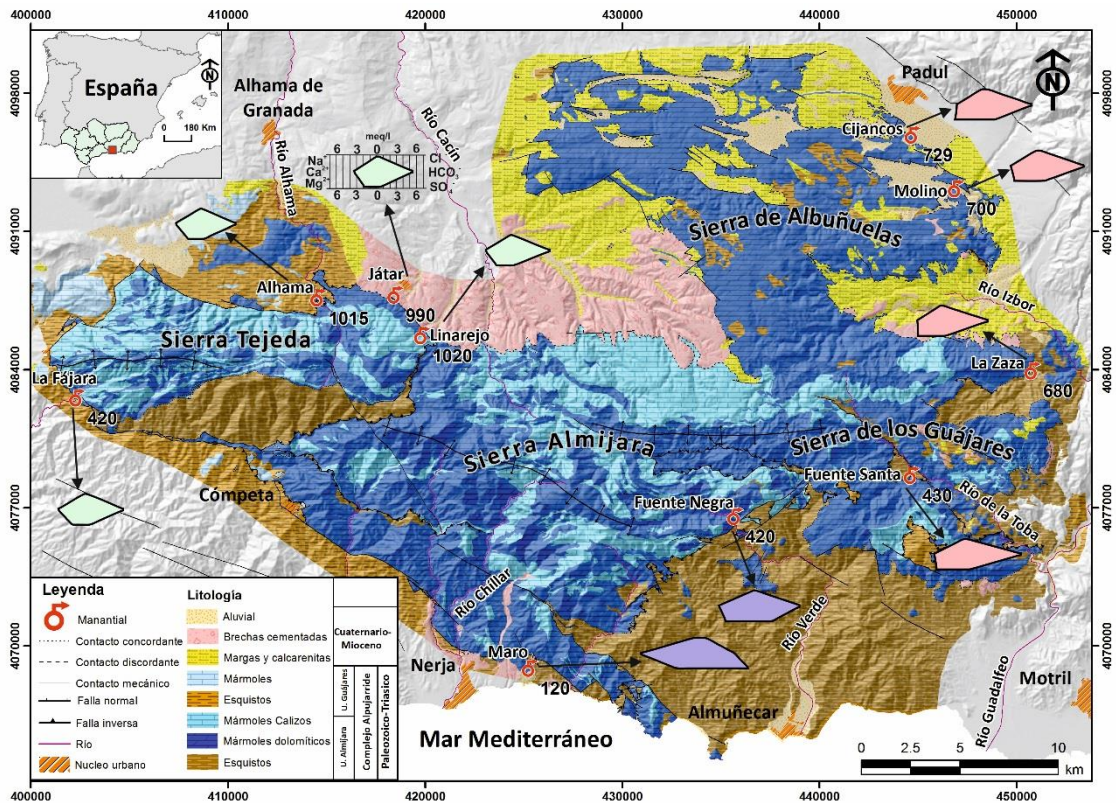


Figura 8. Distribución espacial de las características hidroquímicas (diagramas de Stiff)

## 2.5.- Características isotópicas

### 2.5.1.- $\delta^{18}O$ y $\delta^2H$

En el periodo de investigación se han recogido muestras de agua de manantiales y sondeos existentes en el área de estudio, con objeto de determinar su composición isotópica. No obstante, el muestreo se ha centrado preferentemente en las principales surgencias, con mayor interés desde el punto de vista hidrogeológico.

En la tabla 3 se muestran los valores medios y coeficiente de variación de  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$ , así como del exceso de deuterio (d) de las aguas. El valor medio de  $\delta^{18}O$  varía entre -8,28‰ (manantial de Játar) y -7,36‰ (Fuente Santa), mientras que el valor promedio de  $\delta^2H$  está comprendido entre -43,91‰ en la Fuente Santa y -54,29‰ en la surgencia del Molino (Padul, Granada).



Manantial	n	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)				$\delta^2\text{H}$ (‰)				d, exceso de deuterio (‰)			
		min	max	med	cv	min	max	med	cv	min	max	med	cv
Cijancos	13	-8,16	-7,93	-8,03	-0,96	-53,34	-52,39	-52,97	-0,56	10,33	12,06	11,25	5,00
Molino	10	-8,34	-8,06	-8,23	-0,99	-54,63	-54,05	-54,29	-0,34	10,22	12,24	11,52	5,87
La Zaza	10	-8,17	-7,97	-8,06	-0,83	-49,64	-49,03	-49,36	-0,38	14,46	15,86	15,14	3,42
Fte.Santa	7	-7,48	-7,19	-7,36	-1,32	-44,05	-43,70	-43,91	-0,24	13,54	15,80	15,01	5,25
Fte.Negra	7	-7,85	-7,59	-7,75	-1,26	-46,55	-45,69	-46,24	-0,61	14,65	16,74	15,78	4,86
La Fájara	44	-8,29	-7,48	-7,82	-1,90	-49,72	-44,62	-47,15	-2,09	14,66	16,91	15,40	3,67
Jatar	28	-8,45	-8,05	-8,28	-1,08	-51,24	-49,97	-50,77	-0,68	13,83	16,95	15,45	4,78
Linarejo	18	-8,32	-7,94	-8,16	-1,35	-50,59	-49,07	-50,18	-0,81	14,11	16,08	15,13	4,25
Alhama	29	-8,33	-8,06	-8,18	-0,91	-50,19	-48,98	-49,73	-0,58	14,86	16,74	15,71	3,26
Maro	47	-7,92	-7,37	-7,68	-1,70	-47,00	-43,40	-45,78	-1,68	13,92	17,04	15,64	4,82

Tabla 3. Parámetros estadísticos (número de análisis, n; mínimo, mín; máximo, máx; medio, med; y coeficiente de variación expresado en %, cv) de los isótopos de la molécula del agua.

El valor medio de exceso en deuterio (*d*, en la tabla 3) está comprendido entre 11,25 ‰ en el manantial Cijancos y 15,78‰ en la Fuente Negra.

La composición isotópica más empobrecida de las aguas de los manantiales de la vertiente septentrional de sierra Tejeda (Alhama, Játar y Linarejo) (Fig. 9 y Tabla 3) es coherente con una elevada altitud de recarga y con el hecho de que estas surgencias se localizan en la parte más occidental del área de estudio (donde la cantidad de lluvia es mayor) y en la zona de umbría de sierra Tejeda (donde la evaporación es menor). En las surgencias más orientales, donde la precipitación es menor, se observan generalmente los valores isotópicos menos negativos (Fuente Santa). Entre ambos sectores se localizan los manantiales de La Fájara y de Maro, los cuales drenan aguas con composiciones isotópicas intermedias. Esta distribución espacial de la composición isotópica del agua subterránea es coherente con un efecto *Foehn* en dirección O-E de las precipitaciones de procedencia atlántica, lo que da lugar a un enriquecimiento en los valores isotópicos desde el oeste hacia el este, como ocurre en otros macizos montañosos de la provincia de Málaga (Andreo *et al.*, 2004).

Por otro lado, los manantiales más septentrionales del área de estudio (Cijancos y Molino) presentan los valores de deuterio más negativos (Fig. 9 y Tabla 3). Estas surgencias drenan aguas que se han infiltrado en la sierra de Albuñuelas y

presentan una composición isotópica que no es coherente con la distribución espacial que se ha descrito previamente. Ello puede deberse a que la propia alineación montañosa de las sierras Tejeda, Almijara y Guájares, e incluso Sierra Nevada que queda inmediatamente al este, ejerzan de barrera para las precipitaciones de procedencia mediterránea y, por tanto, las aguas de recarga de los manantiales de sierra Albuñuelas tienden a alinearse más con la LMM (Fig. 9). No obstante, es necesario seguir investigando las respuestas naturales de los manantiales de este acuífero, así como la composición isotópica del agua del resto de surgencias, para confirmar esta hipótesis.

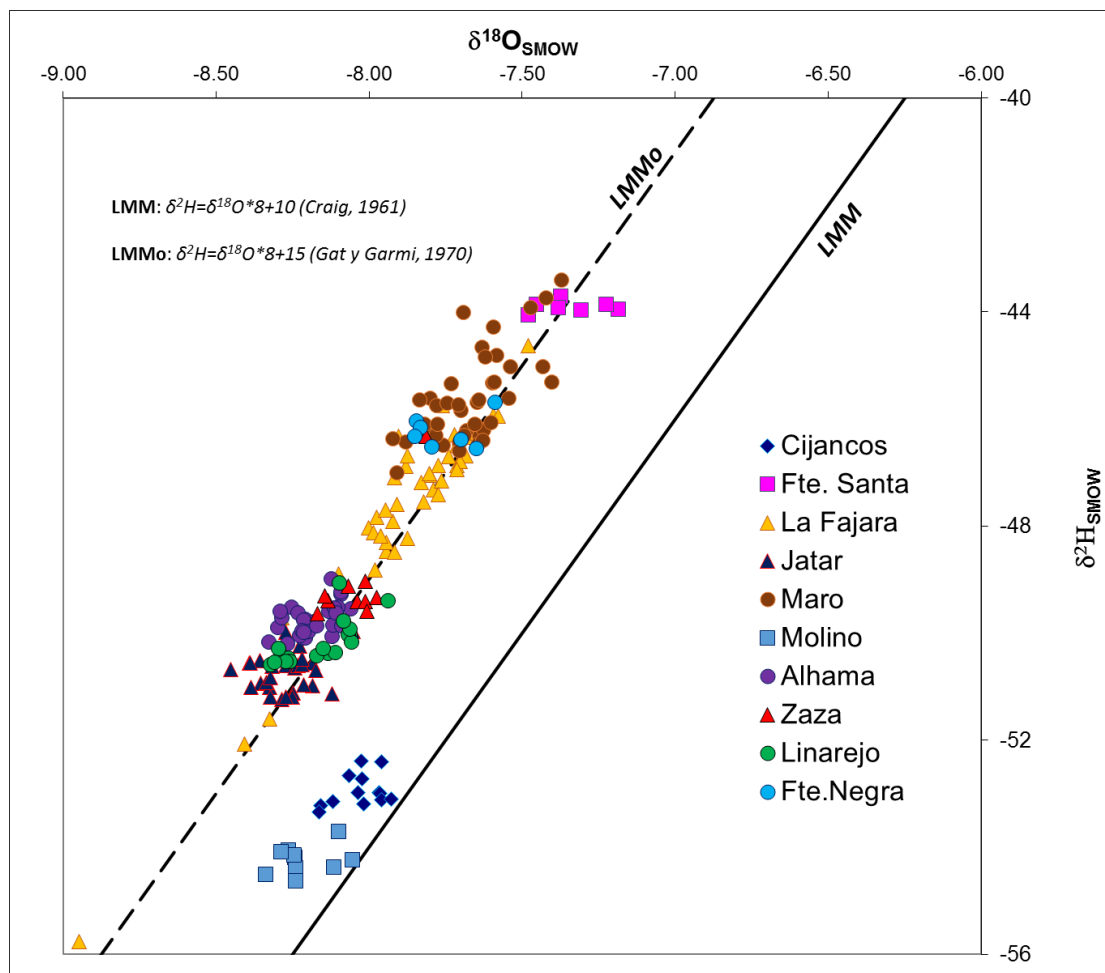


Figura 9. Representación de los valores de  $\delta^{18}O$  frente a  $\delta^2H$  de los manantiales controlados

2.5.2.- Carbono 13 ( $\delta^{13}C$ )

En la tabla 4 se presentan los parámetros estadísticos de los valores de  $\delta^{13}C$  medidos en el agua de las surgencias controladas. Según Clark y Fritz (1997) los valores de  $\delta^{13}C$  cercanos a 0‰ corresponden a aguas cerca del equilibrio con la roca, mientras que los valores en torno a -22‰ representan a las aguas en el suelo. Por consiguiente, este parámetro se utiliza como trazador natural ya que puede ser una medida cualitativa de del tiempo de residencia del agua en el acuífero.

Manantial	n	$\delta^{13}C$ (‰)			
		min	max	med	cv
Cijancos	16	-11,41	-6,94	-9,27	-10,94
Molino	13	-10,61	-6,56	-9,10	-11,16
La Zaza	15	-12,13	-8,21	-10,36	-10,40
Fte.Santa	10	-11,87	-10,02	-10,80	-5,06
Fte.Negra	9	-10,27	-6,35	-8,79	-12,87
La Fájara	38	-11,95	-8,34	-10,20	-8,41
Jatar	29	-11,57	-7,86	-9,55	-8,31
Linarejo	28	-11,54	-9,82	-10,81	-4,05
Alhama	30	-11,16	-8,24	-10,02	-6,79
Maro	38	-10,76	-7,30	-9,00	-8,98

Tabla 4. Parámetros estadísticos (número de análisis, n; medio, med; y coeficiente de variación expresado en %, cv) del contenido isotópico de Carbono 13 ( $\delta^{13}C$ )

Los valores medios menos negativos se registran en las aguas de la Fuente Negra (-8,79 ‰) y el manantial de Maro (-9,00 ‰); en cambio, los valores más negativos son los del manantial del Linarejo (-10,81‰).

La figura 10 muestra la distribución espacial de los valores medios de  $\delta^{13}C$ . Los manantiales de Maro y Fuente Negra probablemente drenen aguas con más tiempo de residencia en el acuífero respecto al resto de surgencias de las sierras Tejeda, Almirajara, Guájares y Albuñuelas.

Las aguas de estos manantiales tienen elevadas concentraciones de sulfatos (figuras 7 y 8). Ello puede estar relacionado con el hecho de que sean aguas con

mayor tiempo de residencia en el acuífero, pero es necesario seguir investigando esta anomalía química en el agua de estos mananciales.

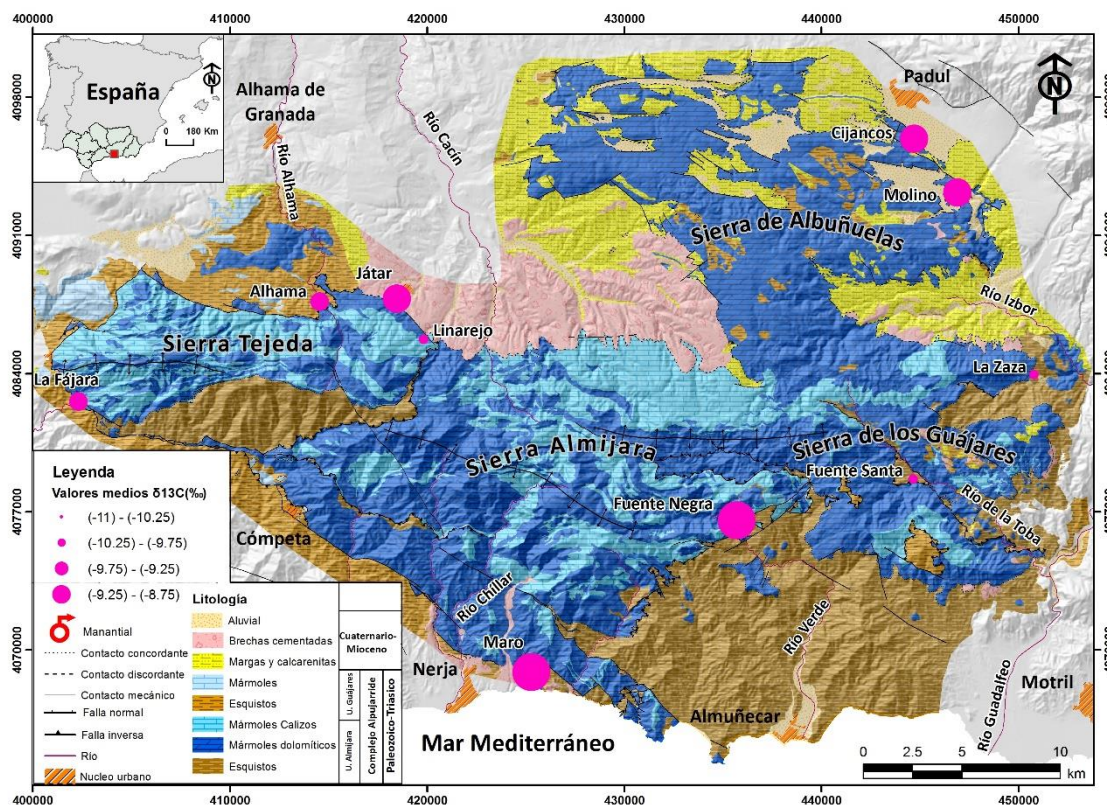


Figura 10. Distribución espacial de los valores medios de  $\delta^{13}C$

### 2.5.3.- Isótopos del azufre y del oxígeno del sulfato ( $\delta^{34}S$ y $\delta^{18}O_{SO_4}$ -)

#### 2.5.3.1.- Introducción y características hidroquímicas generales

Las técnicas isotópicas, junto con la información hidrogeológica e hidroquímica, han sido utilizadas en numerosas ocasiones como una herramienta para conocer origen de los diferentes solutos. Krouse (1980) estableció que el  $\delta^{34}S$  es el isótopo más adecuado para identificar las fuentes naturales y antropogénicas del sulfato disuelto en el agua.

Se ha llevado a cabo el análisis de  $\delta^{34}S_{SO_4}$  y  $\delta^{18}O_{SO_4}$  del agua que drenan los mananciales de Maro (aguas altas y aguas bajas), Fuente Negra y Molino, con el objetivo de precisar el origen del sulfato disuelto en el agua.

En la tabla 5 se muestra la conductividad eléctrica y la concentración de los componentes químicos mayoritarios del agua en los manantiales seleccionados para el estudio isotópico. La concentración de  $\text{SO}_4^-$  disuelto en el agua que drenan los manantiales varía entre 38,75 mg/l (manantial del Molino) y 236,23 mg/l (manantial de Maro en aguas bajas).

Manantial	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)	$\text{Na}^+$ (mg/l)	$\text{K}^+$ (mg/l)	TAC (mg/l)	$\text{Cl}^-$ (mg/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	$\text{NO}_3^-$ (mg/l)	$\text{F}^-$ (mg/l)
Maro (Aguas Altas)	665	111,63	25,12	11,19	1,81	224,92	17,94	158,97	1,47	0,50
Maro (Aguas Bajas)	744	123,31	29,23	13,29	2,08	217,14	25,73	236,23	1,06	0,64
Molino	498	59,78	38,54	6,44	2,12	294,73	9,52	38,75	7,32	0,32
Fuente Negra	528	74,65	36,65	2,68	1,06	287,07	4,11	80,49	1,92	0,46

Tabla 5. Composición hidroquímica de las muestras analizadas

Con los datos de la tabla 5 se ha elaborado un diagrama de Piper (Fig. 11) en el que se pueden observar dos facies hidroquímicas principales: bicarbonatadas cálcicas-magnésicas (Molino) y sulfatadas cálcicas (Maro). El agua de Fuente Negra presenta una clara influencia del sulfato, pero sin llegar a ser facies sulfatada-cálcica.

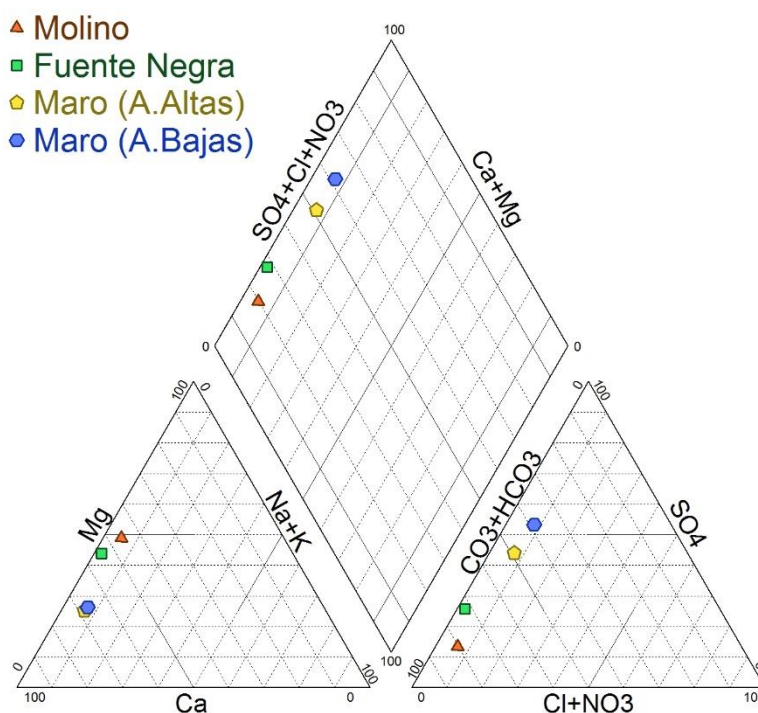


Figura 11. Diagrama de Piper de las aguas del estudio isotópico

## 2.5.3.2.- Resultados

En la tabla 6 se muestran los resultados de los análisis isotópicos. El agua del manantial de Maro, en condiciones de estiaje, presenta los valores máximos tanto en  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  (15,4 ‰) como en  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$  (15,2 ‰). El valor mínimo de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$  ha sido de 12,4‰ (Molino) y en  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  ha sido de 7,2 ‰ (Molino).

Manantial	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$	$\delta^{34}\text{S}$
	‰	
Maro (Aguas Altas)	14,1	15,4
Maro (Aguas Bajas)	15,2	15,4
Molino	12,4	7,2
Fuente Negra	12,9	12,7

Tabla 6. Resultados de los análisis isotópicos ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ )

La figura 12 pone de manifiesto que el origen del sulfato más probable es la disolución de yesos (Ortí *et al.* 2014). No obstante, también se puede observar que puede existir influencia antropogénica, por afección de fertilizantes (Vitòria *et al.* 2004), en el manantial del Molino. Van Stempvoort y Krouse (1994) establecieron un rango de valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  (Fig. 13) característicos de aguas cuya evolución geoquímica está ligada a oxidación de sulfuros. La Figura 13 pone de manifiesto que el origen del contenido en sulfatos en el agua de los manantiales no guarda relación con este proceso.

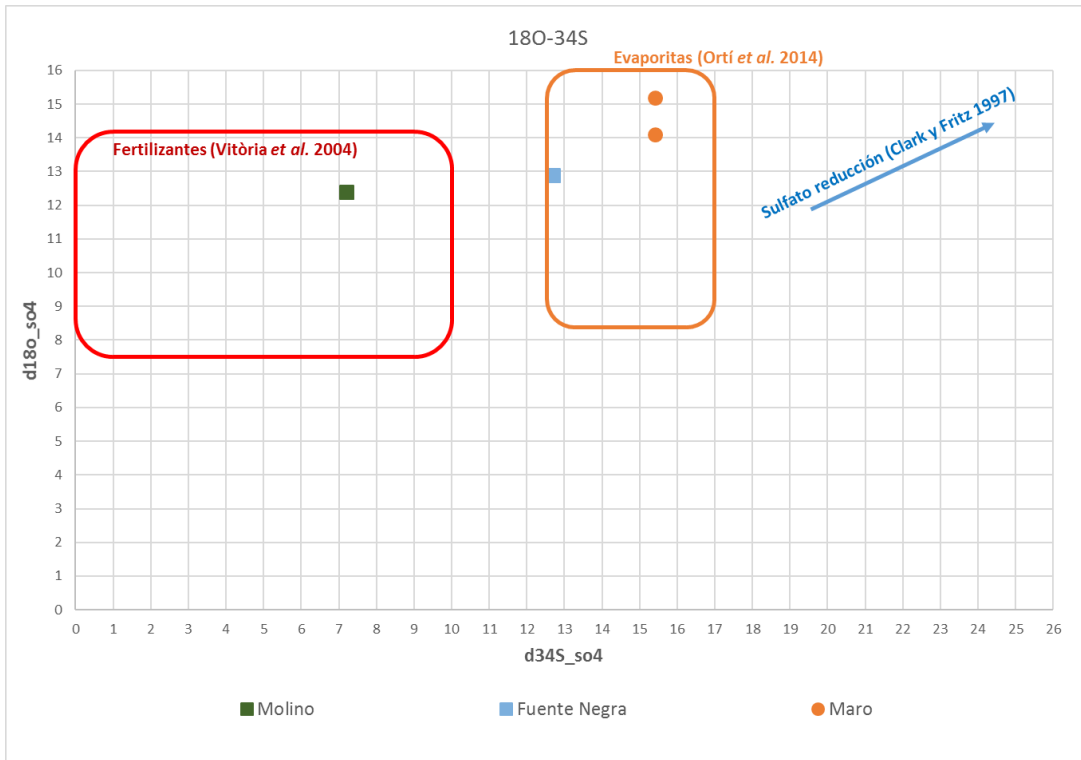


Figura 12. Grafica  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$  -  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$

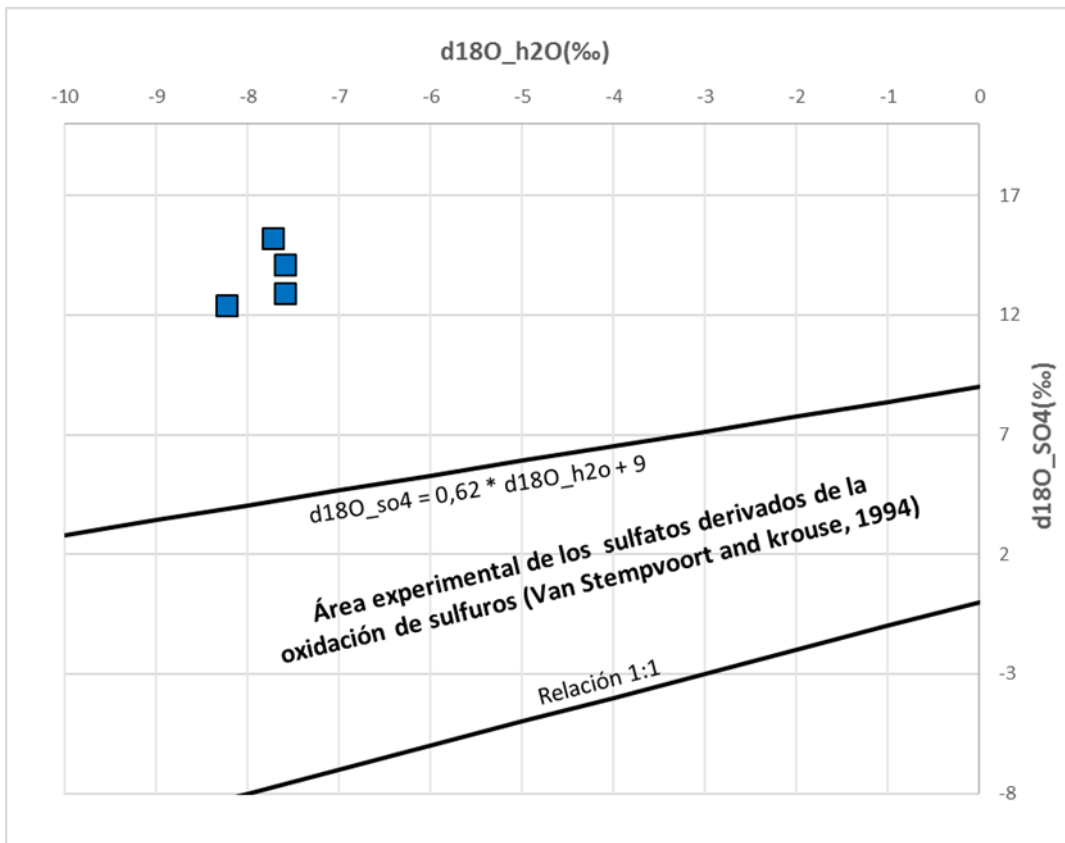


Figura 13. Gráfico de Van Stempvoort y Krouse (1994).  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$  VS  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$

### 3. Evoluciones temporales de los manantiales

Con el fin de evaluar el comportamiento hidrogeológico de los manantiales más importantes del área de estudio (Caudal >50 l/s), a continuación se analizan las evoluciones temporales de los componentes químicos mayoritarios en diferentes periodos de investigación.

#### 3.1.1.- *La Fájara*

- Periodo 2003-2009

En la figura 14 se muestra la evolución temporal de la composición química del agua del manantial de La Fájara, correspondiente al periodo comprendido entre 2003 y 2009.

En primer lugar, se observa que la conductividad eléctrica (CE) y la temperatura tienen un comportamiento muy similar. Ambos parámetros disminuyen, de forma muy rápida, ante los aumentos del caudal de la surgencia. Durante la primera crecida importante del año hidrológico 2003/2004 se produjo un rápido descenso de CE y temperatura, en torno a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 2-3°C respectivamente. Sin embargo, la crecida que se registró un mes después no tuvo el mismo efecto. En la primavera del mismo año se repitió este comportamiento con dos importantes aumentos de caudal separados por un mes. En ausencia de precipitación, en la época de estiaje, la CE tiende a aumentar progresivamente hasta alcanzar valores comprendidos entre 350 y 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Lo mismo ocurre con la temperatura que llega a valores en torno a 16 °C.

Las evoluciones de la alcalinidad,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  (Fig. 9) son muy similares entre sí. Del mismo modo que ocurre con la CE y temperatura, se producen descensos de concentración de los componentes químicos muy rápidos y marcados ante aumentos del caudal del manantial. La alcalinidad y la concentración en  $\text{Ca}^{2+}$  son los parámetros que más incidencia tienen en la composición química del agua del manantial de La Fájara (facies bicarbonatada cálcica); por ello, son los componentes que sufren más variación en su



concentración. La alcalinidad llega a tener descensos de hasta 50 mg/l como ocurre en las lluvias de otoño de 2003 y el invierno de 2007. Por otro lado, el contenido en  $\text{Ca}^{2+}$  se ve reducido en torno a 15 mg/l en las crecidas de los otoños de 2005 y 2007.

La concentración de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  (Fig. 14) experimenta diluciones durante las épocas de aguas altas. Estos componentes suelen estar en concentraciones muy bajas (<5 mg/l) a lo largo del año y las variaciones que sufren son rápidas pero en general de pequeña entidad. No obstante, se aprecia que estos componentes, en mayor o menor medida, experimentan un ligero aumento de las concentraciones justo antes de producirse la dilución. Esto se debe al empuje que ejercen las aguas de recarga sobre las que están presentes en el epikarst y en la zona no saturada, más evaporadas.

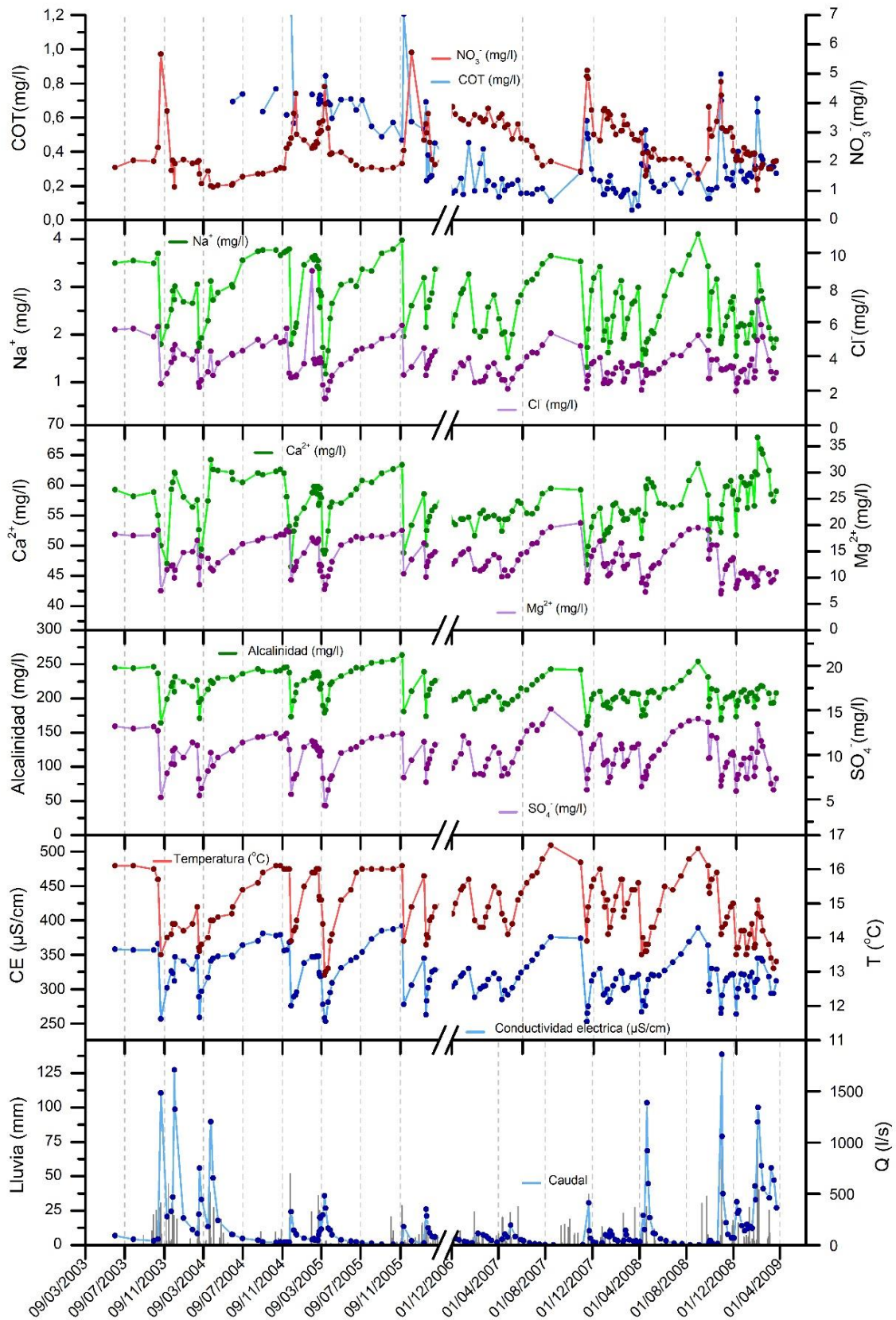


Figura 14. Evolución temporal de la composición química del agua de La Fájara para el periodo 2003-2009

Por último, las concentraciones en carbono orgánico total (COT) y  $\text{NO}_3^-$  presentan un comportamiento completamente diferente al observado en el resto de parámetros químicos analizados. Ambos parámetros sufren rápidos aumentos de concentración durante las principales crecidas. Esto es más evidente con las primeras lluvias del año hidrológico, ya que durante el estiaje existe una acumulación de estos componentes en el suelo y con las primeras lluvias se produce el lixiviado que provoca el aumento de la concentración en las aguas que drena el manantial.

Durante el otoño e invierno del año hidrológico de 2008-2009 se producen importantes y frecuentes episodios de precipitación. La evolución en la concentración de los parámetros químicos es igual a lo comentado anteriormente, pero en este periodo las variaciones son más frecuentes y de menor entidad, con concentraciones por debajo de la media.

-Periodo comprendido entre junio de 2015 y enero 2017

En la figura 15 está representada la evolución temporal de los parámetros hidroquímicos, durante el periodo comprendido entre junio de 2015 y enero de 2017.

La escasa precipitación ocurrida durante la presente investigación ha condicionado el comportamiento del manantial de la Fájara. En el hidrograma se puede apreciar una curva de agotamiento durante los meses de invierno del año hidrológico 2015/2016 y el manantial llegó casi a secarse al principio del mes de febrero.

El registro continuo del caudal permite caracterizar el comportamiento hidrodinámico del manantial de La Fajara, que experimenta rápidos aumentos de caudal, según la intensidad de la lluvia. A finales del mes de noviembre de 2016, después de los primeros eventos pluviométricos importantes, el caudal de La Fájara llegó a presentar valores por encima de 2500 l/s.

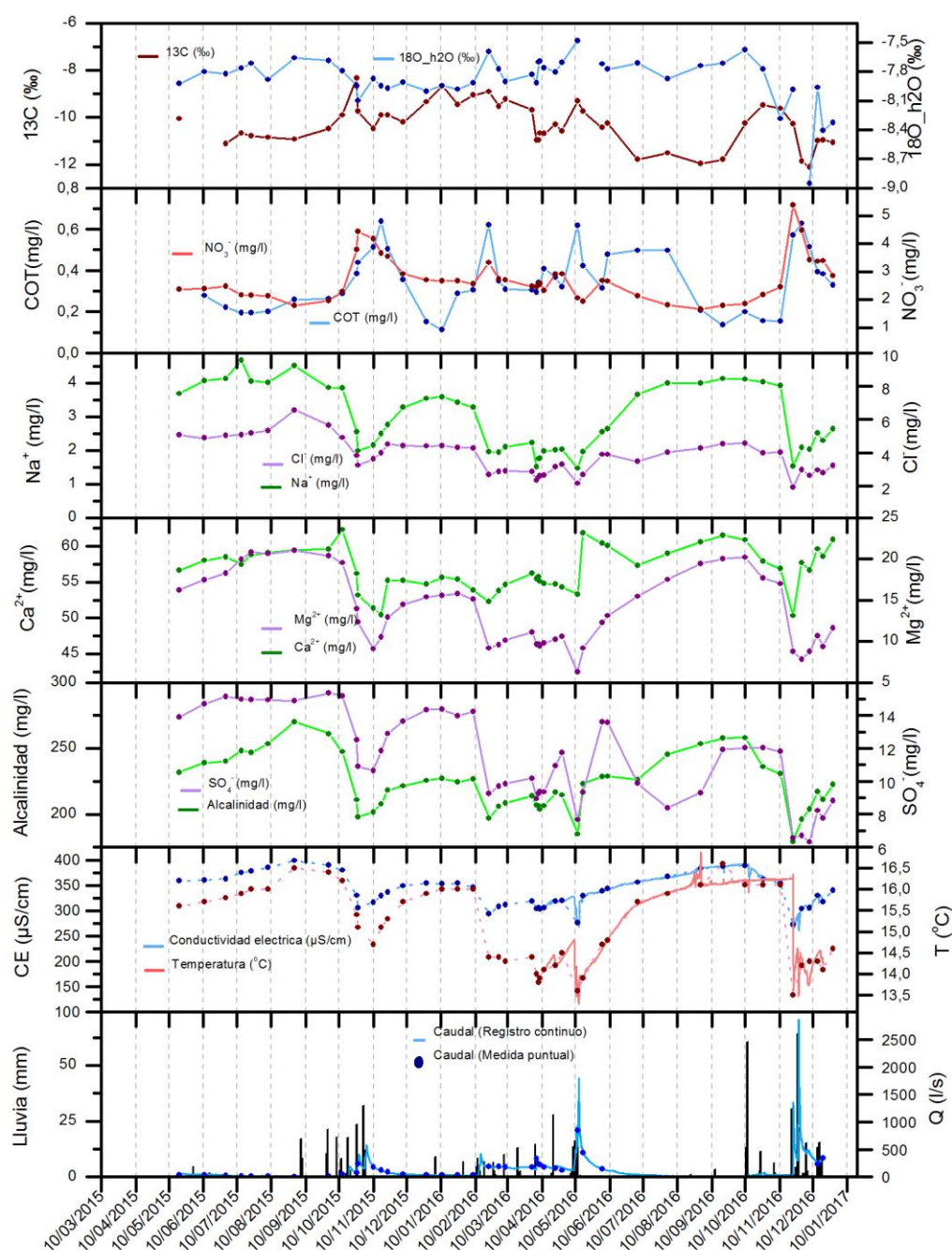


Figura 15. Evolución temporal de la composición química del agua de La Fájara (junio 2015-enero 2017)

Se ha corroborado que los bruscos aumentos de caudal van acompañados de descensos de CE y temperatura, y de diluciones generalizadas en todos los componentes químicos mayoritarios. Sin embargo, la morfología de la evolución temporal del COT y  $\text{NO}_3^-$  coincide con la del caudal, es decir, se produce un

aumento en la concentración de ambos parámetros en el agua como respuesta a eventos pluviométricos importantes.

En la figura 16 se ha representado la evolución temporal de los dos periodos de registro en un mismo gráfico. De acuerdo con lo comentado anteriormente, se puede concluir que la parte del acuífero que drena el manantial de La Fájara es de tipo kárstico. El flujo de agua subterránea es principalmente por conductos kársticos, lo que permite que se produzcan rápidos aumentos de caudal como respuesta a un evento de precipitación, acompañado de dilución generalizada de la mineralización del agua.

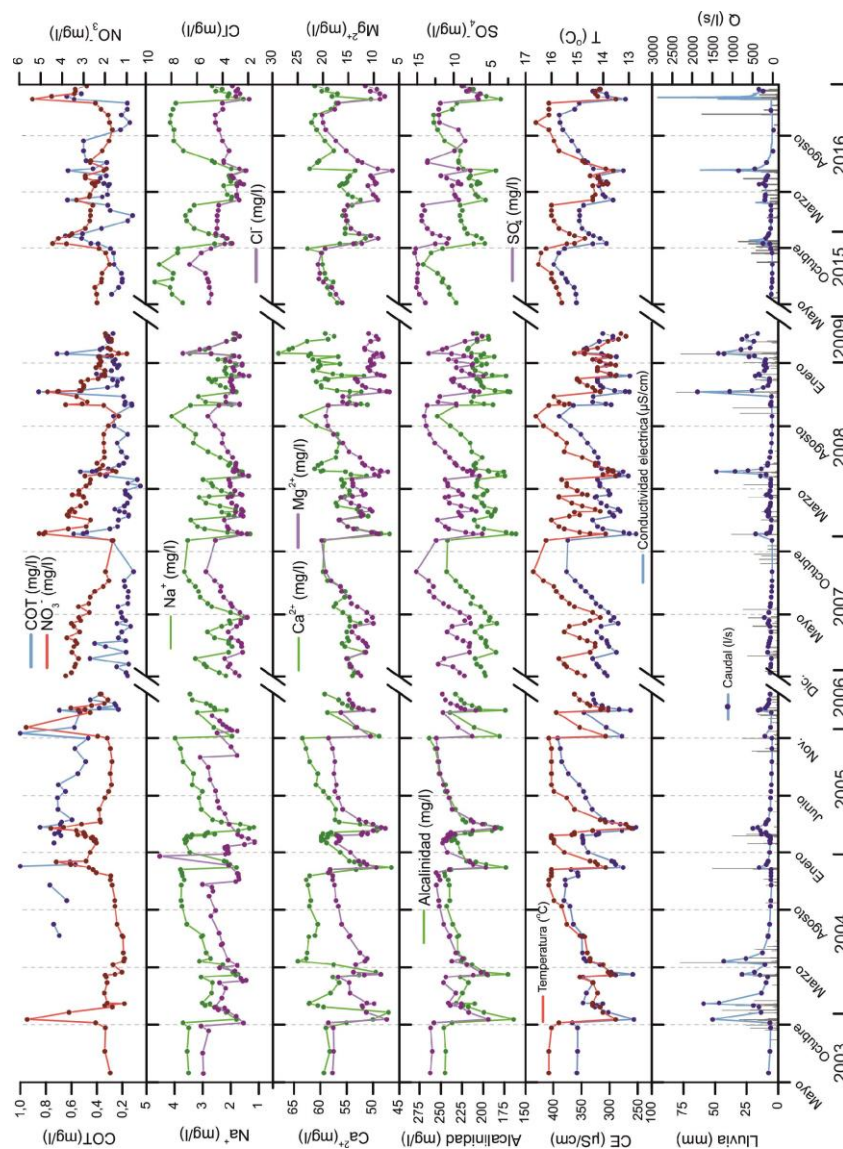


Figura 16. Evolución temporal de la composición química del agua del manantial de La Fájara (2003-2017)

### *3.1.2.- Manantiales del norte de Sierra Tejeda (Río Alhama y Játar)*

Los manantiales del Río Alhama (Fig.17) y de Játar (Fig.18) drenan la mayoría de los recursos del sector septentrional de sierra Tejeda. En las figuras 17 y 18 se puede observar como la escasa precipitación desde el año 2015 ha condicionado el funcionamiento de ambas surgencias. En el periodo 2003-2006 se llegaron a medir caudales por encima de los 500 l/s en el Río Alhama y cerca de 200 l/s en Játar, mientras que los valores máximos medidos en la presente investigación han sido de 175 l/s y 60 l/s, respectivamente.

Como respuesta ante las precipitaciones de la primavera de 2004, ambos manantiales tuvieron un aumento de caudal lento y amortiguado en el tiempo. La diferencia entre el evento principal de precipitación y la punta de caudal en ambos caso llego a ser de un mes. Las crecidas en estas surgencias no van acompañadas de diluciones significativas en la mineralización de las aguas que drenan. Tanto en la figura 17 como 18 se puede observar que el rango máximo de variación de la conductividad eléctrica es de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1  $^{\circ}\text{C}$  de temperatura. Estos datos ponen de manifiesto que el sector septentrional de sierra Tejeda presenta un funcionamiento hidrogeológico propio de un acuífero de flujo difuso, en el que el agua fluye preferencialmente a través de fracturas.

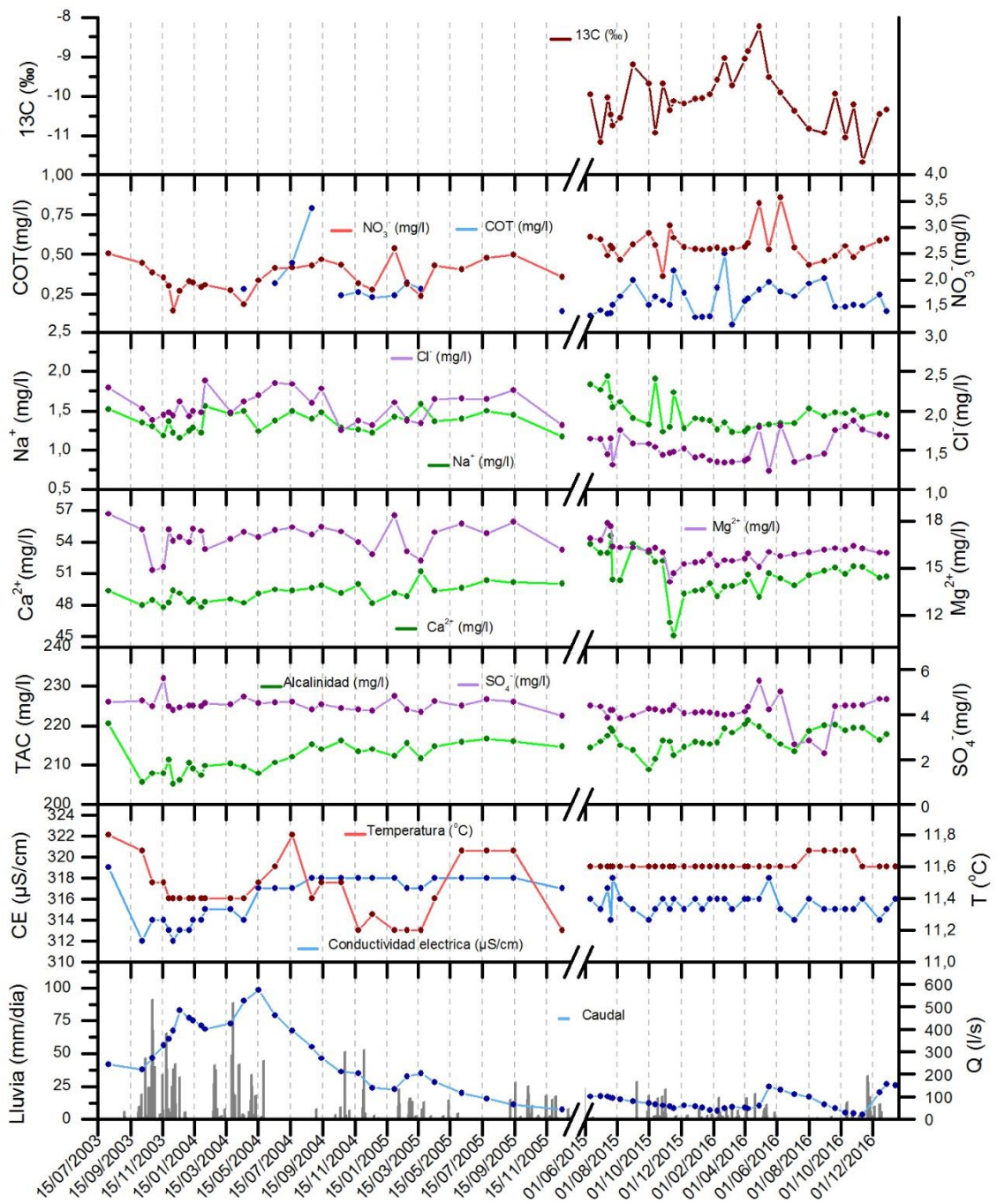


Figura 17. Evolución temporal de la composición química del agua del nacimiento del Río Alhama

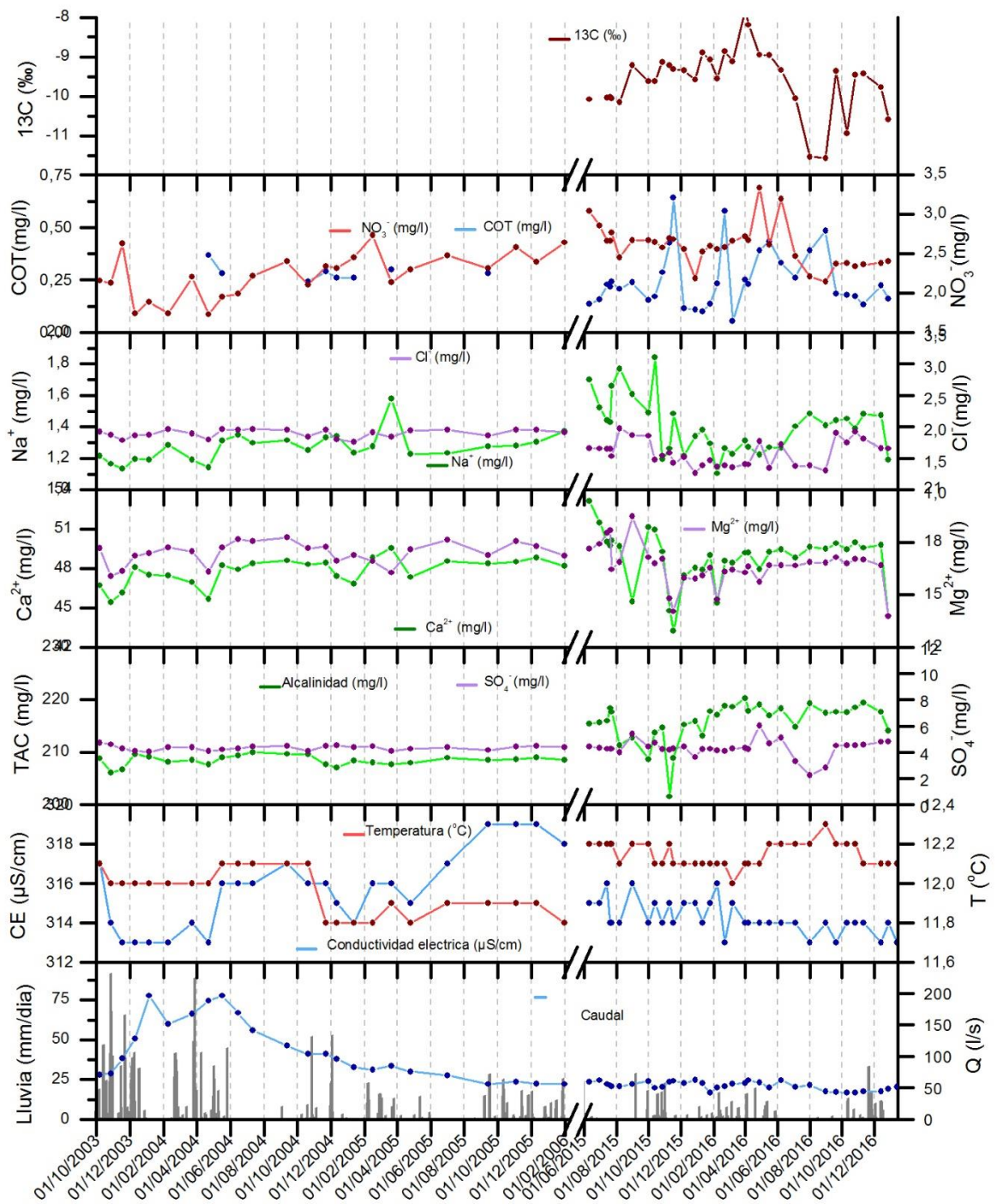


Figura 18. Evolución temporal de la composición química del agua del manantial de Játar



### 3.1.3.- *Manantial de Maro*

En la figura 19 muestra la evolución temporal del manantial de maro para los periodos 2003-2006 y junio 2015-enero 2017.

El manantial de Maro responde rápidamente con aumentos de caudal ante los eventos de precipitación, con caudales máximos por encima de 1500 l/s a finales del año 2003. Posteriormente, las crecidas han sido de menor magnitud. A finales de noviembre de 2016, el manantial alcanzó el caudal máximo (320 l/s) durante el presente periodo de investigación.

La evolución de la CE y temperatura pone de manifiesto rápidos y marcados descensos durante aumentos del caudal del manantial. Los contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  son los que tienen más incidencia en la composición química del agua del manantial de Maro (facies sulfatada cálcica), son los componentes que presentan una variación más acentuada durante los procesos de dilución. Esto último se observa bien en la dilución correspondiente a las crecidas de noviembre de 2015 y 2016, en las que la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  llega a descender más de 100 mg/l y la de  $\text{Ca}^{2+}$  en torno a 50 mg/l.

El comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del manantial de Maro frente a la precipitación (con importantes y bruscos aumentos de caudal acompañado de claros procesos de dilución) es típicamente kárstico, lo que se traduce en una infiltración rápida del agua de lluvia a través de una red jerarquizada de conductos.

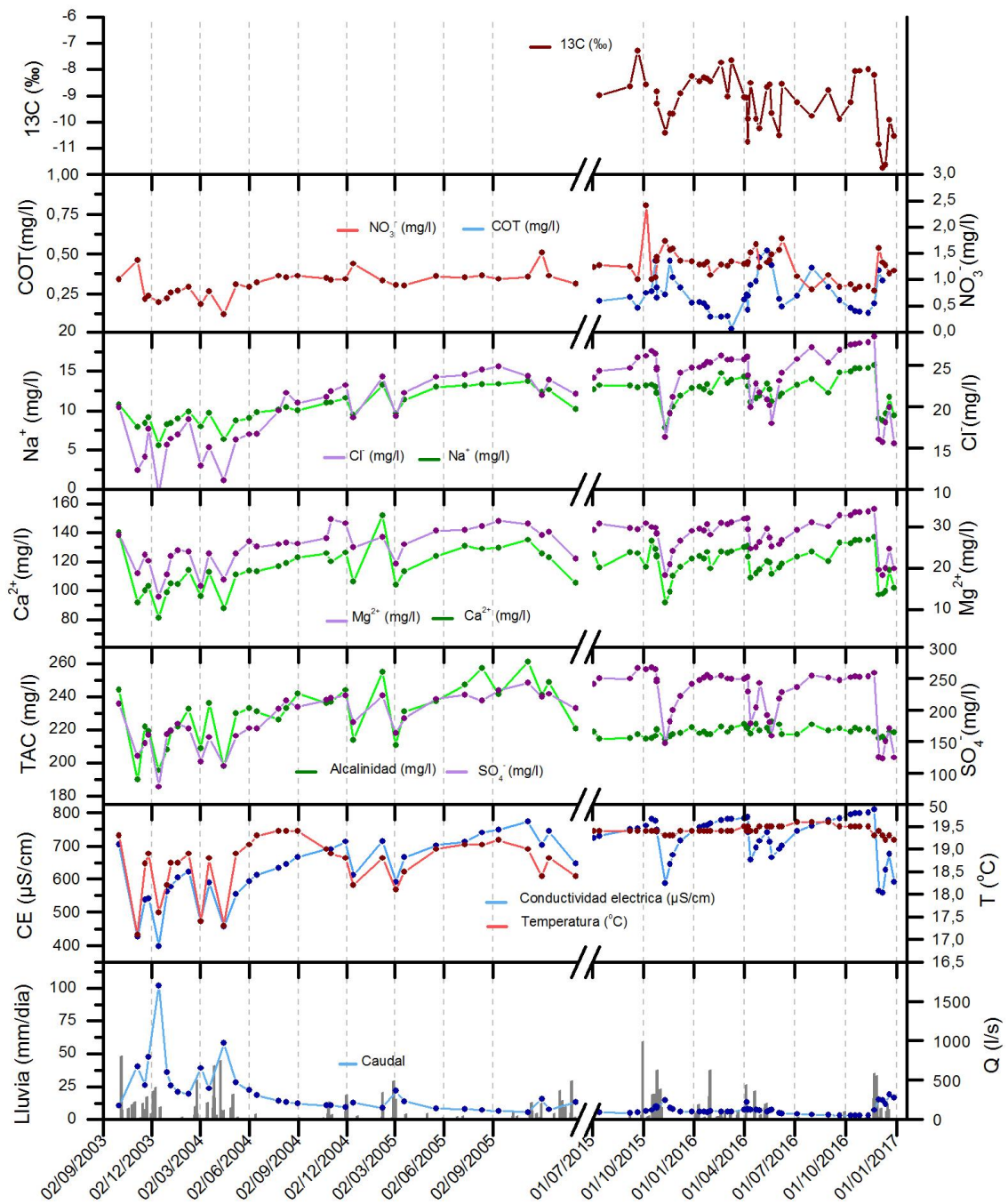


Figura 19. Evolución temporal de la composición química del agua del manantial de Maro (junio 2015- marzo 2016)

### *3.1.4.- Manantial Cijancos*

El manantial de Cijancos es el principal punto de descarga de la Sierra de Albuñuelas. En la figura 20 se puede observar que este manantial no presenta grandes aumentos de caudal como respuesta a los diferentes eventos de precipitación. Es cierto que se pueden observar aumentos de unos 50 l/s de caudal en las crecidas de primavera de los 2004 y 2005, mientras que en el periodo 2015-2017 no son tan evidentes, dadas las diferencias en las condiciones climáticas. No obstante, parece que esta surgencia es capaz de amortiguar la señal de la precipitación, lo que le permite mantener un caudal relativamente elevado en los periodos de estiaje.

Como ocurre en los manantiales de la parte norte de Sierra Tejeda, esta surgencia no presenta marcadas diluciones de la mineralización como respuesta a los aumentos de caudal. La variación máxima de conductividad eléctrica es de 15  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y en la temperatura no supera el medio grado centígrado.

Este comportamiento es típico en manantiales que drenan acuíferos fisurados, de flujo difuso, donde el agua subterránea fluye a través de las fracturas principalmente. Ello es congruente con el hecho de que la sierra de Albuñuelas esté formada, prácticamente en su totalidad, por mármoles dolomíticos fisurados.

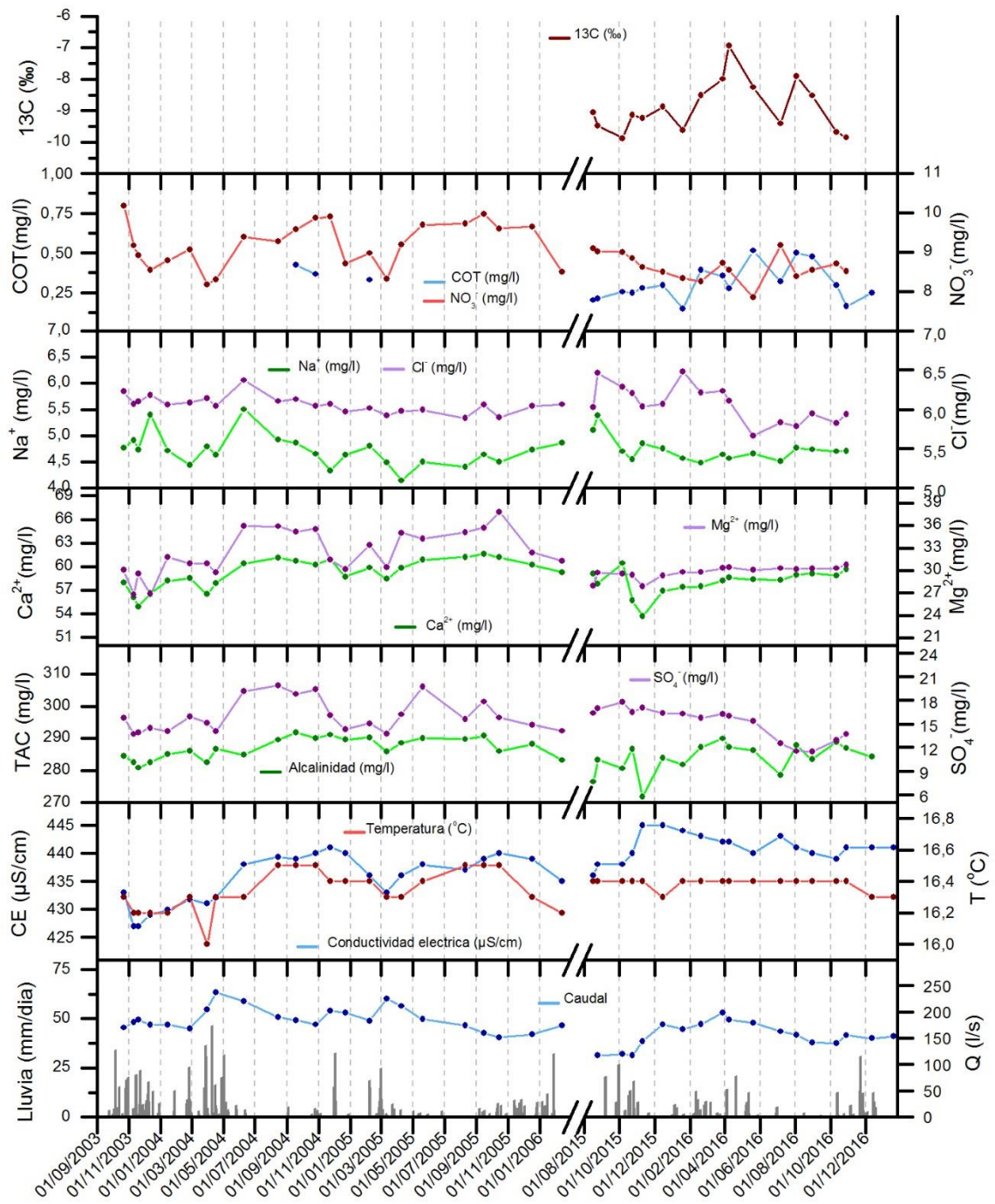


Figura 20. Evolución temporal de la composición química del agua del manantial de Cijancos

## 4. Conclusiones

Las Sierras Tejeda, Almirajara, Guájares y Albuñuelas constituyen un afloramiento de mármoles de más de 700 km<sup>2</sup> de extensión, cuyo espesor supera ampliamente los 500 m. Los mármoles descansan sobre una potente serie de metapelitas, que conforman el límite del acuífero.

Los manantiales en los que se ha mantenido un control periódico de las respuestas naturales han sido diez, seleccionados y considerados representativos después de analizar los datos antecedentes.

Las aguas subterráneas del área de estudio son principalmente de facies bicarbonatada cálcica y bicarbonatada cálcico-magnésica. Sin embargo, también existen elevadas concentraciones de sulfatos en algunos puntos como Fuente Negra, y es especialmente patente en el manantial de Maro, cuyas aguas son de facies sulfatada cálcica. Se han planteado diferentes hipótesis sobre el origen de los sulfatos en el agua dichas surgencias. A priori, el grado de metamorfismo de las rocas que constituyen el acuífero parecía indicar que la oxidación de sulfuros era una hipótesis plausible. Pero después de realizar un estudio donde se han analizado los isótopos del azufre ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ ), se puede concluir que la procedencia más probable del sulfato contenido en las aguas de los manantiales de Maro y Fuente Negra es la disolución de yesos.

Los manantiales de La Fájara y de Maro presentan un comportamiento típicamente kárstico, es decir, sufren aumento rápido y brusco de caudal ante la precipitación acompañados de importantes procesos de dilución. En cambio, los manantiales del sector septentrional de Sierra Tejeda (Río Alhama y Játar) y el de Cijancos drenan acuíferos de tipo fisurado, en los que el agua fluye de forma difusa por fracturas, y por tanto tienen un comportamiento más inercial.

Después de analizar las diferentes evoluciones temporales, se constata la diferencia de comportamiento de los acuíferos durante los períodos 2003-2006 y 2015-2017, como consecuencia de las condiciones climatológicas. En el periodo

actual de investigación (2015-2017) las precipitaciones han sido muy escasas, lo que ha condicionado las respuestas de pequeña magnitud en todos los manantiales del área de estudio.

## **5. Referencias**

Andreo, B. y Carrasco, F. (1993): *Estudio hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja*. Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 3: 163-187

Andreo, B., Liñán, C., Carrasco F., Jiménez de Cisneros, C., Caballero, F., y Mudry, J. (2004): *Influence of rainfall quantity on the isotopic composition ( $^{18}O$  and  $2H$ ) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain)*. Applied Geochemistry, 19: 561-574

Clark, I. y Fritz, P. (1997): *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC, 328 p.

Craig, H. (1961): *isotopic variations in meteoric waters*. Science, 133:1702-1703

Gat, J.R., y Garmi, I. (1970): *Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area*. J. Geophys. Res., 75 (15): 3039 – 3048.

Krouse, H.R. (1980): *Sulphur isotopes in our environment*. En: Fritz, P. y Fontes, J.C. (eds.) Isotope geochemistry, vol1., The terrestrial environment. Eselvier, Amsterdam, pp 435-471

López, V. y Gómez Pugnair M.T. (1993): *Introducción a la petrología de los mármoles de la Cueva de Nerja y materiales asociados*. Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 3: 191-223

Ortí, F., Pérez-López, A., García-Veigas, J., Rosell, L., Cendón, D.i. y Pérez-Varela, F. (2014): *Sulfate isotope compositions ( $\delta^{34}S$  y  $\delta^{18}O_{SO_4}$ ) and strontium isotopic ratios ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ ) of Triassic evaporites in the Betic Cordillera (SE Spain)*. Revista de la Sociedad Geológica de España, 27 (1): 79-90

Sanz de Galdeano, C. y López-Garrido, A.C. (2003): *Revisión de las unidades alpujarrides de las sierras de Tejeda, Almirajara y Guájares*. Revista de la Sociedad Geológica de España, 16 (3-4): 135-149.

S.G.O.P. (1991): *Estudio hidrogeológico de las sierras Tejeda, Almijara y Guájaras (Málaga y Granada)*. Memoria, planos y anejos. Informe restringido. 244 p.



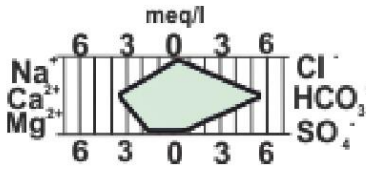
Vadillo, I., Benavente, J., Liñán, C., Carrasco, F. y Soler, A. (2016): *Nuevos datos hidroquímicos e isotópicos en el manantial kárstico de Maro (Nerja, Málaga)*. Consideraciones sobre el origen de los solutos y de la influencia de la ventilación en la zona vadosa. *Geogaceta*, 59, en prensa.

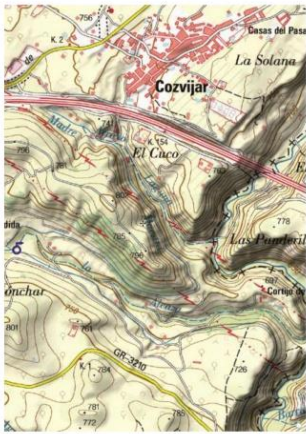

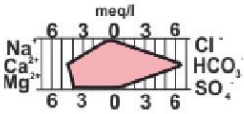
Van Stempvoort, D.R. y Krouse, H.R. (1994): *“Controls of d18O in sulfate—Review of experimental data and application to specific environments”*. En: Alpers CN y Blowes, D.W. (eds) *Environmental geochemistry of sulfide oxidation: American Chemical Society Symposium Series 550*, 446–480

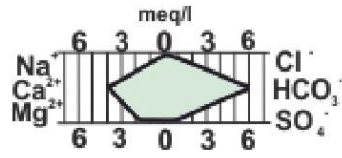
Vitòria, L., Soler, A., Aravena, R. y Canals, A. (2005): *Multi-isotopic approach (15N, 13C, 34S, 18O and D) for tracing agriculture contamination in groundwater (Maresme, NE Spain)*. In: Lichfouse, E., Schwarzbauer, J. and Robert, D. (Eds.). *Environmental chemistry*. Heidelberg: Springer-Verlag, pp 43-56


## **Anexo: Fichas de inventario de puntos de agua**



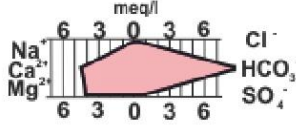


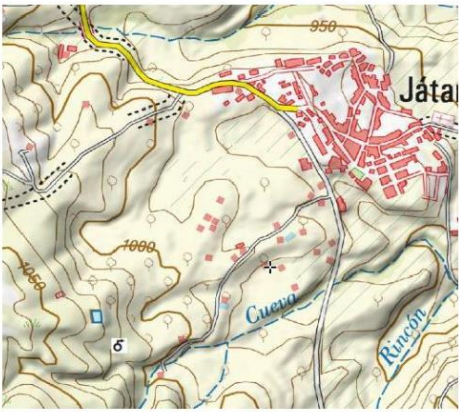

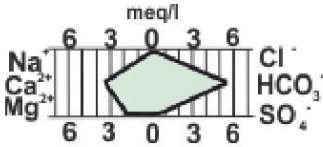
<b>INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA PROYECTO TEJAL</b>	<b>Nombre:</b> Nacimiento Río Alhama <b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Zafarraya <b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b>	<b>Tipo de punto:</b> Manantial <b>Número:</b> 1040 <b>X</b> 412225 <b>Y</b> 4087334
<b>Cuenca hidrográfica:</b> Guadalquivir <b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b> Sierra Tejeda (060.064) <b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas <b>Espacio Natural Protegido:</b> Parque Natural Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama		<b>Cota (m s.n.m):</b> 1020 <b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 1020 <b>Profundidad:</b> <b>Provincia:</b> Granada <b>Termino Municipal:</b> Alhama de Granada
Mapa de Ubicación		Fotografía: Jorge Prieto
		
<b>Caudal medio (l/s):</b> 100 <b>Caudal permanente:</b> SI <b>Uso del Agua:</b> Abastecimiento urbano <b>Sistema de explotación:</b> <b>Cantidad extraída (l/s):</b> 40-50 <b>Observaciones:</b> Caseta de abastecimiento asociada con conducciones sin bombeo.		<b>Conductividad eléctrica (µS/cm):</b> 316 <b>Temperatura (°C):</b> 11,6 <b>Facies Hidroquímica:</b> Bicarbonatado cálcico <b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b>
		

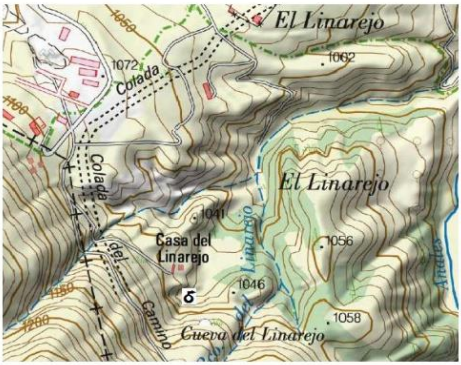

<b>INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA PROYECTO TEJAL</b>	<b>Nombre:</b> Cijancos <b>Tipo de punto:</b> Manantial
	<b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Dúrcal <b>Número:</b> 1041
	<b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b> <b>X</b> <b>Y</b> 447009      4093023
<b>Cuenca hidrográfica:</b> C. Mediterráneas Andaluzas <b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b> Sierra Albuñuelas (060.061) <b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas <b>Espacio Natural Protegido:</b> No	<b>Cota (m s.n.m):</b> 700 <b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 700 <b>Profundidad:</b> <b>Provincia:</b> Granada <b>Termino Municipal:</b> Villamena
Mapa de Ubicación      Fotografía: Jorge Prieto	
	
<b>Caudal medio (l/s):</b> 150-175 <b>Caudal permanente:</b> Si <b>Uso del Agua:</b> No <b>Sistema de explotación:</b> <b>Cantidad extraída (l/s):</b> <b>Observaciones:</b> Existen numerosas surgencias a lo largo del cauce y termina en una cascada (Fotografía) donde se une al Río Dúrcal.	<b>Conductividad eléctrica (µS/cm):</b> 441 <b>Temperatura (°C):</b> 16,4 <b>Facies Hidroquímica:</b> Bicarbonatada cálcico-magnésica <b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b> 



<b>INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA PROYECTO TEJAL</b>	<b>Nombre:</b> La Fájara	<b>Tipo de punto:</b> Manantial
	<b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Zafarraya	<b>Número:</b> 1040
<b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b>	<b>X</b> 402321	<b>Y</b> 4082550
<b>Cuenca hidrográfica:</b> C. Mediterráneas Andaluzas	<b>Cota (m s.n.m):</b> 420	
<b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b> Sierra Tejeda (060.064)	<b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 420	
<b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas	<b>Profundidad:</b>	
<b>Espacio Natural Protegido:</b> Parque Natural Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama	<b>Provincia:</b> Málaga	
	<b>Termino Municipal:</b> Canillas de Aceituno	
Mapa de Ubicación	Fotografía: Jorge Prieto	
		
<b>Caudal medio (l/s):</b> 100 <b>Caudal permanente:</b> SI <b>Uso del Agua:</b> Agricultura <b>Sistema de explotación:</b> Acequia <b>Cantidad extraída (l/s):</b> 20-30 <b>Observaciones:</b> Se ha instalado un equipo de registro continuo de nivel de lámina de agua.	<b>Conductividad eléctrica (µS/cm):</b> 349 <b>Temperatura (°C):</b> 15,6 <b>Facies Hidroquímica:</b> Bicarbonatado cálcico <b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b>	
		

<p align="center"><b>INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA PROYECTO TEJAL</b></p>	<p><b>Nombre:</b> Fuente Negra</p> <p><b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Motril</p> <p><b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b></p>	<p><b>Tipo de punto:</b> Manantial</p> <p><b>Número:</b> 1055</p> <p align="center"><b>X</b></p> <p align="center">435696</p>	<p align="center"><b>Y</b></p> <p align="center">4076585</p>
<p><b>Cuenca hidrográfica:</b> C. Mediterráneas Andaluzas</p> <p><b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b></p> <p>Sierra de las Guájaras (060.062)</p> <p><b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas</p> <p><b>Espacio Natural Protegido:</b> Parque Natural Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama</p>		<p><b>Cota (m s.n.m):</b> 420</p> <p><b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 420</p> <p><b>Profundidad:</b></p> <p><b>Provincia:</b> Granada</p> <p><b>Termino Municipal:</b> Otívar</p>	
<p>Mapa de Ubicación</p>		<p>Fotografía: Jorge Prieto</p>	
			
<p><b>Caudal medio (l/s):</b> 30-50</p> <p><b>Caudal permanente:</b> Si</p> <p><b>Uso del Agua:</b> Si</p> <p><b>Sistema de explotación:</b> acequia de riego</p> <p><b>Cantidad extraída (l/s):</b> 60</p> <p><b>Observaciones:</b></p> <p>El manantial se sitúa en el margen derecho del rio Verde, aguas abajo del paraje de "La Junta de los Ríos".</p> <p>La cantidad extraída en la acequia depende del caudal que lleva el rio Verde aguas arriba de la Fuente Negra.</p>		<p><b>Conductividad eléctrica (µS/cm):</b> 536</p> <p><b>Temperatura (°C):</b> 16,3</p> <p><b>Facies Hidroquímica:</b> Bicarbonatada cálcico-magnésica.</p> <p><b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b></p> 	

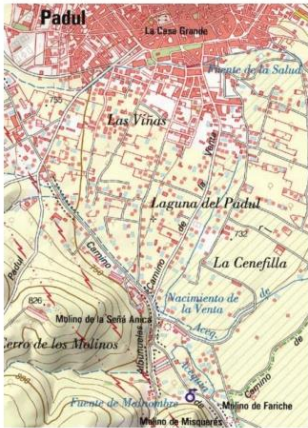

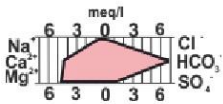
<b>INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA  PROYECTO TEJAL</b>	<b>Nombre:</b> Fuente Santa	<b>Tipo de punto:</b> Manantial	
	<b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Dúrcal	<b>Número:</b> 1041	
	<b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b>	<b>X</b> 444630	<b>Y</b> 4078634
<b>Cuenca hidrográfica:</b> C. Mediterráneas Andaluzas <b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b>  Sierra de las Guájaras (060.062) <b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas <b>Espacio Natural Protegido:</b>	<b>Cota (m s.n.m):</b> 430 <b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 430 <b>Profundidad:</b> <b>Provincia:</b> Granada <b>Termino Municipal:</b> Los Guájares		
<b>Mapa de Ubicación</b>		<b>Fotografía:</b> Jorge Prieto	
			
<b>Caudal medio (l/s):</b> 40-50 <b>Caudal permanente:</b> Si <b>Uso del Agua:</b> Si <b>Sistema de explotación:</b> acequia de riego <b>Cantidad extraída (l/s):</b> 10-20 <b>Observaciones:</b>	<b>Conductividad eléctrica (<math>\mu\text{S/cm}</math>):</b> 517 <b>Temperatura (<math>^{\circ}\text{C}</math>):</b> 18,8 <b>Facies Hidroquímica:</b> Bicarbonatada cálcico-magnésica. <b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b> 		



<b>INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA PROYECTO TEJAL</b>	<b>Nombre:</b> Nacimiento de Játar	<b>Tipo de punto:</b> Manantial			
	<b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Zafarraya	<b>Número:</b> 1040			
	<b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b>	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;"><b>X</b></td> <td style="text-align: center;"><b>Y</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">418662</td> <td style="text-align: center;">4087816</td> </tr> </table>	<b>X</b>	<b>Y</b>	418662
<b>X</b>	<b>Y</b>				
418662	4087816				
<b>Cuenca hidrográfica:</b> Guadalquivir <b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b> Sierra Tejeda (060.064) <b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas <b>Espacio Natural Protegido:</b> Parque Natural Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama	<b>Cota (m s.n.m):</b> 990 <b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 990 <b>Profundidad:</b> <b>Provincia:</b> Granada <b>Termino Municipal:</b> Arenas del Rey				
Mapa de Ubicación	Fotografía: Jorge Prieto				
					
<b>Caudal medio (l/s):</b> 60 <b>Caudal permanente:</b> SI <b>Uso del Agua:</b> Abastecimiento urbano <b>Sistema de explotación:</b> <b>Cantidad extraída (l/s):</b> 20-30 <b>Observaciones:</b> Caseta de abastecimiento asociada con conducciones sin bombeo.	<b>Conductividad eléctrica (µS/cm):</b> 315 <b>Temperatura (°C):</b> 12.1 <b>Facies Hidroquímica:</b> Bicarbonatado cálcico <b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b> 				

INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA PROYECTO <i>TEJAL</i>	<b>Nombre:</b> El Linarejo <b>Tipo de punto:</b> Manantial																													
	<b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Zafarraya <b>Número:</b> 1040																													
<b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b> <table style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="border:none;"><b>X</b></td> <td style="border:none;"><b>Y</b></td> </tr> <tr> <td style="border:none;">419830</td> <td style="border:none;">4085742</td> </tr> </table>			<b>X</b>	<b>Y</b>	419830	4085742																								
<b>X</b>	<b>Y</b>																													
419830	4085742																													
<b>Cuenca hidrográfica:</b> Guadalquivir	<b>Cota (m s.n.m):</b> 1020																													
<b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b> Sierra Tejeda (060.064)	<b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 1020																													
<b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas	<b>Profundidad:</b>																													
<b>Espacio Natural Protegido:</b> Parque Natural Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama	<b>Provincia:</b> Granada																													
<b>Termino Municipal:</b> Arenas del Rey																														
Mapa de Ubicación		Fotografía: Jorge Prieto																												
<div style="display: flex; justify-content: space-between;">   </div>																														
<b>Caudal medio (l/s):</b> 40 <b>Caudal permanente:</b> SI <b>Uso del Agua:</b> No <b>Sistema de explotación:</b> <b>Cantidad extraída (l/s):</b> <b>Observaciones:</b>	<b>Conductividad eléctrica (μS/cm):</b> 338 <b>Temperatura (°C):</b> 12.8 <b>Facies Hidroquímica:</b> Bicarbonatado cálcico <b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b> <div style="text-align: center;"> <table style="border:none;"> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="3" style="text-align:center;">meq/l</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td style="text-align:right;">Na</td> <td style="border-right: 1px solid black;">6</td> <td style="border-right: 1px solid black;">3</td> <td style="border-right: 1px solid black;">0</td> <td style="border-left: 1px solid black;">3</td> <td style="border-left: 1px solid black;">6</td> <td style="text-align:left;">Cl<sup>-</sup></td> </tr> <tr> <td style="text-align:right;">Ca<sup>2+</sup></td> <td style="border-right: 1px solid black;">6</td> <td style="border-right: 1px solid black;">3</td> <td style="border-right: 1px solid black;">0</td> <td style="border-left: 1px solid black;">3</td> <td style="border-left: 1px solid black;">6</td> <td style="text-align:left;">HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></td> </tr> <tr> <td style="text-align:right;">Mg<sup>2+</sup></td> <td style="border-right: 1px solid black;">6</td> <td style="border-right: 1px solid black;">3</td> <td style="border-right: 1px solid black;">0</td> <td style="border-left: 1px solid black;">3</td> <td style="border-left: 1px solid black;">6</td> <td style="text-align:left;">SO<sub>4</sub><sup>-</sup></td> </tr> </table> </div>				meq/l					Na	6	3	0	3	6	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	6	3	0	3	6	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	6	3	0	3	6	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
		meq/l																												
Na	6	3	0	3	6	Cl <sup>-</sup>																								
Ca <sup>2+</sup>	6	3	0	3	6	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>																								
Mg <sup>2+</sup>	6	3	0	3	6	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>																								

<b>INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA PROYECTO TEJAL</b>	<b>Nombre:</b> Maro	<b>Tipo de punto:</b> Manantial
	<b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Vélez-Málaga	<b>Número:</b> 1054
<b>Cuenca hidrográfica:</b> C. Mediterráneas Andaluzas <b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b> Sierra de Alberquillas (060.063) <b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas <b>Espacio Natural Protegido:</b> Parque Natural Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama	<b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b>	<b>X</b> 425248
		<b>Y</b> 4068886
	<b>Cota (m s.n.m):</b> 120	<b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 120
	<b>Profundidad:</b>	
	<b>Provincia:</b> Málaga	<b>Termino Municipal:</b> Nerja
<b>Mapa de Ubicación</b>	<b>Fotografía:</b> Jorge Prieto	
		
<b>Caudal medio (l/s):</b> 100-150 <b>Caudal permanente:</b> Si <b>Uso del Agua:</b> Si <b>Sistema de explotación:</b> Derivación de abastecimiento y acequia de riego <b>Cantidad extraída (l/s):</b> 70-80 <b>Observaciones:</b> Actualmente está en proceso de construcción de una fuente	<b>Conductividad eléctrica (µS/cm):</b> 739 <b>Temperatura (°C):</b> 19,4 <b>Facies Hidroquímica:</b> Sulfatada cálcica <b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b> 	



<b>INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA PROYECTO TEJAL</b>	<b>Nombre:</b> Molino	<b>Tipo de punto:</b> Manantial
	<b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Padul	<b>Número:</b> 1026
	<b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b>	<b>X</b> 444693
<b>Cuenca hidrográfica:</b> C. Mediterráneas Andaluzas <b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b> Sierra Albuñuelas (060.061)		<b>Cota (m s.n.m):</b> 729 <b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 729 <b>Profundidad:</b> <b>Provincia:</b> Granada <b>Termino Municipal:</b> Padul
<b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas <b>Espacio Natural Protegido:</b> No		
Mapa de Ubicación		Fotografía: Jorge Prieto
		
<b>Caudal medio (l/s):</b> 20 <b>Caudal permanente:</b> Si <b>Uso del Agua:</b> Si <b>Sistema de explotación:</b> acequia de riego <b>Cantidad extraída (l/s):</b> 20 <b>Observaciones:</b> Pequeña acequia de riego que recoge la totalidad de las aguas del manantial.		<b>Conductividad eléctrica (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>):</b> 502 <b>Temperatura (<math>^{\circ}\text{C}</math>):</b> 16,8 <b>Facies Hidroquímica:</b> Bicarbonatada cálcico-magnésica <b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b>
		

<b>INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA PROYECTO TEJAL</b>	<b>Nombre:</b> La Zaza	<b>Tipo de punto:</b> Manantial
	<b>Hoja topográfica 1/50:000:</b> Dúrcal	<b>Número:</b> 1041
<b>Coordenadas UTM (Huso 30 N):</b>		<b>X</b> 450761
		<b>Y</b> 4083931
<b>Cuenca hidrográfica:</b> C. Mediterráneas Andaluzas <b>Masa de agua subterránea (M.A.S):</b> Sierra de las Guájaras (060.062) <b>Naturaleza:</b> Rocas Carbonáticas <b>Espacio Natural Protegido:</b>		<b>Cota (m s.n.m):</b> 680 <b>Cota piezométrica (m s.n.m):</b> 680 <b>Profundidad:</b> <b>Provincia:</b> Granada <b>Termino Municipal:</b> El Pinar
Mapa de Ubicación		Fotografía: Jorge Prieto
		
<b>Caudal medio (l/s):</b> 40 <b>Caudal permanente:</b> Si <b>Uso del Agua:</b> Si <b>Sistema de explotación:</b> acequia de riego <b>Cantidad extraída (l/s):</b> 40 <b>Observaciones:</b> Caudal derivado para riego en su totalidad		<b>Conductividad eléctrica (µS/cm):</b> 416 <b>Temperatura (°C):</b> 15,8 <b>Facies Hidroquímica:</b> Bicarbonatada cálcico-magnésica. <b>Diagrama de Stiff (composición química media):</b>
		