

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DE AGUAS MINERALES Y TERMALES DE LA PROVINCIA DE MÁLAGA

Salamanca, 12-15 noviembre 2018

Juan A. BARBERÁ FORNELL*, **Ander DE ABRISQUETA RANGEL*** y **Bartolomé ANDREO NAVARRO***

(*) Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de Universidad de Málaga (CEHIUMA). 29071. jabarbera@uma.es, ander.deabrisqueta@gmail.com, andreo@uma.es

RESUMEN

El presente estudio pretende contribuir al conocimiento del origen de las aguas subterráneas minerales y termales inventariadas en la provincia de Málaga y analizar la relación ente su composición química y la geología de las rocas con las que interaccionan. Con tal fin, se llevaron a cabo campañas de medida de parámetros físico-químicos *in-situ* y toma de muestras de agua en manantiales y sondeos para su posterior análisis en laboratorio (iones mayoritarios, alcalinidad e isótopos del agua). Los resultados obtenidos muestran una elevada variabilidad en la mineralización (317-14250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de las aguas subterráneas y facies hidroquímicas más frecuentes de tipo bicarbonatada cálcica (como producto de disolución de litologías carbonáticas y detríticas), bicarbonatada magnésica (peridotitas) y clorurada sódica (materiales detríticos/evaporíticos). La clasificación térmica efectuada a partir de las medidas de temperatura del agua (realizadas *in-situ*) comprende aguas frías, con una temperatura media de $14,9 \pm 0,7$ °C, aguas de tipo normal, con $18,4 \pm 0,6$ °C y aguas termales, con $20,6 \pm 0,7$ °C. La composición isotópica de las muestras de agua, coherente con las líneas Meteorica Global y del Mediterráneo occidental, así como los valores de exceso en deuterio (8-19 ‰), reflejan un origen meteórico mixto (Atlántico-Mediterráneo), preferentemente del Océano Atlántico. El análisis estadístico multivariante *cluster* aplicado a la información obtenida ha permitido diferenciar cinco tipos hidroquímicos representativos del drenaje de los grupos litológicos considerados: i) peridotitas y rocas carbonáticas (aguas normales-frías), con flujos más superficiales y de corto recorrido; ii) litologías carbonáticas (y detríticas) con cierto grado de termalismo, que ejemplifican esquemas de flujo subterráneo de cierta profundidad y tiempos largos de permanencia y; iii) rocas detríticas y/o evaporíticas formadas por (o que contienen) minerales muy solubles, con aguas muy evolucionadas desde el punto de vista hidrogeológico, que evidencian un elevado grado de interacción agua-roca.

Palabras clave: aguas minerales y termales, hidrogeoquímica, composición isotópica, análisis *cluster*, provincia de Málaga.

INTRODUCCIÓN

Las aguas minerales y termales han sido aprovechadas desde la antigüedad por diferentes culturas y civilizaciones. Son numerosos los vestigios de infraestructuras hídricas características de culturas prerromanas y romanas como baños, balnearios y termas, que

atestiguan la trascendencia de este tipo de recursos hídricos en los aspectos culturales, económicos y de sanidad en las sociedades antiguas. A día de hoy, la relevancia económica de estas aguas queda patente en la proliferación y desarrollo de actividades económicas que aprovechan aguas minerales y/o termales en diferentes regiones, tales como el embotellado de aguas minerales naturales y el turismo de salud y bienestar (balnearios y centros termales), pero también en la actividad llevada a cabo en entornos naturales (p.e. itinerarios hidrogeológicos a partir de puntos de interés relacionados con las aguas subterráneas). En España, este tipo de actividades genera anualmente un volumen de negocio que supera los 500 millones de euros (en el caso de las aguas envasadas) y 100 millones de euros en el uso del recurso destinado a balneoterapia (CORRAL et al., 2007). Otros usos del agua, algo más específicos, son la extracción de componentes minerales y el aprovechamiento de su poder calorífico, aunque tienen un menor impacto socioeconómico.

Desde el punto de vista científico, las aguas minerales y termales despiertan un gran interés debido a sus características físico-químicas singulares y, en muchas ocasiones, al patrimonio histórico al que se asocian. Al mismo tiempo, existe un cierto desconocimiento sobre los aspectos genéticos, hidrogeológicos y geoquímicos de estas aguas subterráneas y son escasos los trabajos realizados hasta la fecha. CRUZ-SAN JULIÁN y GARCÍA-ROSSELL (1975), llevaron a cabo un estudio regional que abordaba el termalismo de aguas subterráneas en la España meridional. Estos autores determinaron, a partir de la temperatura del agua de las surgencias inventariadas y de su composición química, una relación entre la distribución espacial de las facies hidroquímicas y la geología regional. Más tarde, el IGME (1991a) desarrolló una serie de trabajos preliminares sistemáticos (por provincias), en los que evaluaron el estado de las aguas minerales de la Comunidad Autónoma de Andalucía, mediante el inventario de puntos de agua, análisis físico-químicos (en muchos casos, con determinaciones de gases) y la caracterización hidrogeológica preliminar de las surgencias. Entre ellos, se halla el correspondiente a las aguas minerales de la provincia de Málaga (IGME, 1991b). A estos estudios le sucedieron otros como los de BAEZA, et al. (2001), que elaboraron una actualización de las surgencias minerales y termales del territorio nacional, y CORRAL et al. (2007), que relacionaron las características fisicoquímicas de las aguas minerales españolas y la geología de su entorno, definiendo dominios hidrotermales e identificando aguas minerales singulares. Todos estos trabajos previos han servido para despertar el interés de realizar nuevas investigaciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas que permitan mejorar el conocimiento de este tipo de aguas subterráneas tan singulares.

La presente investigación pretende avanzar en el conocimiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas minerales y termales inventariadas en la provincia de Málaga a partir de: i) la caracterización geoquímica e isotópica regional de las aguas subterráneas; ii) la determinación del origen de las mismas mediante datos isotópicos y iii) la clasificación termal y química de las aguas atendiendo a criterios específicos y análisis estadísticos multivariantes.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

La provincia de Málaga tiene una superficie aproximada de 7300 km² y un relieve generalmente montañoso, del que sólo un 10% del terreno presenta cotas por debajo de los 100 m s.n.m. (MÉRIDA Y CANTARERO, 2008). Las máximas altitudes, en torno a 2000 m, se alcanzan en las zonas montañosas limítrofes con las provincias de Cádiz (límite occidental) y Granada (límite nororiental). Las precipitaciones se distribuyen generalmente de forma

gradual de oeste a este -aunque está condicionada localmente por la orografía del terreno, con valores entre 1500 y 500 mm/año, respectivamente (SENCIALES, 2008). En el territorio malagueño se registran temperaturas medias anuales que varían entre 17°C y 19°C en la zona de costa, mientras que en el interior se miden valores entre 2°C y 4°C más bajos.

El contexto geológico del área de estudio está representado por los cuatro grandes dominios descritos en la Cordillera Bética (MARTÍN-ALGARRA, 1987; VERA, 2004). La Zona Externa se caracteriza por presentar materiales sedimentarios con edades que van desde el período Triásico al Terciario. Las rocas triásicas están constituidas por calizas y dolomías oscuras (Trías Medio, Muschelkalk), y arcillas y areniscas con intercalaciones de yesos (Trías Superior, Keuper). El período Jurásico está representado por litologías carbonáticas (dolomías y calizas blancas y grises) y margosas (margocalizas, calizas con sílex, radiolaritas y turbiditas). La transición hacia el Cretácico se lleva a cabo mediante margas y margocalizas.

Por otra parte, la Zona Interna está formada por rocas metamórficas de edad Paleozoico-Triásico, entre los que se encuentran esquistos, filitas y pizarras, además de mármoles. También se reconocen rocas plutónicas ultramáficas (peridotitas). Las litologías que constituyen el Complejo del Flysch del Campo de Gibraltar y las depresiones postorogénicas son generalmente areniscas, arcillas y limos, y calcarenitas y gravas, respectivamente.

Las Masas de Agua Subterránea (MAS) definidas en la provincia de Málaga (DPM-IGME-GHUMA, 2007) están formadas predominantemente por acuíferos de tipo carbonático, con una extensión de afloramientos aproximada de 1000 km², y acuíferos detríticos, cuya superficie es de 950 km² (Figura 1).

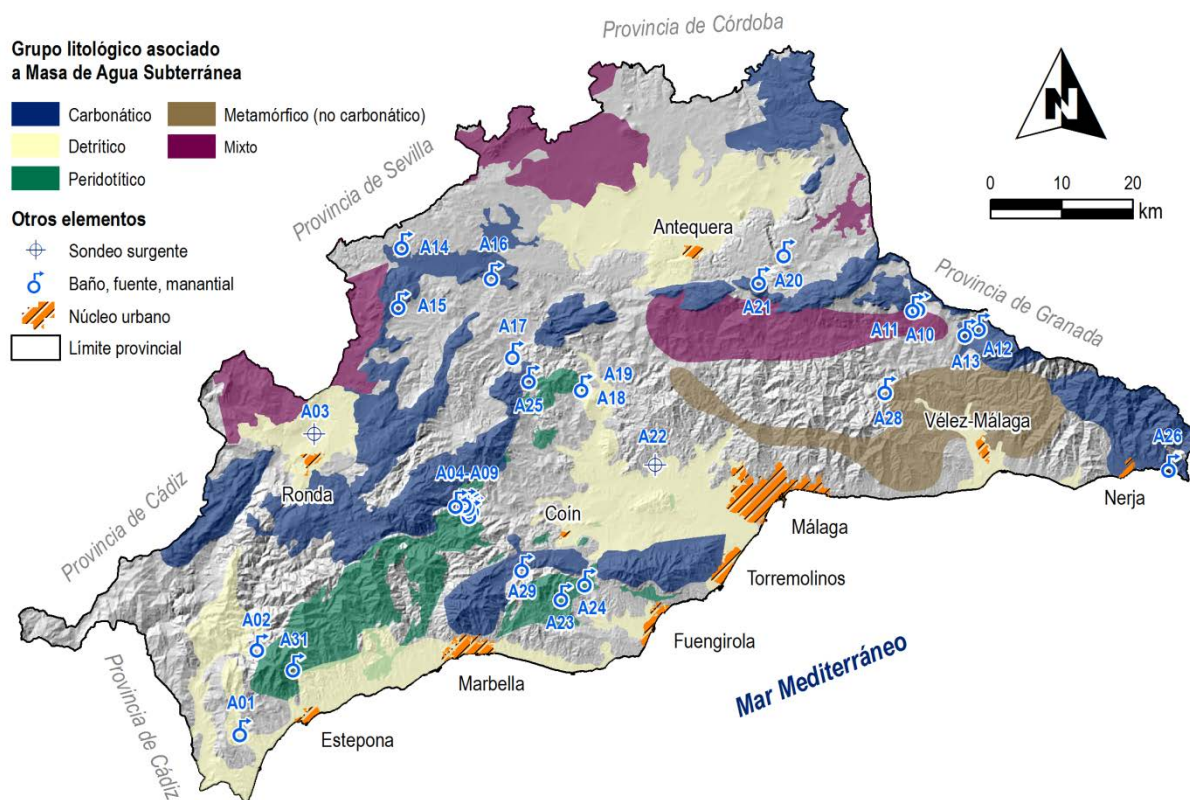


Figura 1. Área de estudio, Masas de Agua Subterránea definidas en el Plan Hidrológico de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (clasificadas por tipo de litología predominante) y puntos de muestreo

Los acuíferos carbonáticos están formados por materiales geológicos de edad Triásico y sobre todo Jurásico, tanto de origen sedimentario como metamórfico, que se caracterizan por desarrollar una alta permeabilidad (porosidad secundaria) por fisuración y/o karstificación. Los acuíferos detríticos son de edad Mioceno-Cuaternario y están constituidos por materiales de naturaleza diversa (areniscas calcáreas, gravas, arcillas, limos, etc.), con permeabilidad debida a la porosidad intergranular. Por otro lado, los materiales triásicos arcilloso-evaporíticos tienen un compartamiento general de acuitardo, aunque pueden constituir formaciones permeables, de tipo kárstico, por la disolución de minerales solubles (halita y yeso). Otro tipo de rocas, como las peridotitas (ultramáficas), se comportan hidrogeológicamente como medios de tipo fisurado, de baja permeabilidad, debido a la fracturación y a la meteorización de las zonas más superficiales o capa de alteración (ANDREO y GERVILLA, 2007).

METODOLOGÍA

La selección de puntos de muestreo (Figura 1) se ha llevado a cabo a partir de los inventarios recogidos en IGME (1991b) y BAEZA et al. (2001). Se han agrupado, de la manera más fidedigna posible, las numerosas litologías asociadas al drenaje de aguas subterráneas muestreadas para su posterior análisis, atendiendo a criterios estrictamente hidrogeológicos y a las observaciones efectuadas *in-situ* en los afloramientos rocosos del entorno de los puntos de agua. Estas son (por orden decreciente de puntos de agua representativos): carbonáticas, peridotíticas, detríticas y evaporíticas.

Los trabajos de campo consistieron en la toma de muestras de agua subterránea en manantiales y fuentes (19), baños (6), balnearios (2) y sondeos (2), entre los meses de abril y julio de 2017 (inicio de estiaje). Además, se realizaron medidas *in-situ* de la conductividad eléctrica (CE) y de la temperatura, con un conductivímetro portátil equipado con sonda de temperatura (WTW[®] 3310), y del pH, O₂ (disuelto) y Eh, mediante el uso de un equipo multiparámetro (HACH[®] HQ40D). La precisión de las medidas de campo estuvo comprendida entre 0,5% (CE y temperatura) y 2% (pH, O₂ y Eh).

En el laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga se determinó la concentración de iones mayoritarios (Li⁺, Na⁺, K⁺, Ca⁺², Mg⁺², Sr⁺², F⁻, Cl⁻, Br⁻, NO₃⁻, y SO₄⁻²) en las muestras de agua subterránea mediante cromatografía iónica (METROHM[®] 930 Compact IC Flex y Pro), con precisión del orden del 2%. La alcalinidad total fue determinada mediante volumetría, de forma automática (METROHM[®] 888 Titrand). Los isótopos de la molécula del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) se analizaron en el mismo laboratorio mediante un espectrómetro láser compacto (PICARRO[®] CRDS L1102-i). Las medidas obtenidas fueron referidas a estándares internacionales (V-SMOW, *Viena Standard Mean Ocean Water*), proporcionados por la Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA). La precisión de los resultados analíticos fue $\pm 0,1\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\pm 1\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$.

El análisis estadístico de los resultados obtenidos, tanto univariante (estadísticos descriptivos y test t de Student) como multivariante (análisis *cluster* jerarquizado), se han llevado a cabo mediante MS[®] Excel y el paquete estadístico XLSTAT[®] 2014.5.03 (Addinsoft[®]).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hidrogeoquímica general

En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en las campañas de muestreo de aguas subterráneas efectuadas en la provincia de Málaga. Dichas aguas muestran valores muy dispares de conductividad eléctrica, comprendidos entre 317 (manantial de la Tejilla – дрена peridotitas) y 14250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (manantial del Río Salado – drenaje de materiales evaporíticos), tal y como cabría esperar por la diversidad de litologías existentes y de líneas de flujo representativas del drenaje a partir de manantiales y sondeos surgentes. Entre grupos litológicos, las aguas muestreadas en acuíferos detríticos parecen tener, por término medio, mayor mineralización (Figura 2), probablemente como consecuencia de flujos de mayor recorrido y/o tiempo de residencia en el subsuelo.

Nombre	ID	Tipo	Grupo litológico asociado	Cond.E.	Temp	pH	O ₂	Eh	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	TAC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺²	Ca ⁺²	Sr ⁺²	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d
				[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	[°C]		[mg/L]	[mV]	[mg/L]										[‰ VSMOW]				
Hedionda (Manilva)	A01	Baños	Carbonática	1468	21,9	6,9	0,16	-273	345	n.d.	345	0,58	302,8	n.d.	150	193	4,9	34,1	122	2,3	-5,6	-30,7	13,7
La Tejilla	A02	Fuente	Peridotítica	317	16,3	6,8	8,10	17	230	n.d.	230	0,08	6,6	n.d.	6	6	0,7	52,3	5	n.d.	-5,7	-30,8	15,0
Huerta San José	A03	Sond. surg.	Detrítica	8960	16,5	7,3	1,66	-291	278	n.d.	278	1,37	3136,0	n.d.	43	1899	22,7	84,6	272	27,0	-5,9	-39,6	8,0
El Chorro	A04	Fuente	Peridotítica	682	18,7	7,3	8,26	100	377	n.d.	377	0,26	18,4	41,67	47	15	3,6	75,2	53	0,3	-5,8	-34,3	11,8
Fuencilla	A05	Fuente	Peridotítica	445	20,3	8,2	8,13	302	318	n.d.	318	0,17	6,5	n.d.	8	5	0,4	65,8	19	0,2	-6,1	-35,9	13,0
Fuente Amargosa	A06	Balneario	Peridotítica	362	17,4	10,4	7,20	1	69	66	135	0,17	38,7	0,73	3	35	5,5	26,7	19	n.d.	-6,2	-36,7	12,8
Fuente Amargosa	A07	Fuente	Peridotítica	1215	19,1	12,3	1,41	-310	n.d.	96	96	0,23	78,8	1,53	6	87	10,8	n.d.	51	0,6	-6,5	-41,1	10,7
Río Horcajos	A08	Manantial	Peridotítica	1112	15,9	12,3	3,11	-232	n.d.	88	88	0,2	55,6	1,42	n.d.	54	10,2	n.d.	55	0,6	-6,7	-40,4	13,3
Cañada de la Fuente	A09	Manantial	Carbonática	427	19,8	7,4	8,19	113	300	n.d.	300	0,4	4,8	2,62	6	3	0,5	36,4	55	0,2	-6,9	-40,4	15,1
Vilo	A10	Baños	Carbonática	1210	20,6	6,9	0,58	-268	204	n.d.	204	3,18	62,9	2,13	453	81	7,4	62,8	150	6,8	-8,8	-54,7	15,3
El Batán	A11	Manantial	Carbonática	332	14,6	6,8	8,36	96	207	n.d.	207	0,11	6,1	7,01	10	3	0,6	10,6	62	0,5	-7,5	-43,9	15,7
Las Majadas	A12	Baños	Carbonática	1241	18,3	6,9	1,92	-181	261	n.d.	261	2,76	98,4	0,71	384	92	2,9	72,1	136	12,1	-8,7	-54,0	15,4
El Pilarejo	A13	Fuente	Carbonática	406	18,0	7,0	8,50	76	250	n.d.	250	0,21	11,7	9,72	11	11	0,4	4,5	83	0,3	-6,8	-40,8	13,5
Río Salado	A14	Manantial	Evaporítica	14250	18,5	6,6	0,78	-25	315	n.d.	315	1,36	3865,0	26,09	2405	2834	23,3	211,7	886	14,3	-6,0	-37,0	10,5
Fuenciente	A15	Fuente	Carbonática	911	20,5	6,8	4,31	77	282	n.d.	282	0,29	156,9	6,49	29	102	2,1	25,2	91	1,5	-6,8	-40,3	13,7
Torrox	A16	Manantial	Carbonática	1382	22,4	6,8	2,62	21	302	n.d.	302	0,27	186,0	27,47	245	138	4,7	48,6	148	1,8	-6,5	-40,3	11,6
Ardales	A17	Fuente	Detrítica	2640	20,2	7,1	1,70	-336	385	n.d.	385	4,79	465,8	n.d.	453	507	27,8	59,4	99	10,5	-7,8	-46,2	16,1
Fuente Hedionda	A18	Baños	Peridotítica	790	19,5	10,8	5,88	-143	n.d.	43	43	0,1	157,2	n.d.	3	120	13,2	n.d.	23	0,3	-6,3	-37,8	12,6
Finca Hedionda	A19	Baños	Peridotítica	797	22,0	10,7	4,51	-160	n.d.	52	52	0,11	90,2	n.d.	3	93	10,8	n.d.	15	0,2	-6,1	-38,0	11,1
Tosquillas	A20	Baños	Detrítica	1683	16,8	6,9	6,86	112	365	n.d.	365	0,26	22,5	12,47	774	16	1,4	97,5	336	4,6	-6,7	-42,3	11,4
La Yedra	A21	Fuente	Carbonática	367	14,1	7,5	8,30	91	218	n.d.	218	0,14	7,1	11,29	17	4	0,6	16,5	62	n.d.	-7,1	-42,3	14,6
El Cano	A22	Sond. surg.	Detrítica	1723	20,9	7,1	0,61	-52	376	n.d.	376	0,35	222,9	n.d.	390	104	2,7	89,7	214	1,2	-5,0	-30,3	9,6
Fuente el Cabanil	A23	Manantial	Peridotítica	535	18,9	7,4	4,09	158	386	n.d.	386	0,07	11,3	3,41	8	7	0,3	88,8	11	0,2	-5,4	-29,4	14,0
Baños del Puerto	A24	Manantial	Peridotítica	632	21,1	11,1	0,14	-45	n.d.	42	42	0,07	69,3	n.d.	n.d.	51	6,0	n.d.	35	0,3	-6,0	-33,3	14,8
Carratraca	A25	Balneario	Carbonática	719	18,4	7,3	4,40	-213	379	n.d.	379	0,52	18,0	n.d.	101	12	2,3	52,0	98	2,0	-6,7	-38,6	14,6
Alberquillas	A26	Manantial	Carbonática	561	22,7	7,8	7,67	105	281	n.d.	281	0,25	18,2	4,09	47	12	1,5	35,4	75	0,9	-6,8	-39,1	14,9
Fuente Sana	A28	Fuente	Detrítica	363	16,8	8,1	7,14	180	164	n.d.	164	0,3	22,5	0,89	35	19	3,0	22,6	33	0,2	-6,9	-40,1	15,2
Los Morales	A29	Fuente	Carbonática	635	15,3	7,0	7,82	101	418	n.d.	418	0,17	16,8	1,06	21	14	5,9	39,0	88	0,3	-6,5	-35,8	16,0
Baños del Duque	A31	Baños	Peridotítica	518	17,5	11,3	0,32	-205	n.d.	39	39	0,08	34,5	n.d.	24	32	4,2	n.d.	33	0,2	-6,6	-34,1	19,0

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos, químicos e isotópicos de las aguas subterráneas minerales y termales consideradas en este trabajo. n.d. - no detectado

Atendiendo al tipo de litología asociada al punto de muestreo, las aguas subterráneas que drenan rocas carbonáticas presentan valor medio de $\text{pH} = 7,1 \pm 0,3$; $7,3 \pm 0,5$ en el caso de litologías detríticas y $9,9 \pm 2$ para las aguas muestreadas en afloramientos de rocas ultramáficas (Tabla 1 y Figura 2). Esta diferencia entre las poblaciones de datos y el conjunto litológico predominante es estadísticamente significativa (p-valor de 0,003).

Los datos promedios de Eh de las aguas se encuentran en el intervalo de 0 a -100 mV (potenciales negativos; Figura 2), aunque se identifican valores positivos y negativos a partes iguales. Esta información pone de manifiesto la variabilidad de condiciones redox en las

aguas muestreadas, reflejo de los diferentes procesos hidrogeoquímicos que afectan a las mismas. Por su parte, el rango de valores medidos de O₂ es 0,14-8,5 mg/L (Tabla 1), de modo que la mayoría de medidas realizadas en campo se sitúan por encima de 0 mg/L. Esto es indicativo de condiciones de saturación en oxígeno, y por ende de aguas relativamente bien oxigenadas asociadas a flujos de agua subterránea generalmente superficiales (en todos los grupos litológicos representados), muchas de ellas en equilibrio con el O₂ atmosférico. A partir del contenido iónico determinado en las muestras de agua se han definido hasta 11 facies hidroquímicas (Figura 3), atendiendo a los criterios de BACK (1966). De todas ellas, las más frecuentes son las de tipo bicarbonatada cálcica (21% de las muestras), representativas comúnmente de litologías de origen carbonático; bicarbonatadas magnésica (14%), características de las rocas ultramáficas (ANDREO et al., 1993); y clorurada sódica (17%), en el caso de litologías de tipo detrítica y evaporítica (aunque no en todas las muestras de agua).

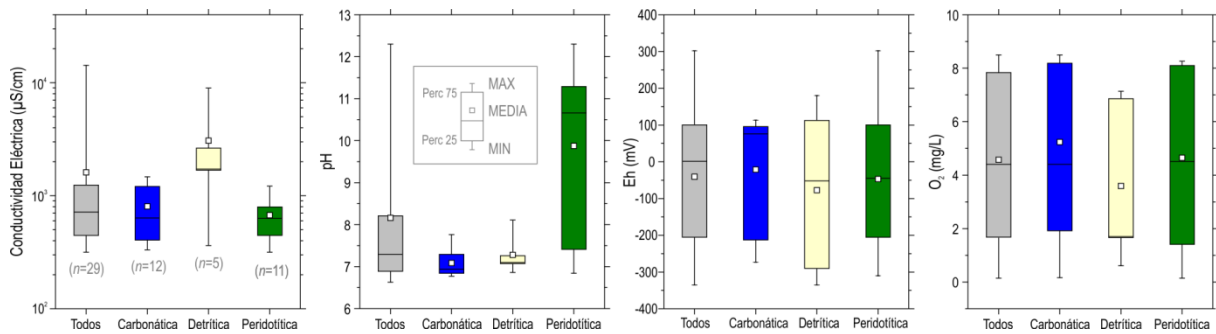


Figura 2. Diagramas de cajas y bigotes de los parámetros de campo CE, pH, Eh y O₂, clasificados por población de datos (todos) y grupo litológico. Nótese que las aguas subterráneas asociadas a terrenos evaporíticos no están representadas por disponer de una sola muestra

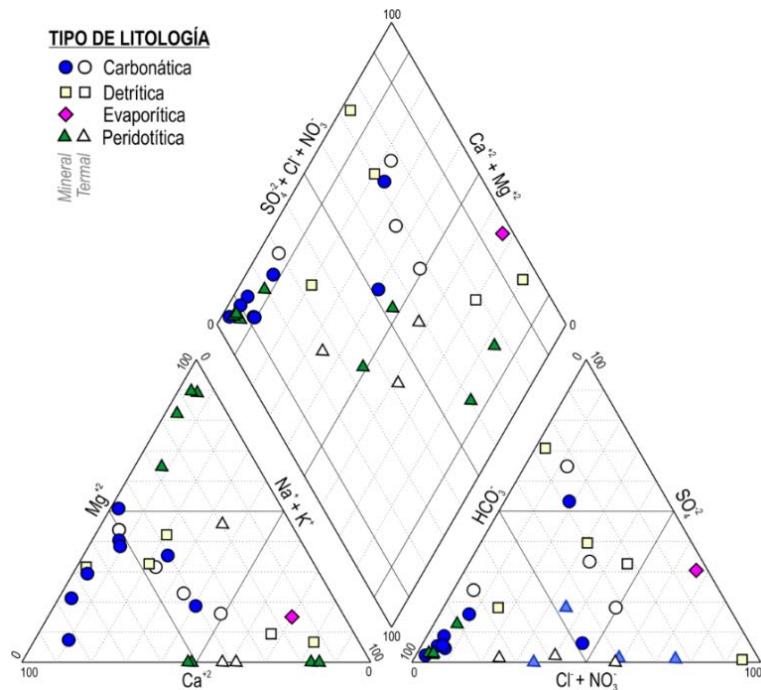


Figura 3. Diagrama de Piper con las muestras de agua subterránea clasificadas por tipología (mineral/termal) y grupo litológico asociado

Análisis de la temperatura del agua

El valor mínimo de temperatura del agua es 14,1 °C (manantial de La Yedra), mientras que el máximo es 22,7 °C (manantial de Alberquillas), con sendas medidas realizadas en litologías de origen carbonática (Tabla 1). De acuerdo con la clasificación térmica de SCHÖELLER (1962), el 14% de las surgencias es de tipo fría (con una temperatura media de $14,9 \pm 0,7$ °C), el 57% normal ($18,4 \pm 0,6$ °C) y el 28% de tipo termal ($20,6 \pm 0,7$ °C). Esta clasificación es estadísticamente consistente, según el test t de Student, con un p-valor de 0,002 para el par normal-termal, y un p-valor de 0,007 para el par normal-fría. Dicha clasificación debe tomarse con cautela, sobre todo en el caso de las aguas de tipo termal, debido a limitaciones asociadas a la toma puntual de medidas de temperatura y a la incertidumbre que conlleva el cálculo de temperatura media anual atmosférica a partir de estaciones termoclimáticas presumiblemente representativas.

Isótopos de la molécula del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$)

La composición isotópica de la mayoría de aguas minerales y termales (que define la Línea de Aguas Subterráneas; Figura 4) se sitúa entre las líneas meteóricas Global (CRAIG, 1961) y del Mediterráneo occidental (CELLE-JEANTON, 2001), y prácticamente reproduce la confeccionada a partir de las precipitaciones de la estación de Gibraltar (IAEA, 2017), para el período 1961-2009. Todo ello, pone de manifiesto no sólo el origen meteórico predominante de las aguas subterráneas analizadas, sino también la procedencia mixta, del Océano Atlántico y del sector más occidental del Mar Mediterráneo (preferentemente del primero), de los frentes nubosos que generan las precipitaciones sobre la provincia de Málaga. Los valores de exceso en deuterio, d , calculados (8-19 ‰; Tabla 1) son coherentes con la anterior hipótesis.

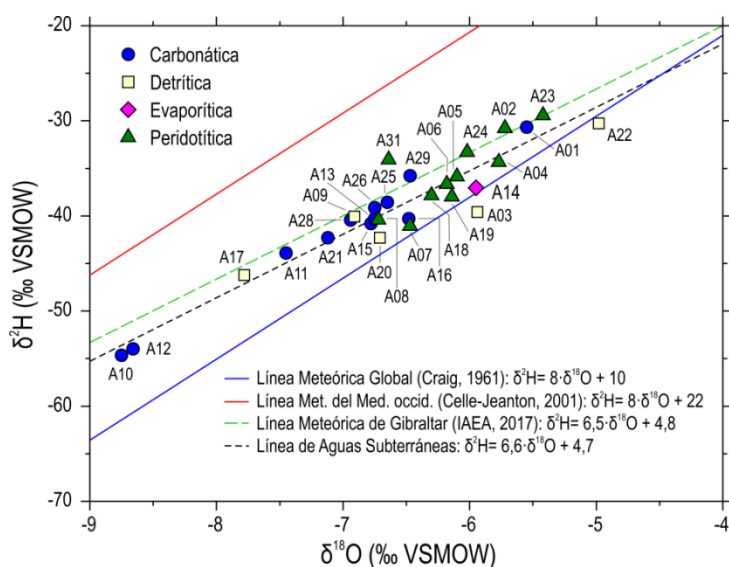


Figura 4. Relación $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ de las muestras de agua subterránea estudiadas, en función del grupo litológico predominante

La amplia dispersión de las muestras de agua recogidas, observada a lo largo del eje de abscisas (valores de $\delta^{18}\text{O}$, en Figura 4), es el resultado del efecto combinado altitud-latitud característico de cada punto de muestreo, dada su localización longitudinal y el rango de altitudes (2-710 m s.n.m.). Este efecto tiene más peso que el factor litológico, ya que las

agrupaciones realizadas no se ajustan a ningún patrón definido en cuanto a la composición isotópica de las aguas se refiere.

Análisis estadístico multivariante: asociación composicional de las aguas subterráneas

Se ha llevado a cabo un análisis de clasificación ascendente jerárquica o *cluster* con objeto de discriminar las principales características hidroquímicas de las aguas subterráneas objeto de estudio. Para ello, se han utilizado parámetros fisicoquímicos (CE, temperatura, pH, O₂ y Eh) y variables hidroquímicas (TAC e iones mayoritarios) de las muestras recogidas. El método de aglomeración utilizado fue el de Ward y la medida de asociación de objetos la distancia euclídea.

Los resultados obtenidos se han representado en el dendrograma de la Figura 5, en el que se distinguen cinco agrupaciones bien definidas (C1-C5, en Figura 5A). El grupo C1 incluye mayoritariamente muestras de aguas drenadas por materiales carbonáticos que presentan cierto termalismo (manantial de la Hedionda, Baños de Vilo y manantial de Torrox) y muestras de agua asociadas a litologías detríticas (fuente de las Tosquillas y sondeo surgente de El Cano) (Figura 5B). Este tipo de aguas presentan una facies hidroquímica sulfatada-bicarbonatada cálcica, mineralización intermedia-baja, anomalías térmicas positivas, valores de Eh negativos y de O₂ relativamente bajos (condiciones relativamente reductoras).

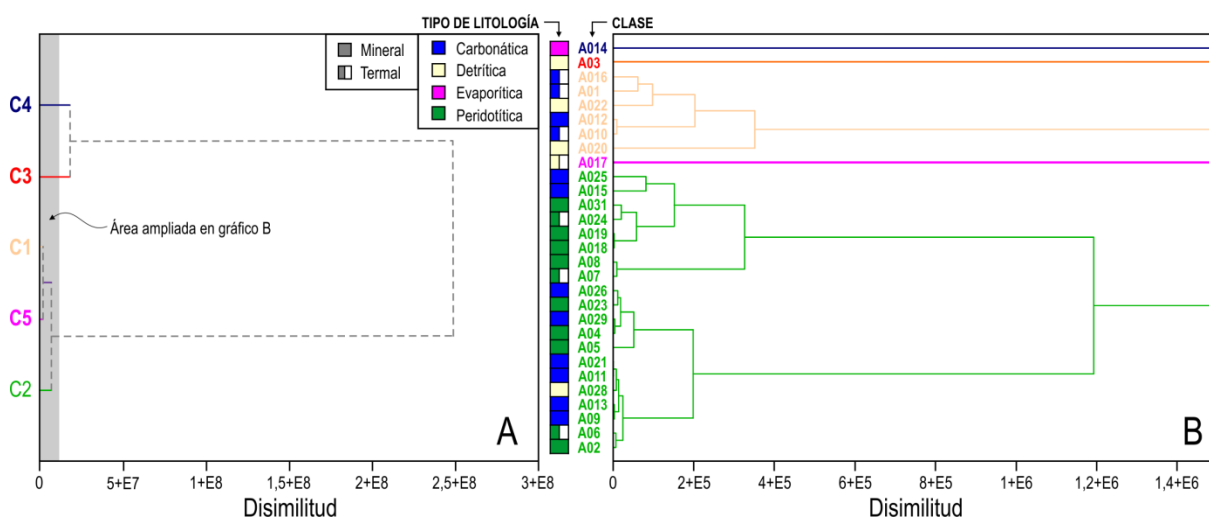


Figura 5. Dendrograma obtenido a partir del análisis *cluster* realizado con las muestras de agua subterráneas. Nótese la triple clasificación de las muestras, por clase y tipos de punto y litología, entre los gráficos A (asociación de clases) y B (agrupación de detalle a niveles bajos de disimilitud entre objetos)

Las aguas agrupadas en C1 comparten características químicas con la muestra que representa el grupo C5 (Baños de Ardales; Figura 5B), la cual es también termal, con facies clorurada-sulfatada sódica y ligeramente más mineralizada y enriquecida en Na⁺, K⁺, Sr⁺² y Cl⁻ con respecto al primer grupo (Tabla 1). El *cluster* C2 (Figura 5B), relacionado a su vez con los grupos C1 y C5, contiene la totalidad de las aguas subterráneas que drenan rocas peridotíticas y el resto de aguas de origen carbonático (además del agua de Fuente Sana, que dreña materiales detríticos). Sus características principales son: facies hidroquímicas bicarbonatadas magnésicas y cálcicas, además de cloruradas sódicas, mineralización débil, temperatura del agua normal y valores elevados de pH (> 8) y O₂ (~ 6 mg/L), y positivos de Eh (Tabla 1). No obstante, este grupo (C2), con muestras asociadas a grupos litológicos

diferentes (peridotítico, carbonático y detrítico), incluso algunas de ellas presentan cierto termalismo -como los manantiales de Fuente Amargosa y de los Baños del Puerto, debería ser objeto de reclasificación estadística en varios subgrupos, atendiendo no solo a la información hidroquímica, sino también a los aspectos genéticos y al contexto hidrogeológico de dichos puntos de agua.

Los tres grupos anteriormente descritos (C1, C2 y C5) se asocian estadísticamente con los *clusters* C3 y C4, representados por las aguas del sondeo surgente de la Huerta de San José (litología detrítica) y del manantial del Río Salado (evaporítica), respectivamente, con composiciones físico-químicas distintivas (Tabla 1 y Figura 5B). Estas son: facies hidroquímica clorurada sódica (con concentraciones elevadas de prácticamente todos los iones mayoritarios), alta mineralización, temperatura fría-normal, poco oxigenadas y con valores de Eh negativos.

La jerarquización estadística que resulta del análisis *cluster* permite asociar, salvo excepciones puntuales, la información hidroquímica obtenida con la clasificación hidrogeológica propuesta según el tipo predominante de litología. Así, las cinco agrupaciones muestrales representan el drenaje de rocas carbonáticas y formaciones detríticas con anomalías térmicas (C1, en mayor medida, y C5); de materiales peridotíticos y carbonáticos, con aguas subterráneas poco mineralizadas, valores de pH intermedios-altos y marcadamente oxigenadas (C2); y de litologías detríticas y evaporíticas, con aguas de elevada salinidad (C3 y C4). A partir de la anterior interpretación, las aguas incluidas en el grupo C2 podrían corresponder a flujos subterráneos de corto recorrido y/o superficiales (en equilibrio con la atmósfera) y menor interacción agua-roca (relativo al resto). Por su parte, las aguas agrupadas en C1 y C5, corresponderían al drenaje de sistemas de flujo profundo y con tiempos de residencia prolongados en el subsuelo. Los tipos de agua que forman los *clusters* C3 y C4 se ajustarían a composiciones químicas muy evolucionadas, en parte favorecido por la alta solubilidad de los minerales (p.e. halita y yeso) que constituyen el sustrato por el que fluye el agua. Dicha evolución hidrogeoquímica podría producirse independientemente del recorrido de la línea de flujo que moviliza el agua subterránea.

CONCLUSIONES

El análisis preliminar llevado a cabo con los datos hidroquímicos e isotópicos obtenidos del muestreo de aguas subterráneas minerales y termales de la provincia de Málaga ha permitido precisar su origen y la relación entre la composición química de las aguas y las formaciones geológicas que drenan. Las aguas analizadas tienen su origen en la precipitación caída sobre dichas litologías, con una doble procedencia, del Océano Atlántico (en mayor medida) y del sector más occidental del Mar Mediterráneo.

Las aguas minerales que drenan materiales peridotíticos, y buena parte de afloramientos carbonáticos considerados, reflejan flujos subterráneos probablemente algo más superficiales y de corto recorrido. No obstante, existen excepciones a este hipotético esquema de flujo, como son algunos manantiales asociados a rocas peridotíticas cuyas aguas presentan anomalías térmicas (Fuente Amargosa y Baños del Puerto). Aquellas drenadas por manantiales asociados a litologías carbonáticas con cierto termalismo representan el drenaje de líneas de flujo más profundas y con mayor tiempo de residencia (y/o interacción agua-roca) en el sistema acuífero. Las aguas altamente mineralizadas (salinas) y muy evolucionadas

desde el punto de vista hidrogeoquímico, son el resultado de un alto grado de interacción con un sustrato rocoso evaporítico (con minerales de elevada solubilidad).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREO, B.; BENAVENTE, J.; CARRASCO, F. (1993). *The hydrochemistry of an ultramafic massif in Southern Spain (Sierra Alpujata, Costa del Sol area)*. XXIV Congress of the International Association of Hydrogeologists. IAH Memories, 24 (1): 388-394.
- ANDREO, B.; GERVILLA, F. (2007). *Las peridotitas de Ronda*. En: Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga. (Diputación Provincial de Málaga, Instituto Geológico Minero de España, y Grupo de Hidrogeología de la Univeridad de Málaga, Edits.). Vol. 2, 211-216.
- BAEZA, J.; CEREZUELA, M.; CUCHÍ, J.; CURÁN, J.; FERNÁNDEZ, J.; LÓPEZ, J. Y RUBIO, J. (2001). *Las Aguas Minerales en España*. Madrid: IGME.
- BACK, W. (1966). *Hydrochemical facies and groundwater flow patterns in northern part of atlantic costal plain*. Geological survey professional paper (498-A).
- CELLE-JEANTON, H., TRAVY, Y., BLAVOUX, B. (2001). *Isotopic typology of the precipitation in the Western Mediterranean region at three different time scales*. Geophysical Research Letters 28, 1215–1218.
- CORRAL, M.; LOPÉZ, J.; Y ONTIVEROS, C. (2007). *Aspectos genéticos de las aguas minerales y termales españolas. Relación entre sus características fisicoquímicas y la geología del entorno*. Madrid: IGME.
- CRAIG, H. (1961). *Isotopic variations in meteoric waters*. Science (133), 1702-1703.
- CRUZ-SANJULIÁN, J. Y GARCÍA-ROSSELL, L. (1975). *Termalismo en España Meridional*. Boletín Geológico y Minero, 179-186.
- DPM-IGME-GHUMA. (2007). *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. (Dip. Prov. de Málaga, Inst.. Geológico Minero de España, y Grupo de Hidrogeología de la Univeridad de Málaga, Edits.) Málaga.
- IAEA (2017). *IAEA-Wiser*. Obtenido de <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>. Descarga: junio de 2017.
- IGME (1991a). *Evaluación del Estado Actual de las Aguas Minerales en la Comunidad Autónoma de Andalucía*.
- IGME (1991b). *Evaluación del Estado Actual de las Aguas Minerales en la Comunidad Autónoma de Andalucía. Estudio de Detalle de la Provincia de Málaga, Tomo IV*.
- MARTÍN-ALGARRA, A. (1997). *Evolución geológica alpina del contacto entre las zonas internas y las externas de la cordillera bética*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 1171 páginas.
- MÉRIDA, M.; Y CANTARERO, F. (2008). *Relieve y Fisiografía de la Provincia de Málaga*. En DPM-IGME-GHUMA, *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga* (págs. 21-28). Diputación Provincial de Málaga; Instituto Geológico y Minero de España; Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga.
- SENCIALES, J. (2008). *El Clima en la Provincia de Málaga*. En DPM-IGME-GHUMA, *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga* (págs. 50-58). Diputación Provincial de Málaga; Instituto Geológico y Minero de España; Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga.
- SCHÖELLER, H (1962). *Les Eaux Souterraines Hidrogéologie Dynamique et Chimique*. Masson, Paris.
- VERA, J.A. -ED.- (2004). *Geología de España*. Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. 890 páginas.