

## Caracterización geoquímica del proceso de mezcla de aguas termales y no termales en los manantiales de Jaraba (Aragón, España)

### *Geochemical characterisation of the thermal and no thermal waters mixing process in the Jaraba springs (Aragón, Spain)*

M. Blasco<sup>1</sup>, L.F. Auqué<sup>1</sup> y M.J. Gimeno<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009, Zaragoza, España. monicabc@unizar.es; lauque@unizar.es; mjgimeno@unizar.es

**Resumen:** En este trabajo se presenta el estudio realizado sobre el proceso de mezcla de aguas que se produce en el sistema termal de Jaraba (Aragón, España). Los diferentes manantiales de este sistema muestran una variación espacial en su composición y temperatura de surgencia. El uso de gráficos de correlación binaria entre cloruros, temperatura y elementos de comportamiento conservativo permite justificar esta variabilidad por la actuación de un proceso de mezcla de las aguas termales con otras más frías y superficiales. Se ha identificado un conjunto de surgencias especialmente afectado por este proceso (con proporciones de mezcla en torno a un 60% de polo termal) y la comparación con estudios previos sugiere que esta situación se mantiene de forma relativamente constante en el tiempo. Componentes como alcalinidad, sílice, magnesio y calcio muestran un comportamiento reactivo durante la mezcla y están afectados por procesos adicionales de reequilibrio que, actualmente, están siendo investigados mediante el empleo de técnicas de modelización geoquímica.

**Palabras clave:** mezcla de aguas, aguas termales, sistema termal, correlación binaria.

**Abstract:** *The water mixing process in the Jaraba thermal system (Aragón, Spain) has been studied here. A spatial variation in the composition and spring temperature exists among the different considered springs. The use of ion-ion plots with some parameters such as temperature and some conservative elements versus chloride has allowed determining that a mixing process is taking place between the thermal waters and others more superficial and colder; this process justifies the observed variability. Some springs are specially affected by this process (with mixing proportions around 60 % of the thermal pole) and the comparison with previous studies suggests that this situation is relatively constant in time. Elements such as alkalinity, silica, magnesium or calcium, display a reactive behaviour during mixing and are affected by additional re-equilibrium processes, which are being studied in parallel by geochemical modelling techniques.*

**Key words:** *water mixing, thermal water, thermal system, ion-ion plots.*

## INTRODUCCIÓN

Las surgencias de Jaraba, junto con las de Alhama de Aragón, constituyen una de las principales zonas termales de Aragón y una de las de mayor aprovechamiento tanto en balnearios como en plantas embotelladoras. Poseen un importante caudal, en torno a 500 L/s, y alcanzan temperaturas de hasta 33 °C, siendo las más altas encontradas en surgencias termales de la Cordillera Ibérica en Aragón (Sánchez et al., 2000; Pinuaga et al., 2004).

Los manantiales de Jaraba están constituidos por un gran número de surgencias (hasta 14 referenciadas) con aguas de afinidad bicarbonatada cálcico-magnésica (Auqué et al., 2009). Las aguas de las diferentes surgencias muestran una cierta variabilidad composicional asociada a una significativa variación en la temperatura de surgencia. La hipótesis más probable

para la justificación de este hecho es la existencia de un proceso de mezcla entre dos polos, uno termal y otro más frío, como ya indicaron Tena et al. (1995). Los procesos de mezcla entre aguas termales y no termales son muy frecuentes en las zonas terminales de diferentes tipos de sistemas geotermales y han sido estudiados con muy diversos enfoques (p. ej. Skalbeck et al., 2002 o Asta et al., 2010).

En este trabajo se estudiará y caracterizará el proceso de mezcla de aguas en los manantiales de Jaraba y se comparará con las características que presentaba dicho proceso hace más de 20 años (Tena et al. 1995).

## GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

Los manantiales de Jaraba se sitúan en Aragón, en el suroeste de la provincia de Zaragoza (NE de España;

Fig. 1).

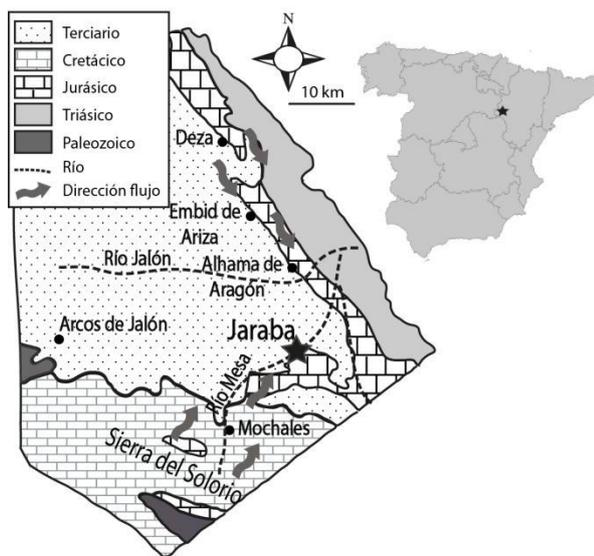


FIGURA 1. Localización de la zona de estudio.

Geológicamente, se encuentran en la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica, en límite con la Cuenca terciaria de Almazán. En la zona aparecen materiales que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cuaternario siguiendo una directriz estructural principal NO-SE (IGME, 1982; Pinuaga et al., 2004).

Los principales acuíferos que se encuentran en la zona son el del Solorio, alojado en los carbonatos jurásicos, y el de Alhama, en los cretácicos. La recarga de los mismos tiene lugar en los afloramientos de estos materiales en la Sierra del Solorio (situada al SO de Jaraba), en el primer caso, y en la zona de Deza, en el segundo. No existe acuerdo respecto al funcionamiento hidrológico de la zona, aunque los estudios más recientes señalan que ambos acuíferos estarían conectados y la circulación de las aguas seguiría una línea de flujo SO-NE en el del Solorio y NO-SE en el de Alhama (Fig. 1; Sanz y Yelamos, 1998; Sánchez et al., 2004). No obstante, las surgencias de estas aguas termales están siempre asociadas a los materiales carbonatados del Cretácico (Sánchez et al., 2000).

## METODOLOGÍA

En 2009 se recogieron muestras en seis surgencias diferentes (Tabla I) con el objetivo de comparar el estado del sistema con la situación correspondiente al

muestreo realizado en 1995, que consta de nueve muestras cuyos datos se pueden encontrar en Tena et al. (1995). La metodología de muestreo y análisis seguida en ambos ha sido similar y aparece detallada en Auqué et al. (2009).

El estudio del proceso de mezcla se realizará a partir de representaciones binarias entre elementos en solución con comportamiento conservativo, seleccionando como trazador del proceso de mezcla un elemento al que referir el comportamiento del resto. El ión típicamente usado como elemento conservativo es el  $\text{Cl}^-$ , por lo que será utilizado como trazador del proceso en este trabajo.

## RESULTADOS

Las aguas de las diferentes surgencias analizadas presentan diferencias de temperatura de 11 °C, coincidiendo además con variaciones significativas en las concentraciones de algunos elementos (Tabla I). Si se considera el muestreo de 1995 la situación encontrada es la misma.

En la Fig. 2 se observa cómo, en los dos muestreos, la concentración de cloro muestra una evolución lineal con la temperatura, con una buena correlación positiva ( $R = 0.93$ , en el muestreo de 2009 y  $R = 0.96$ , en el de 1995), lo que es representativo de un proceso de mezcla que, además, se mantiene en el tiempo. También se puede ver en la Fig. 2 que las muestras quedan agrupadas en tres conjuntos diferentes: 1) uno, con una temperatura de unos 21 °C y concentraciones de cloro próximas a 1 mmol/L, que constituiría el polo frío de la mezcla; 2) otro, con temperaturas en torno a los 30 °C y concentraciones de cloro próximas a 1.5 mmol/L en las muestras de 2009 y 1.7 mmol/L en las de 1995, que correspondería al polo termal; y 3) un último grupo constituido por el resto de muestras, con temperaturas próximas a 26 – 28 °C y concentraciones de cloro en torno a 1.3 mmol/L, que serían las resultantes del proceso de mezcla.

Otra observación interesante en la Fig. 2 es que las concentraciones de cloro en el polo termal parecen haber disminuido ligeramente con el tiempo y, como consecuencia, se observa también una disminución de la concentración de cloro en las aguas mezcladas.

	pH	Temp	Cond	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{F}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Sr}^{2+}$	Si
<b>J1</b>	7.48	31.2	991	5.84	1.58	1.89	0.0126	2.37	1.68	1.84	0.075	0.0121	0.163
<b>J2</b>	7.24	20.6	632	6.43	0.93	1.03	0.0068	2.27	1.25	1.13	0.071	0.0061	0.147
<b>J3</b>	7.18	28.3	898	6.11	1.22	1.65	0.0111	2.23	1.60	1.49	0.052	0.0102	0.163
<b>J4</b>	7.18	27.5	950	6.01	1.37	1.69	0.0121	2.31	1.59	1.73	0.059	0.0111	0.157
<b>J5</b>	7.01	31.4	952	6.50	1.41	1.94	0.0126	2.34	1.66	1.77	0.059	0.0119	0.163
<b>J6</b>	7.07	31.6	960	6.10	1.54	1.95	0.0126	2.40	1.69	1.81	0.066	0.0121	0.163

TABLA I. Resultados analíticos de las muestras de agua de las surgencias de Jaraba. Los contenidos de los diferentes elementos están expresados en mmol/L, la temperatura (Temp) en °C y la conductividad eléctrica a 25 °C (Cond) en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

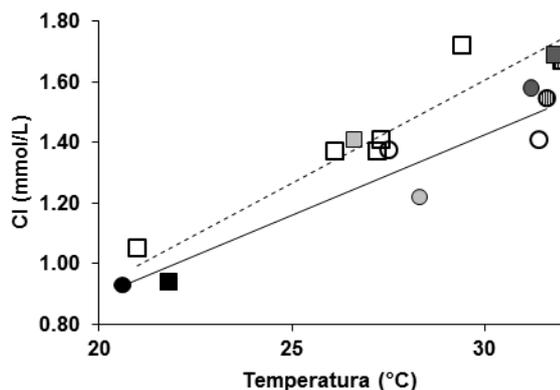


FIGURA 2. Correlación de la temperatura de surgencia frente a la concentración de cloro. Los círculos representan las muestras de 2009 y los cuadrados las de 1995. Las líneas continua y discontinua representan las líneas de tendencia de uno y otro, respectivamente. Aquellos puntos que representan la misma surgencia en ambos muestreos están rellenos con la misma trama mientras que los que están en blanco pertenecen a otras surgencias.

Los diagramas binarios de cloro frente a sodio y sulfato (Fig. 3a y 3b, respectivamente) presentan una buena correlación positiva (con  $R > 0.94$  en todos los casos). Si se consideran las concentraciones de los elementos traza con concentraciones significativas en las aguas, como el estroncio (Fig. 3c) y el flúor (no mostrado en la figura), también muestran una buena correlación positiva en ambos casos. Finalmente, la conductividad eléctrica de estas aguas muestra igualmente una buena correlación positiva con el contenido de cloro, con  $R = 0.94$  en 2009 y  $0.97$  en 1995 (Fig. 3d).

Otros componentes de las aguas (como alcalinidad,

magnesio, sílice, calcio, potasio) presentan un comportamiento reactivo que se expresa en una peor correlación con el cloro. Estos elementos también presentan notables cambios en cuanto a sus concentraciones entre los dos muestreos considerados. La alcalinidad es el único componente que muestra una correlación negativa, bastante buena en 1995 ( $R = 0.86$ ) y algo menor en 2009 ( $R = 0.58$ ) (Fig. 3e). Calcio, magnesio y sílice también muestran variaciones en su correlación con el cloro y una mayor dispersión de los datos (p. ej. Fig. 3f). En el caso de 2009, las correlaciones son muy buenas ( $R: 0.82, 0.93$  y  $0.83$ , respectivamente) mientras que en 1995, son considerablemente menores, de  $0.32$  para el calcio y, en torno a  $0.7$  para el magnesio y la sílice. Finalmente, el potasio no presenta correlación con el cloro en el muestreo de 2009 mientras que en 1995 mostraba una correlación positiva.

El pH muestra una gran dispersión de los datos en ambos muestreos, sin una relación con el cloro ni con la temperatura.

Las correlaciones entre la temperatura y los elementos caracterizados como de carácter conservativo (sulfato, sodio, estroncio, flúor o conductividad), presentan también coeficientes de correlación de  $0.9$  o superiores.

## DISCUSIÓN

Las pautas de correlación binaria entre los elementos conservativos y el cloro (trazador del proceso de mezcla) son coherentes con el proceso de mezcla de

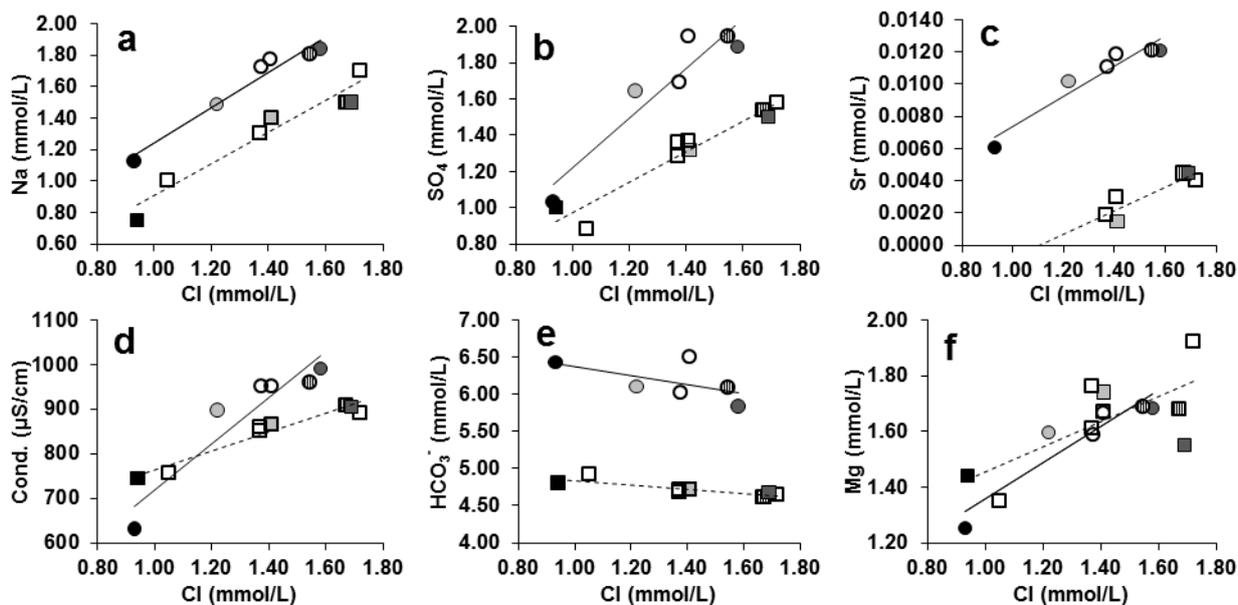


FIGURA 3. Correlaciones binarias de algunos componentes y la conductividad de las aguas de Jaraba frente al cloro, utilizado como trazador del proceso de mezcla. Los círculos representan las muestras de 2009 y los cuadrados las de 1995. Las líneas continua y discontinua representan las líneas de tendencia de uno y otro, respectivamente. Aquellos puntos que representan la misma surgencia en ambos muestreos están rellenos con la misma trama y los que están en blanco pertenecen a otras surgencias.

un polo termal y otro frío, propuesto para estas aguas. La evolución lineal con la temperatura de los diferentes componentes con comportamiento conservativo sugiere que la mezcla se produce en condiciones superficiales y posteriormente al posible enfriamiento conductivo de las aguas termales durante su ascenso. Una excepción a este hecho la presenta una de las muestras del polo termal perteneciente al muestreo de 1995. Dicha muestra presenta una temperatura algo menor (29.4 °C) que el resto de muestras termales aunque la concentración de los diferentes elementos conservativos es similar, lo que sugiere que su menor temperatura se debe a un enfriamiento conductivo de las aguas y no a un enfriamiento por mezcla con aguas frías.

El proceso de mezcla en este sistema se caracteriza por una pequeña variabilidad en las proporciones de los polos termal y frío que parece mantenerse en el tiempo. Las aguas resultantes de la mezcla (grupo 3) son resultado de una contribución aproximada del 60-65 % del polo termal en 2009 y 55-60 % en 1995 (porcentajes calculados según las ecuaciones propuestas en Faure, 1998, pp. 328-329).

El comportamiento de otros componentes disueltos (potasio, alcalinidad, sílice, magnesio, calcio) muestra pautas claramente no lineales en los dos muestreos estudiados. Este hecho sugiere la participación en el control de estos elementos de procesos adicionales (disolución/precipitación, intercambio catiónico, etc.) durante el proceso de mezcla. El caso del potasio es algo distinto puesto que al encontrarse en concentraciones muy bajas y con poca variación entre las diferentes muestras (0.02 mmol/L), sus valores podrían estar afectados por incertidumbres analíticas que no permitan apreciar el contraste entre los diferentes grupos de aguas.

Como es esperable el pH no se comporta de forma conservativa y su variación estará controlada por otros procesos secundarios (p. ej. pérdida de CO<sub>2</sub>) y no únicamente por el proceso de mezcla.

## CONCLUSIONES

La caracterización del proceso de mezcla entre las aguas termales del sistema de Jaraba, y aguas más superficiales y frías, se ha realizado a partir del estudio de los elementos conservativos. Las surgencias afectadas muestran una proporción de mezcla del polo termal en torno al 60% que ha permanecido relativamente constante a lo largo del tiempo.

Finalmente, algunos componentes de las aguas, como la alcalinidad, la sílice, el magnesio o el calcio, presentan comportamientos no lineales, posiblemente debidos a procesos de reequilibrio. Por tanto, para la

caracterización del sistema geotermal de Jaraba será necesario completar el estudio presentado aquí con otros de modelización geoquímica que contemplen la actuación adicional de procesos heterogéneos.

## AGRADECIMIENTOS

Mónica Blasco ha realizado este estudio gracias a una ayuda de Formación del Profesorado Universitario (ref. FPU14/01523) del MECED. El trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos PSE-120000-2007-6 y PSE-120000-2008-6, y forma parte de las actividades del GMG (Universidad de Zaragoza).

## REFERENCIAS

- Asta, M.P., Gimeno, M.J., Auqué, L.F., Gómez, J., Acero, P. y Lapuente, P. (2010): Secondary processes determining the pH of alkaline waters in crystalline rock systems. *Chemical Geology*, 1-2: 41-52.
- Auqué, L.F., Acero, P., Gimeno, M.J., Gómez, J.B. y Asta, M.P. (2009): Hydrogeochemical modeling of a thermal system and lessons learned for CO<sub>2</sub> geologic storage. *Chemical Geology*, 268: 324-336.
- Faure, G. (1998): *Principles and applications of geochemistry* (2ª ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River (Nueva Jersey). 600p.
- IGME, (1982): *Estudio de las manifestaciones termales de Extremadura, Salamanca, Aragón y Rioja, orientados a su posible explotación como recursos geotérmicos*. IGME, Madrid. 320 p.
- Pinuaga, J.I., Garrido, E. y Ramírez, A. (2004): Geología, Hidrogeología y protección de los Balnearios de Jaraba (Zaragoza). *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia*, 70: 597-610.
- Sánchez, J.A., Coloma, P., Pérez, A. y De Leiva, A. (2000): Evaluación del flujo geotérmico en manantiales de Aragón. *Geogaceta*, 27: 155-158.
- Sánchez, J.A., Coloma, P. y Pérez, A. (2004): Evaluation of geothermal flow at the springs in Aragón (Spain) and its relation to geologic structure. *Hydrogeology Journal*, 12: 601-609.
- Sanz, E. y Yelamos, J.G. (1998): Methodology for the study of unexploited aquifers with thermal waters: application to the aquifer of the Alhama de Aragon Hot Spring. *Ground Water*, 6: 913-923.
- Skalbeck, J.D., Shevenell, L. y Widmer, M. C. (2002): Mixing of thermal and non-thermal waters in the Steamboat Hills area, Nevada, USA. *Geothermics*, 31: 69-90.
- Tena, J.M., Auqué, L.F., Gimeno, M.J. y Mandado, J.M. (1995): *Evolución Fisicoquímica y geotermometría del Sistema Hidrotermal de Alhama-Jaraba (Provincia de Zaragoza)*. Institución Fernando el Católico, Zaragoza, 178 p.