

Análisis preliminar de los factores condicionantes de la temperatura de los manantiales kársticos de Andalucía

Preliminary analysis of the determining factors of karst springs temperature in Andalusia

Francisco Moral Martos¹ y José Luis Yanes Conde¹

¹ Universidad Pablo de Olavide, Ctra. de Utrera, km 1. 41013-Sevilla. fmormar@upo.es, jlyancon@upo.es

RESUMEN

La temperatura del agua de 40 manantiales que drenan los macizos kársticos más importantes del territorio andaluz está comprendida entre 9,8 y 27,5 °C; no obstante, el 75 % del caudal drenado presenta de 12 a 18 °C de temperatura. La temperatura del agua de los manantiales es similar a la temperatura media ambiental (gradiente térmico de -0,49 °C/100 m) en el punto de surgencia, aunque con pequeñas diferencias, generalmente en el rango de ± 3 °C. Se observa que manantiales situados a mayor cota presentan aguas más frías que la media ambiental mientras que en los manantiales que se encuentran a cotas bajas el agua es relativamente más cálida. Estas variaciones estarían relacionadas con el control que ejercen diferentes variables como la geología, el clima, el grado de karstificación de los materiales y la tasa de recarga sobre la temperatura del agua subterránea. Asimismo, se ha establecido un balance térmico preliminar, que considera las principales fuentes de calor del agua y pone de relieve la importancia de la circulación de aire para el transporte de calor en la zona vadosa.

Palabras clave: Hidrotermia, manantiales kársticos, balance térmico

Geogaceta, 70 (2021), 39-42
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

ABSTRACT

Water temperature in 40 springs that drain the most important karst massifs in Andalusia is between 9.8 and 27.5 °C; nevertheless, 75% of flow drained by these aquifers has a temperature from 12 to 18 °C. Water temperature is similar to the mean environmental temperature (lapse rate of -0.49 °C/100m), although there are small differences, often in the range of ± 3 °C. It is observed that springs located at higher elevations have colder waters than the environmental average, while springs that are at lower elevations, have waters relatively warmer. These variations would be related to the control exerted by different variables, such as geology, climate, the degree of karstification of materials and the rate of recharge, on the temperature of groundwater. Likewise, a preliminary thermal budget has been established, which considers the main sources of heat in the water and highlights the importance of air flow in heat transport in the vadose zone.

Key-words: Water temperature, karstic springs, thermal budget

Fecha de recepción: 26/11/2020
Fecha de revisión: 23/04/2021
Fecha de aceptación: 28/05/2021

Introducción

Diversos autores subrayan el gran potencial del uso de calor transportado por las aguas subterráneas como trazador del flujo y la posibilidad de utilizar la temperatura como sustituto o complemento de las medidas de nivel de agua en los estudios hidrodinámicos (Anderson, 2005).

El subsuelo en las áreas permeables puede dividirse en una zona somera, de circulación preferente del agua y del aire, y una zona geotérmica (Anderson, 2005). En las regiones templadas, el flujo de agua en las formaciones acuíferas generalmente es suficiente para evacuar por completo el flujo de calor geotérmico desde la base de la zona saturada hacia los manantiales (Badino, 2010; Brookfield *et al.*, 2017). En este caso, la temperatura del medio subterráneo somero, en particular de la zona vadosa, estaría determinada por la temperatura del agua de infiltración, por la temperatura media

del aire exterior y por la transformación de la energía potencial del agua en calor (Luetscher y Jeannin, 2004; Manga y Kirchner, 2004; Badino, 2010). Todos estos condicionantes explican que la temperatura media del agua subterránea, con variaciones estacionales muy atenuadas, sea similar a la temperatura media del aire exterior. En la zona geotérmica las temperaturas están fundamentalmente determinadas por el flujo geotérmico (Anderson, 2005).

Los objetivos principales del presente trabajo han sido describir y comparar las características térmicas de 40 manantiales kársticos representativos de Andalucía y determinar el control que ejercen diferentes variables como la climatología, la geomorfología kárstica, la geología o el funcionamiento hidrodinámico de los acuíferos, en la temperatura del agua subterránea. Por otra parte, a modo de ejemplo, se ha llevado a cabo un balance térmico preliminar de las aguas del Nacimiento del Castril.

Para alcanzar los objetivos propuestos se ha llevado a cabo la medición "in situ" de la temperatura del agua en los 40 manantiales seleccionados (Fig. 1). Estas medidas se han realizado entre los meses de junio y julio de 2020 con una sonda multiparamétrica Hach HQ40d.

Zona de estudio

Desde un punto de vista geológico, el territorio andaluz puede dividirse en dos grandes unidades morfoestructurales: el Macizo Ibérico, correspondiente con Sierra Morena, al norte; y la Cordillera Bética y sus cuencas postorogénicas, al este y al sur. En estas unidades, la presencia de materiales carbonatados karstificables ha dado lugar a numerosos acuíferos kársticos que ocupan unos 7000 km² y contienen unos recursos hídricos renovables de más de 2000 hm³/año (Benavente *et al.*, 1986).

En el Macizo Ibérico, la presencia de

materiales carbonatados karstificables es escasa, siendo los más representativos las dolomías y calizas marmorizadas del Cámbrico inferior, que alcanzan una mayor extensión en la Sierra de Aracena y Sierra Morena de Sevilla. Por el contrario, las Zonas Externas de la Cordillera Bética presentan extensos afloramientos de carbonatos, siendo los más representativos las calizas y dolomías del Jurásico y Cretácico. En el dominio Prebético alcanzan su máximo exponente en las Sierras de Cazorla, Segura y Castril. En el caso del dominio Subbético estos macizos carbonatados se encuentran bien individualizados, como sucede en varias sierras de Jaén, de Cádiz o en Sierra Gorda. En las Zonas Internas de la Cordillera Bética, el Complejo Alpujarride es la formación karstificable de mayor importancia, y está compuesto por calizas y dolomías marmorizadas del Triás medio-superior. Los relieves carbonatados más importantes en esta unidad están representados por las sierras Almijara y Tejada, de Gádor, de Lújar y las sierras de Baza y los Filabres.

Estos acuíferos son drenados por surgencias que aparecen en un rango de cotas que abarca desde los 110 m s.n.m. hasta los 1330 m s.n.m. Los manantiales asociados a los carbonatos de las Zonas Externas, especialmente los que se encuentran en el dominio Prebético, surgen a mayor cota que los situados en el dominio Alpujarride, que rara vez se hallan a más de 1000 m s.n.m. Asimismo, la altitud media de las áreas de recarga estimadas para los manantiales, en la mayoría de los casos es superior a los 1000 m s.n.m., situándose en el entorno de los 1500 m s.n.m. en el dominio Prebético.

A partir de los datos de temperatura media anual del periodo 1961-2003 en 39 estaciones climáticas situadas a altitudes comprendidas entre 0 y 1340 m s.n.m. (MAGRAMA, 2013), se ha establecido un gradiente térmico altitudinal de $-0,49\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (Fig. 2A). De esta manera, la temperatura media entre los 100 y 2000 m de altitud, rango en el que se sitúan la mayor parte de los afloramientos de carbonatos, estaría comprendida entre $18\text{ y }8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Asimismo, la cuantía de las precipitaciones se relaciona principalmente con la altitud y con la orientación del relieve respecto a los vientos del oeste. Así, en Sierra Morena y las Zonas Externas de la Cordillera Bética suelen registrarse unas precipitaciones medias de más de 700 mm/año, e incluso más de 1000 mm/año

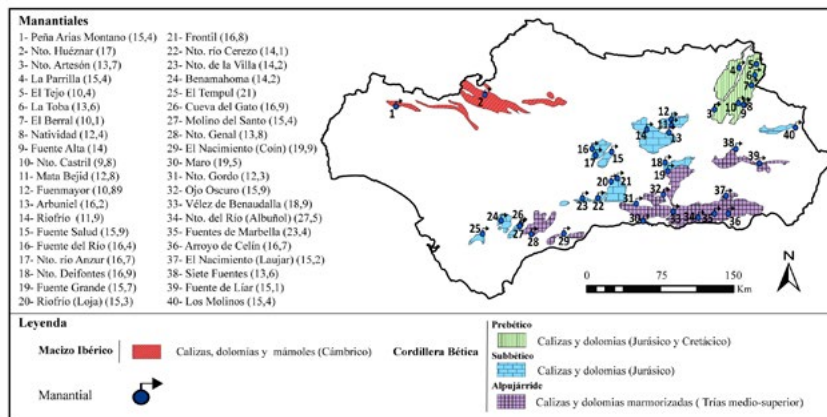


Fig. 1. Localización de los manantiales kársticos en los que se ha efectuado la medición de la temperatura del agua (entre paréntesis, en la leyenda). Se representan los macizos kársticos que drenan estos manantiales distinguiéndolos en función de la unidad geológica a la que pertenecen. Ver la figura en color en la web.

Fig. 1. Location of the karst springs in which the water temperature measurement (in brackets in the legend) has been carried out. Karst massifs that drain these springs are presented, distinguishing them according to the geological unit to which they belong. See color figure in the web.

en algunas localidades de las sierras de Aracena, Cazorla y Segura y de las sierras de Cádiz. En cambio, en las sierras de las Zonas Internas, especialmente en la parte más oriental, las precipitaciones frecuentemente son inferiores a 700 mm/año.

Resultados

En la figura 2B se puede apreciar que en torno al 75 % del caudal medio conjunto drenado por los manantiales estudiados presenta una temperatura comprendida entre $12\text{ y }18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las excepciones más notables son los manantiales del Nacimiento del Castril, El Tejo o El Berral, que presentan temperaturas por debajo de los $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, o manantiales como Maro, El Nacimiento en Coiñ o Vélez de Benaudalla, con temperaturas comprendidas entre los $18\text{ y }20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por último,

son destacables las temperaturas relativamente altas de los manantiales de El Tempul, Fuentes de Marbella y Albuñol, que se sitúan por encima de los $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la figura 2A se ha representado la relación entre la temperatura del agua de los manantiales estudiados, la cota de surgencia y la temperatura del aire en el exterior. Al igual que ocurre con el gradiente térmico del aire, existe un gradiente térmico del agua subterránea de manera que a mayor cota de surgencia más baja es la temperatura del agua.

Es destacable que un alto porcentaje de los manantiales (60%) presentan temperaturas más cálidas que la media ambiental. Aun así, si se exceptúan algunos sistemas de carácter termal (El Tempul, Fuentes de Marbella y Albuñol), la variación de temperatura de surgencia con respecto a la que correspondería se-

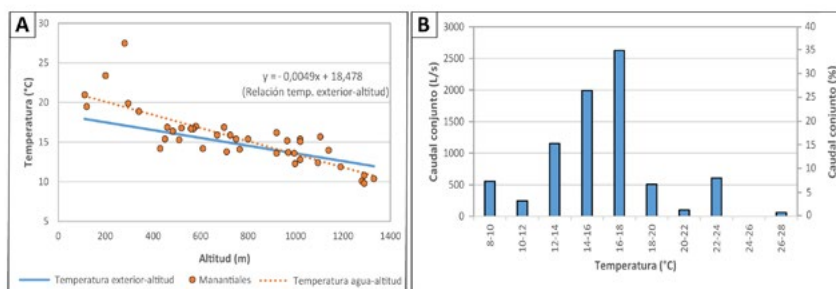


Fig. 2. A) Relación entre la temperatura del agua de los manantiales estudiados, la cota de surgencia de estos manantiales y el gradiente térmico exterior. B) Relación entre el caudal medio conjunto drenado por los manantiales estudiados y la temperatura del agua. Ver la figura en color en la web.

Fig. 2. A) Relation between the water temperature of the springs studied, the altitude of these springs and the external thermal gradient. B) Relation between the mean joint flow drained by the springs studied and the water temperature. See color figure in the web.

gún el gradiente térmico exterior se sitúa dentro del rango ± 3 °C.

Destaca el hecho de que los manantiales situados a cotas más bajas (Tabla I) presentan aguas relativamente más cálidas prácticamente en la totalidad de los casos. La zona de recarga de estos manantiales se encuentra, por lo general, a una cota media próxima a los 1000 m s.n.m. y frecuentemente corresponde a los sistemas del dominio Alpujarride, menos karstificados y situados en áreas con precipitaciones menos abundantes (Tabla I y Fig. 3).

Del mismo modo, los manantiales de aguas relativamente más frías se encuentran a mayores cotas. Se trata de manantiales cuyas áreas de recarga se sitúan a cotas próximas a 1400 m s.n.m., en muchos casos están muy karstificadas y reciben abundantes precipitaciones, como en las sierras de Grazalema, de las Nieves, Segura o el Torcal de Antequera (Tabla I y Fig. 3).

Discusión

En sistemas acuíferos en los que la circulación de agua es suficiente para evacuar por completo el flujo de calor geotérmico, la temperatura de la zona vadosa y, generalmente, del agua de los manantiales está condicionada por la temperatura media ambiental. Badino (2010) afirma que la circulación del agua de recarga, a causa de su elevado calor específico, desempeña un papel determi-

ΔT	n	Cota manantial (msnm)	T ambiental (°C)	T agua (°C)	Cota media recarga (msnm)	Recarga estimada (mm/año)
< -1 °C	8	1033	13,4	11,7	1406	365
-1 a 0 °C	8	994	13,6	13,2	1385	272
0 a 1 °C	10	630	15,4	16,1	980	309
1 a 2 °C	7	792	14,6	16,2	1324	173
> 2 °C	7	465	16,2	20,4	882	258

Tabla I. Diferencia de temperatura del agua de los manantiales estudiados con respecto a la media ambiental (ΔT). Se incluyen los valores medios de la cota de surgencia de los manantiales, así como de las áreas media de recarga y de la recarga estimada.

Table I. Difference of temperature between spring waters and the mean environmental temperature at the springs (ΔT). Means values of altitude at the springs are included, as well as average recharge area height and estimated recharge.

nante en la distribución de temperaturas en la zona vadosa. En cambio, Luetscher y Jeannin (2004), concluyen que el transporte de calor asociado a la circulación de aire, considerablemente mayor que la de agua, puede desempeñar un papel dominante en la temperatura de la zona no saturada.

A partir de los balances hídricos del suelo realizados por Moral (2005) en la zona de recarga de los acuíferos kársticos de la Sierra de Segura se puede estimar que la temperatura del agua de recarga del sistema del Nacimiento del Castril es de unos 3,9 °C, unos 5,4 °C inferior a la temperatura media ambiental. Esta diferencia se debe a que la recarga, al igual que en el resto de Andalucía, se produce fundamentalmente en los meses de invierno. La temperatura del agua en el Nacimiento del Castril son 9,8 °C, es decir, el agua aumenta 4,9 °C su temperatura durante su itinerario subterráneo.

Si toda la energía potencial del agua

se transformase en calor por fricción, se produciría un incremento de la temperatura de 0,23 °C/100 m (Manga y Kirchner, 2004; Luetscher y Jeannin, 2004). En el caso del Nacimiento del Castril, que surge a 1250 m s.n.m. y cuya área de recarga se sitúa a unos 1700 m s.n.m., se produciría un incremento de la temperatura de 1 °C. Considerando el calor específico del agua (1 cal/g·°C), un flujo geotérmico de 1,5 $\mu\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ ($4,73 \cdot 10^5 \text{ cal}/\text{m}^2\cdot\text{año}$) (Colmenar-Santos *et al.*, 2016) y un flujo hídrico (recarga) de 100 mm/año ($10^5 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{año}$), cada gramo de agua podría evacuar 4,73 cal de origen geotérmico, lo que produciría un aumento de la temperatura del agua de 4,73 °C. Si la recarga fuese de 300 mm/año, el incremento de temperatura sería de 1,58 °C. En el Nacimiento del Castril con tasas de recarga probablemente bastante superiores a 300 mm/año no cabe esperar que el calor geotérmico produzca un aumento de temperatura superior a 1,5 °C.

En consecuencia, la temperatura del agua del Nacimiento del Castril está determinada por varios factores que incluyen la temperatura del agua de recarga (3,9 °C), la transformación de la energía potencial del agua en calor (incremento máximo de 1 °C) y el calor geotérmico (incremento máximo de 1,5 °C).

Estos factores implicarían una temperatura máxima de 6,4 °C. Los 3,4 °C restantes, hasta los 9,8 °C de temperatura observados en el agua del manantial, corresponderían al incremento de temperatura producido por la circulación del aire en la zona vadosa.

La mayor parte de los manantiales que se encuentran a una mayor cota y presentan aguas más frías que la media ambiental se corresponden con zonas donde se registran mayores precipitaciones (Fig. 3). Una mayor tasa de recarga de aguas frías podría explicar esta anomalía térmica. Se trata de manantiales que drenan los macizos carbonáticos de las Zonas Externas

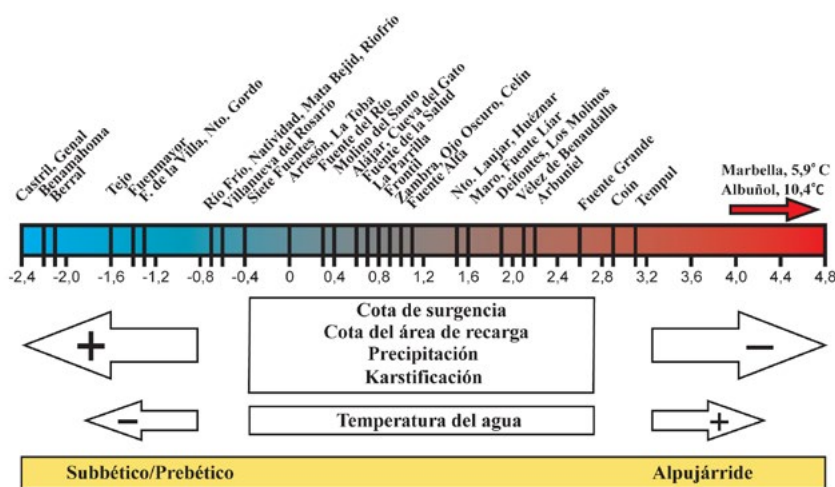


Fig. 3. Diferencia de la temperatura del agua con respecto a la media ambiental y su relación con la cota de surgencia y del área de recarga, la climatología y la karstificación. Ver la figura en color en la web.

Fig. 3. Temperature difference between the spring waters and the mean environmental temperature at the springs and its relation to the spring and recharge area heights, climatology, and karstification. See color figure in the web.

de la Cordillera Bética, más expuestos a las precipitaciones atlánticas y, por ello, más karstificados (Moral, 2005).

Igualmente se observa cómo los manantiales con temperaturas por encima de la media ambiental, además de situarse a cotas bajas, coinciden con zonas de menor precipitación y por lo tanto de menor recarga. En este caso, suele tratarse de manantiales relacionados con los carbonatos alpujárrides, con un grado de karstificación aparentemente menor.

Si tenemos en cuenta la clasificación de Schöeller (1962), los manantiales de Albuñol y Fuentes de Marbella se podrían considerar de carácter termal ya que su temperatura es 10,4 y 5,9 °C superior a la media ambiental respectivamente. Esta anomalía térmica estaría relacionada con la geometría de los materiales que conforman el acuífero, que favorecería la circulación profunda y un rápido ascenso del agua a través de vías muy localizadas.

Conclusiones

Salvo en el caso de los sistemas termales, la temperatura del agua de los manantiales kársticos de Andalucía es muy similar a la temperatura media ambiental: cerca de 20 °C en las zonas de menor altitud (ca. 100 m s.n.m.) y poco más de 10 °C en los manantiales que surgen a mayor cota (ca. 1300 m s.n.m.).

Los sistemas con mayor tasa de recarga y más karstificados (sierras de Segura, Grazalema, Las Nieves), que suelen coincidir con las áreas de mayor altitud de las Zonas Externas de la Cordillera Bética, las aguas tienden a presentar

una temperatura más fría que la media ambiental. Por el contrario, las aguas de los manantiales que drenan los materiales alpujárrides, en los que las tasas de recarga suelen ser menores, a menudo presentan temperaturas superiores a la media ambiental.

Se estima que la temperatura media del agua de recarga es unos 5 °C inferior a la temperatura ambiental media, puesto que en Andalucía la recarga ocurre fundamentalmente en invierno. En los sistemas con más recarga, como el del Nacimiento del Castril, el calor geotérmico y el derivado de la pérdida de energía potencial del agua es insuficiente para explicar el incremento de temperatura observado en las aguas de recarga durante su recorrido hasta los manantiales. Se deriva de ello que la circulación del aire en la zona vadosa debe de jugar un papel importante como aporte de calor al sistema.

En cambio, en aquellos sistemas en los que la recarga es menor, y en los que el flujo hídrico experimenta un mayor calentamiento de origen geotérmico, el calor aportado por el aire en circulación en la zona no saturada podría ser considerablemente menor en el balance térmico general.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por las Acciones Especiales del Plan Propio de Investigación de la Universidad Pablo de Olavide. Asimismo, queremos expresar nuestra más sincera gratitud a J. Benavente y M. López-Chicano por sus detalladas y constructivas revisiones.

Referencias

- Anderson, M.P. (2005). *Heat as a Ground Water Tracer*. Ground Water, 43-6, 951-968.
- Badino, G. (2010). *Underground meteorology: What's the weather underground?* Acta Carsologica, 29-3, 427-448.
- Benavente, J., Pulido-Bosh, A., Fernández-Rubio, R. (1986). Les grands caractères de l'hydrogéologie karstique dans les Cordillères Bétiques. Karstologia Mémoires, 1, 87-89.
- Brookfield, A.E., Macpherson, G.L., Covington, M.D. (2017). *Effects of Changing Meteoric Precipitation Patterns on Groundwater Temperature in Karst Environments*. Ground Water, 55-2, 227-36.
- Colmenar-Santos, A., Folch, M., Rosales, E., Borge, D. (2016). *The geothermal potential in Spain, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 865-886.
- Luetscher, M., Jeannin, P.Y. (2004). *Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes*. Terra Nova, 16-6, 344-350.
- Manga, M., Kirchner, J.W. (2004). *Interpreting the temperature of water at cold springs and the importance of gravitational potential energy*. Water Resources Research, 40.
- MAGRAMA (2013). *Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA)*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Moral, F. (2005). *Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura)*. Tesis Doctoral, Univ. Pablo de Olavide, 580 pp.
- Schöeller, H. (1962). *Les eaux souterraines*. Ed. Masson, Paris, 642 pp.