



¿De dónde sale el agua?

Relación entre el agua subterránea y las estructuras geológicas

Gracia Fernández Ferrer, Francisco González-García
Universidad de Granada

En este trabajo se describen los lugares de descarga natural del agua subterránea al medio superficial, a través de manantiales. No sin antes hacer una caracterización de la localización y funcionamiento del agua subterránea que facilite concretar su tipología, así como las características de las formaciones geológicas que permiten su alumbramiento. Al respecto, realizamos algunas sugerencias para la mejora de su enseñanza y aprendizaje.



PALABRAS CLAVE

- ACUÍFEROS
- AGUA SUBTERRÁNEA
- DESCARGA
- MANANTIALES



Cabeceira del río San Juan en Sierra Nevada (Granada)

A lo largo de la historia el agua subterránea siempre ha estado relacionada con hechos milagrosos y misteriosos. Era obvia a la vista su descarga al exterior de modo natural a través de manantiales, pero su origen y funcionamiento no fue acertadamente conocido hasta tiempos cercanos. Para los clásicos, el agua de los manantiales procedía del mar a través de conductos subterráneos, perdiendo su salinidad por infiltración o destilación. Plinio el Viejo (24-79 d. de C.) escribió en su *Historia natural* (Libro II, 224): «Producen un efecto aún más maravilloso las aguas dulces que brotan junto al mar como por chorros, pues ni siquiera la naturaleza del agua está libre de prodigios».

También es destacable la obra de Bernard Palissy (1580) *Discours admirables de la nature des eaux et fontaines...*, donde dos personajes, «Teoría» y «Práctica», exponen en un discurso argumentativo diferentes pruebas que pueden apoyar la procedencia marina o no del agua subterránea. «Teoría» expone argumentos de autoridad procedentes de pensadores clásicos como Platón, frente a las pruebas expuestas por «Práctica» basadas en la pura observación.

Por su parte, las aportaciones de Perrault, Mariotte y Halley fueron decisivas para derribar las dos ideas sobre las que se asentaba la visión errónea del ciclo del agua en la Antigüedad: que las precipitaciones no eran suficientes para explicar la existencia de agua subterránea y que la superficie de la Tierra era muy poco permeable. Pierre Perrault (*El origen de las fuentes*, 1674) presenta un estudio cuantitativo en la cuenca del río Sena, demostrando empíricamente que las precipitaciones suponían la sexta parte de su caudal, siendo de este modo suficientes para explicar una procedencia aérea del agua subterránea.

Además, Edme Mariotte (*Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides*, 1685) midió el caudal del Sena a su paso por París y las precipitaciones, en donde la superficie de la cuenca era mayor, concluyendo que el caudal era la octava parte de las segundas. En este estudio, Mariotte introdujo datos de infiltración con lisímetros primitivos. Completando los datos empíricos, Edmund Halley (*An account of the circulation of watry vapours of the sea, and the cause of springs*, 1691) describe cómo midió cuidadosamente la evaporación y llegó a la conclusión, en el caso del mar Mediterráneo, que el volumen de agua evaporada era equivalente al de los ríos que desembocaban en el mismo.

Comprobada la tesis de que las precipitaciones podían explicar la existencia de agua subterránea y de que la superficie terrestre debía de ser lo suficientemente permeable como para engullirlas, no fue hasta 1856 que Henri Darcy, en su obra *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, presenta la ley que lleva su nombre y que describe las características del movimiento del agua subterránea.

ELEMENTOS HIDROGEOLÓGICOS FUNDAMENTALES

Una vez el agua precipita sobre la superficie terrestre puede emprender los caminos de evaporarse, escurrirse o infiltrarse. Los factores de los que dependerá el ciclo los podemos agrupar en geológicos, topográficos, climáticos y botánicos.

Entre los geológicos influirá fundamentalmente la litología desde el punto de vista de los parámetros de porosidad y permeabilidad. La porosidad es la cualidad de las rocas de poseer poros que pueden ser ocupados por agua, pudiendo clasificarla en primaria o secundaria según su

origen. Así, en la porosidad primaria los poros se generan al mismo tiempo que las rocas, mientras que la secundaria tiene un origen posterior, por fracturación, grietas de retracción o disolución. Por su parte, la permeabilidad es la capacidad de la roca de permitir el flujo de agua.

Según estos parámetros podemos clasificar los materiales geológicos en acuíferos, acuitardos, acucludos o acuífugos. Los acuíferos serían materiales con una red de poros en la que el agua puede circular fácilmente. Sería el caso del material detrítico de la cuenca de un río. En el caso opuesto, un material sin porosidad que no deja circular el agua, como una roca cristalizada sin alteración posterior, sería acuífugo. Podríamos tener dos casos intermedios entre los extremos citados. Por un lado, un material que pueda albergar agua pero no transmitirla sería un acucludo (por ejemplo rocas volcánicas con vacuolas sin conexión); y por otro, estaría el material acuitardo, en el que hay un conjunto de poros que pueden almacenar agua y transmitirla con cierta dificultad, teniendo permeabilidad baja.

Por tanto, si las formaciones rocosas que tapizan la superficie terrestre son poco permeables va a predominar la escorrentía superficial, siendo un ejemplo la cuenca Guadix-Baza (Granada), donde entre los materiales abunda la arcilla de escasa permeabilidad. Igual ocurrirá en terrenos con afloramientos de rocas cristalinas o con poco desarrollo de capa edáfica. Por el contrario, los lugares con materiales detríticos tamaño arena o grava, con abundantes poros interconectados, favorecerán la infiltración del agua de precipitación (véase la imagen que encabeza este artículo).

En cuanto a la topografía, el factor más importante es la pendiente, de tal modo que si esta es

Una vez el agua precipita sobre la superficie terrestre puede evaporarse, escurrirse o infiltrarse



fuerte predominará la escorrentía. Por su parte, el clima influye en la distribución de precipitación a lo largo del tiempo, siendo determinante la precipitación regular para favorecer la infiltración, en contra de aguaceros episódicos de alta intensidad donde la capacidad de absorción se limita. Asimismo, la temperatura es el factor que modifica la evapotranspiración, intensificándose si es alta y disminuyendo los valores de lluvia útil. Por último, la vegetación favorece la evapotranspiración y la infiltración.

Si la infiltración tiene éxito, el agua podrá quedar retenida en las partículas del suelo, higroscópica y pedicular, o quedar retenida o moverse entre los poros de las rocas por gravedad. Es en función de este comportamiento que podemos diferenciar en un perfil del terreno distintas zonas. Una primera zona de evapotranspiración, en la que el agua podrá volver al medio aéreo, una zona intermedia, conectada a una franja capilar, y la zona saturada, limitada por otra impermeable. En la zona saturada todos los poros de las formaciones geológicas están ocupados por agua, moviéndose en su seno desde puntos de mayor a menor cota piezométrica hacia zonas de descarga, tales como el mar, un río, un lago, un manantial o una captación artificial por el hombre, como un pozo.

En general, los alumnos y alumnas tienen grandes dificultades para comprender los temas de permeabilidad y porosidad (Cortés-Gracia,

2004). Por otro lado, los modelos mentales del alumnado sobre la localización y funcionamiento del agua subterránea están alejados del esquema descrito, poniéndose de manifiesto que el alumnado sitúa el agua subterránea parada en lagos o ríos subterráneos, considerando imposible el flujo de agua entre los poros de las formaciones geológicas (Fernández Ferrer, 2009).

ACUÍFEROS Y MANANTIALES

Resulta evidente que para poder localizar agua subterránea es preciso detectar acuíferos, que son formaciones geológicas con unas características hidrogeológicas de porosidad y permeabilidad adecuadas para contener y transmitir agua. Estos acuíferos pueden clasificarse en confinados, semiconfinados o libres, según haya o no una cubierta de materiales impermeables que los aisle del medio aéreo. Así, un acuífero libre no tendrá cobertera de material impermeable, pudiendo recargarse verticalmente con las precipitaciones y teniendo una superficie freática o piezométrica con límites claros, que fluctuará según las condiciones de alimentación o descarga.

En los semiconfinados, el acuífero está limitado por materiales de baja permeabilidad pero no completamente impermeables (acuitardos); mientras que en los acuíferos confinados o cautivos existe un material impermeable que impide

una alimentación vertical, siendo la recarga lateral. Aquí la zona saturada estará a mayor presión que la atmosférica, por lo que, al ser captado el acuífero con un sondeo, el agua ascenderá hasta igualar la presión atmosférica.

La superficie freática o piezométrica no es horizontal, sino inclinada en el sentido del flujo subterráneo. A esta inclinación se le denomina gradiente y permite la circulación desde la zona de recarga a la de descarga. De este modo, el agua, en el medio subterráneo, se mueve de puntos en los que tiene mayor a menor potencial hidráulico. Las superficies que tienen igual potencial hidráulico (el agua está a igual presión) se denominan equi-

■

Los acuíferos tienen las características hidrogeológicas de porosidad y permeabilidad adecuadas para contener y transmitir agua

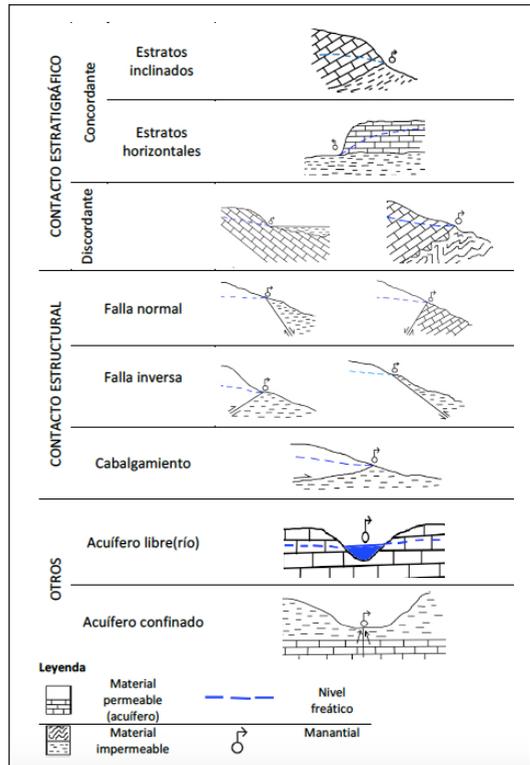


Imagen 1. Tipos de manantiales

potenciales o isopiezas, siendo el flujo perpendicular a las mismas (Custodio y Llamas, 2001).

La descarga natural de un acuífero al medio superficial ocurre en la intersección de la superficie piezométrica con la topográfica. Esta intersección puede ser difusa, como en el caso de un río, permitiendo que tenga un caudal base y que no se extinga tras las precipitaciones. En otros casos, la intersección puede ser puntual, dando lugar a un manantial.

La tipología de manantiales es variada según las estructuras geológicas que faciliten la salida de agua. De este modo, dependiendo del contacto

La tipología de manantiales es variada según las estructuras geológicas que faciliten la salida de agua



entre el acuífero y el material impermeable podemos tener las siguientes situaciones: a) contacto estratigráfico entre materiales concordantes (estratos inclinados u horizontales) y discordantes, y b) contacto estructural provocado por una falla (normal o inversa) o un cabalgamiento (imagen 1).

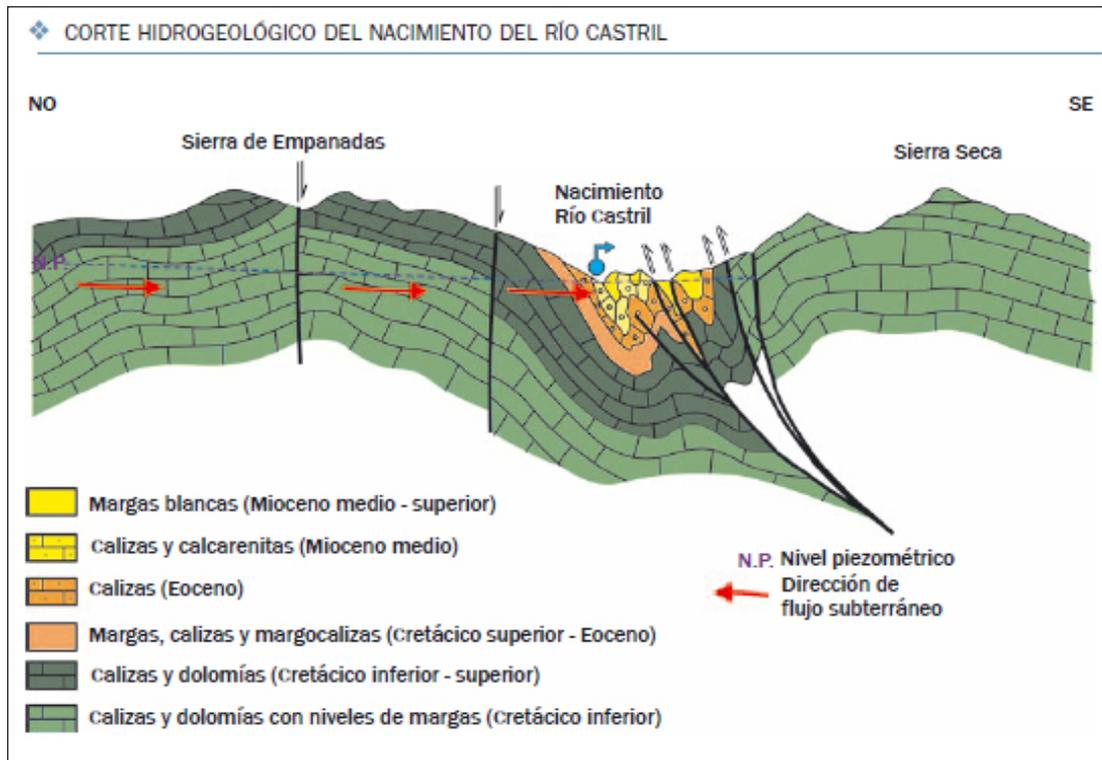


Imagen 2. Corte hidrogeológico del nacimiento del río Castril (Villalobos y otros, 2006)

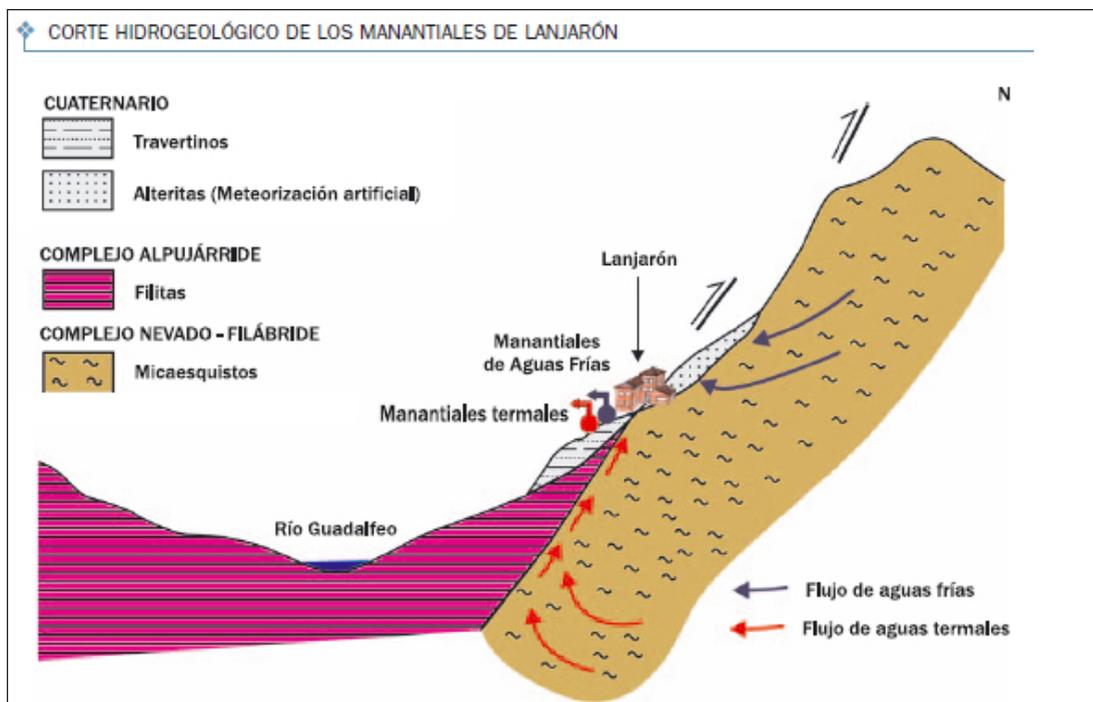


Imagen 3. Corte hidrogeológico de los manantiales de Lanjarón (Villalobos y otros, 2006)

Por otro lado, a grandes rasgos, existen dos grandes grupos de acuíferos: los detríticos y los kársticos. Los detríticos están constituidos por materiales granulosos muy poco o nada cimentados, originando manantiales poco llamativos en los que las aguas se obtienen principalmente mediante sondeos y pozos.

En el caso de los carbonatados sus rocas son compactas pero se encuentran fracturadas en grados muy diversos, hablándose de acuíferos por fisuración y por karstificación, según el grado. Estos acuíferos pueden originar manantiales mucho más espectaculares y alumbrar el nacimiento de ríos de importancia. En Granada, el origen del río Castril corresponde a este tipo (imagen 2).

De forma excepcional pueden aparecer manantiales en zonas con materiales geológicos de muy baja permeabilidad. Son ejemplos en la provincia

de Granada los manantiales de Lanjarón, asociados a las laderas de esquistos de Sierra Nevada, de los que emanan aguas de diferente composición y temperatura, en función de la profundidad de la que procedan (imagen 3).

IMPLICACIONES PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE

El reservorio del agua subterránea es fundamental para entender el funcionamiento del ciclo del agua. La desconexión en el pensamiento popular con el agua superficial, a la que Custodio y Llamas (1997) denominaron «hidroesquizofrenia», ha provocado una ineficaz e insostenible utilización de los recursos hídricos. Es por tanto fundamental tratarlos en la enseñanza obligatoria ante la necesidad de que formen parte del bagaje científico de los futuros ciudadanos y ciudadanas.



Para solventar esta necesidad se pueden tener en cuenta las dificultades que nuestros antepasados tuvieron para entender la relación entre el agua subterránea y superficial. Tales escollos pueden convertirse en problemas de investigación en el aula, planteando interrogantes como:



- ¿Es la superficie terrestre lo suficientemente porosa y permeable como para que se produzca la infiltración de las precipitaciones y con ello explicar la procedencia del agua subterránea?
- ¿Qué materiales terrestres pueden comportarse como acuíferos?
- ¿Cómo se mueve el agua en un acuífero?
- ¿Cuáles son los lugares de descarga del agua subterránea?

En la resolución de estas cuestiones es preciso ofrecer al alumnado la oportunidad de indagar en el laboratorio las propiedades de porosidad y permeabilidad de las rocas, o el movimiento del agua en medios porosos. Para este cometido, se aportan ejemplos de prácticas.¹ Asimismo, son de interés las salidas al campo para identificar las formaciones geológicas y caracterizar la tipología de manantiales. En este sentido, citamos la iniciativa de diferentes instituciones para catalogar las diferentes fuentes y manantiales de Andalucía, como actividad de interés para realizar con el estudiantado.²

Por último, hay que destacar el interés que hoy en día está tomando la realidad virtual para acercar al alumnado a lugares de difícil acceso o lejanos,³ así como otros recursos tecnológicos aportados por instituciones de gran prestigio como el Instituto Geológico y Minero de España⁴ o el Servicio Geológico de Estados Unidos,⁵ que disponen de

materiales educativos en línea para facilitar la enseñanza y aprendizaje de estas cuestiones. ◀

Notas

1. <https://drive.google.com/file/d/1-jHnAMYfOeWmTS-1k4rrld3e62JSE2beG/view?usp=sharing>
2. <http://www.conocetusfuentes.com/home.php>
3. <https://www.youtube.com/watch?v=5XY0olwmXSc>
4. <http://ploppy.igme.es/>
5. <https://water.usgs.gov/gotita/earthgw.html>

Referencias bibliográficas

- CORTÉS-GRACIA, A. L. (2004): «Ideas sobre la permeabilidad en estudiantes de magisterio». *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 22, núm. 1, pp. 37-46.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. (2001): *Hidrología subterránea*. Tomo I. Barcelona. Omega.
- (1997): «Consideraciones sobre la génesis y evolución de ciertos "Hidromitos" en España», en *Defensa de la Libertad. Homenaje a Víctor Mendoza*. Madrid. Instituto de Estudios Económicos, pp. 167-179.
- FERNÁNDEZ FERRER, G. (2009): *El agua subterránea: estudio de esquemas de conocimiento en universitarios y estrategias didácticas para su aprendizaje significativo en estudiantes de secundaria*. Granada. Universidad de Granada. Disponible en línea en: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/2589> [Consulta: julio de 2021].
- VILLALOBOS, M. y otros (2006): *Guía de manantiales de la provincia de Granada*. Granada. Diputación de Granada-Instituto Geológico Minero de España.

Direcciones de contacto

Gracia Fernández Ferrer
Francisco González-García
Universidad de Granada
gferfer@ugr.es

Este artículo fue solicitado por ALAMBIQUE. DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, en febrero de 2021 y aceptado en julio de 2021 para su publicación.