

Algunas pautas del comportamiento hidrogeológico de rocas duras afectadas por glaciario y periglaciario en Sierra Nevada (España)

Hydrogeologic behaviour of hard rocks affected by glaciario and periglaciario in Sierra Nevada (Spain)

A. Castillo^(*) y B. Fedeli^()**

(*) CSIC e Instituto. del Agua (Univ. Granada). Ramón y Cajal, 4. 18071 Granada.

E. mail: acastill@ugr.es

(**) Departamento de Geodinámica (Univ. Granada)

ABSTRACT

We discuss the hydrogeologic behaviour of metamorphic schist materials affected by quaternary glacial and periglacial processes. The field study was carried out in the upper part of Sierra Nevada (Spain), in the basins of the Monachil and Dílar rivers, at altitudes of 1500 to 3400 m a.s.l.

The results obtained reveal that the flow is mainly at the subsurface and takes place through glacial and periglacial deposits and alteration bands. The drainage network is sparse and influenced by rising springs, mainly located on the lower edges of the above mentioned permeable materials. The depletion coefficients were very high, appropriate to a high transmissivity flow of about 1,5 a 8×10^{-2} days⁻¹.

Key Words: Sierra Nevada, hards rocks, subsurface flow, glacial and periglacial processes

Introducción

A continuación se exponen algunas pautas del comportamiento hidrogeológico de un ámbito poco conocido y estudiado, como es el de las rocas duras en zonas de alta montaña afectadas por glaciario y periglaciario. Las investigaciones, realizadas en Sierra Nevada (España), han puesto de manifiesto una serie de cuestiones de interés hidrológico y medioambiental.

El trabajo de campo se realizó en la parte más elevada del macizo, entre los 1.500 y 3.400 m de altitud, en las cuencas de los ríos Monachil y Dílar, sobre un área de unos 80 km² de extensión (Fig. 1), dentro de los actuales Parques Nacional y Natural.

Figura 1

Todo el núcleo de Sierra Nevada está compuesto mayoritariamente por esquistos metamórficos de edad permotriásica, de la Zona Interna de las Cordilleras Béticas (Complejo Nevado-filábride). Pese a tratarse de materiales poco permeables, el flujo subsuperficial por encima de los 2.300 m de altitud es mayoritario, del orden del 75% de la escorrentía, que

sólo se produce en periodos de deshielo. Dicho flujo está totalmente influenciado por la acción glaciaria y periglaciaria, responsable del modelado actual, repleto de formas de erosión y depósito muy bien conservadas.

La declaración de este espacio como Reserva de la Biosfera por la UNESCO (1986), Parque Natural por la Junta de Andalucía (1989) y más recientemente como Parque Nacional por el Gobierno central (1999; es el Parque Nacional más extenso de España, con cerca de 90.000 has) ha incrementado el interés de los científicos por su estudio y de los gestores, y sociedad en general, por su conocimiento. Pese a ser insuficiente aún la investigación hidrológica desarrollada, se empieza ya a disponer de estudios de detalle sobre aspectos variados, los más recientes los de Adarve *et al.* (1997 y 1998), Al Alwani (1997), Castillo (2000), Fedeli y Castillo (1997 y 1998) y Gisbert (2001). Los estudios sobre el glaciario y periglaciario de Sierra Nevada son, por el contrario, muy abundantes (Esteban Amat, 1995; Gómez Ortiz, *et al.*, 1998; Gómez Ortiz y Salvador Franch, 1998, Gómez Ortiz *et al.*, 1998...), aunque aún permanecen ciertas cuestiones por dilucidar. Como se comentará a continuación, la estrecha relación entre las formas glaciares y periglaciares y el flujo subterráneo hace de estos trabajos una aportación complementaria de consulta obligada.

El flujo subsuperficial

En la Alta Sierra Nevada, la escorrentía, que sólo tiene lugar tras el deshielo (y tras esporádicos episodios lluviosos), es mayoritariamente subsuperficial en la franja que podríamos denominar glaciaria. Esa franja no es constante en todo el macizo y está sujeta a múltiples factores (entre los que cabría resaltar la orientación y amplitud de las cuencas de recepción). En la zona estudiada (cuencas altas de los ríos Monachil y Dílar), los principales cuerpos detríticos morrénicos se hallan por encima de los 2.400 m de altitud, si bien los depósitos de derrubios de origen frío que regularizan las laderas bajan hasta cotas más bajas. En la cuenca del río Dílar, las laderas se muestran redondeadas y suaves (lomas), hasta los 2.850 m de altitud aproximadamente, a partir de los cuales asciende un farallón rocoso, con potentes conos de derrubios gravitacionales, hasta la línea cumbre. En la vertiente Sur, el modelado de laderas es diferente, y allí se llega a las cumbres sin resaltes, a través de extensas planicies erosivas.

El flujo subsuperficial se ve favorecido por tres circunstancias. En primer lugar, toda la superficie del terreno se halla cubierta por depósitos y franjas de alteración glaciares y periglaciares de alta permeabilidad, que pueden considerarse como un auténtico acuífero; en su grado más excelso, corresponden a potentes masas de bloques de glaciares rocosos y de conos de derrubios por encima de los 2.850 m de altitud. La morfología erosiva favorece también la infiltración, al haber modelado formas alomadas, circos, cubetas y terrazas dentro de las altas pendientes existentes. Un segundo factor a tener en cuenta es el fuerte efecto regulador ejercido por los procesos de innivación y deshielo, lo que favorece los procesos de infiltración; a las cotas de estudio, más del 75% de la precipitación tienen lugar en forma sólida. Por último, la cubierta vegetal hasta los 2.700 m, que aparentemente es rala (poco densa), sobre el terreno ofrece un alto grado de cobertura; compuesta por piornos (el piornal), y en menor medida por sabinas, la estructura almohadillada de esta vegetación, junto a su densa compacidad interna constituyen un eficiente freno a los incipientes procesos de escorrentía superficial que se generan, a favor de procesos de infiltración.

Las surgencias de alta montaña

En consecuencia, destaca un paisaje con escasa red de drenaje, salpicado por abundantes surgencias en la época del deshielo. Son precisamente estos puntos de descarga (de muy diverso tipo) los que desencadenan frecuentemente el establecimiento y jerarquización posterior de la red de drenaje. La mayor parte de las surgencias son muy efímeras, y duran sólo un poco más que el deshielo, si bien otras muchas, de caudales más o menos importantes, no llegan a agotarse; las más permanentes se conocen localmente como "borreguiles", por dar origen a praderas hidrófilas que constituyen la fuente alimenticia estival de la fauna salvaje y de la ganadería que habita en este Parque Nacional. Fedeli y

Castillo (1997) hicieron una primera clasificación genética de estas surgencias de la Alta Sierra Nevada. Las de mayor caudal se localizan en los bordes inferiores de cuerpos detríticos glaciares (generalmente morrenas laterales y frontales); otro grupo importante se asocia a las inflexiones de pendiente originadas por la dinámica erosiva glaciaria, muy frecuentemente el pie de circos, cubetas de sobreexcavación y terrazas (de crioplanación, solifluxión...) de mayor o menor entidad. En un límite altitudinal más bajo, la denudación de las franjas de alteración por erosión fluvial remontante genera otro tipo de surgencias. Por fin, un grupo minoritario es el relacionado con la circulación a través de fracturas y discontinuidades lito-estructurales, surgencias más abundantes en la media y, sobre todo, baja montaña.

En la Figura 2 se expone un croquis simplificado con las diferentes "franjas hidrológicas" que pueden distinguirse en la cuenca del río Dílar hasta los 2.300 m de altitud. La franja superior (A) desciende aproximadamente hasta los 2.900 m; en ella no hay surgencias, ni tampoco escorrentía superficial; toda el agua de fusión se infiltra a través de importantes conos de derrubios gravitacionales y de glaciares rocosos. Entre los 2.900 y los 2.650 m se sitúa otra franja (B), la más rica en surgencias ("borreguiles"), ya que en ella se encuentra el límite inferior de los depósitos rocosos de la franja A (sobre los 2.800-2.900 m), e importantes morrenas glaciares (entre 2.800 y 2.600 m); mayor detalle de la repartición de surgencias por altitud puede consultarse en Fedeli y Castillo (1998). Entre los 2.650 y 2.300 m se ha distinguido otra franja (C), caracterizada por poseer surgencias numerosas, pero más efímeras que las anteriores, al estar relacionadas con depósitos y franjas de alteración menos potentes y extensas que las de franjas superiores. Por debajo de los 2.300 m (D) la franja de alteración y de depósito glaciario y periglaciario se halla muy disminuida, la innivación es menor y el flujo subsuperficial ya no es tan importante. Sierra Nevada desciende hasta aproximadamente 1.000 m de cota, en el que se sitúa el contacto tectónico con las depresiones neógeno-cuaternarias de borde.

Figura 2

Otra relación altitudinal de interés, aparte de la ya expuesta de los puntos de surgencia, fue la de la temperatura de emergencia de las aguas. En líneas generales, la correlación de esta con la altitud no fue todo lo buena que hubiera cabido esperar (y que se da en la mayor parte de los sistemas acuíferos), debido al papel distorsionador ejercido por las diferentes orientaciones de las laderas, que son las que condicionan (junto con la altitud) los procesos de deshielo, origen de los flujos subsuperficiales drenados en última instancia por las surgencias. A igualdad de condiciones, los flujos más fríos (y estables térmicamente) fueron indicativos de surgencias de mayor coeficiente de agotamiento (mayor velocidad de flujo).

Caracterización de los agotamientos

Los primeros análisis de estiaje de hidrogramas fluviales y de surgencias de la Alta (e incluso Media) Sierra Nevada mostraron un limitado componente inercial, con predisposición a respuestas impulsivas tras deshielos intensos y episodios de tormenta, con rápidos agotamientos posteriores, todo ello propio de sistemas sumamente permeables. El análisis más pormenorizado de los diferentes periodos de agotamiento de los que se disponía de información, tanto para los ríos Monachil y Dílar (10 años; Adarve *et al.*, 1998), como para cinco surgencias representativas del Alto Dílar (Fedeli y Castillo, 1998), permitió obtener valiosa información sobre el comportamiento hidrogeológico del área. En la Figura 3 se muestran diferentes curvas de agotamiento obtenidas (para ríos y surgencias), de las que se dedujeron parámetros representativos como el coeficiente de agotamiento, caudal de inicio del agotamiento, fecha de inicio del agotamiento y tiempo necesario para alcanzar un caudal igual a 0,1 m³/s (sólo en ríos y tomando siempre como referencia desde el 1 de Mayo). Los coeficientes medios de agotamiento obtenidos para los ríos Monachil y Dílar (hasta los 1.400 y 1.000 m de altitud respectivamente) fueron del orden de 1,5 x 10⁻² días⁻¹. Las surgencias controladas, dependiendo fundamentalmente de su cota, arrojaron valores comprendidos entre 2,4 y 8 x 10⁻² días⁻¹; estos valores reflejan la existencia de flujos de gran transmisividad, que, como se ha comentado, tienen lugar a través de cuerpos morrénicos, campos rocosos y

otros tipos de depósitos de origen frío similares.

Figura 3

Como puede observarse, los resultados obtenidos muestran cierta heterogeneidad, sobre todo en los agotamientos fluviales, explicable por el mantenimiento de caudales de base a partir de multisurgencias de diferente tipo, con participaciones en los flujos anuales no siempre constantes. Adarve *et al.* (1998) pusieron de manifiesto la existencia de correlación positiva entre la aportación pluviométrica anual y los coeficientes de agotamiento obtenidos. Algo parecido obtuvieron Fedeli y Castillo (1997), que indicaron la existencia de correlación positiva entre el coeficiente de agotamiento de surgencias, sus caudales y altitudes. Todo ello proviene de la existencia de correlación positiva de la permeabilidad (y transmisividad) con la altitud, o, lo que es lo mismo, con la intensidad del glaciario.

Agradecimientos

Muchas de las observaciones de campo fueron realizadas en el marco de trabajos de doctorado del curso "Hidrología superficial y subterránea en áreas de alta montaña; el caso del macizo de Sierra Nevada" de la Universidad de Granada. A la dirección de los Parques Natural y Nacional de Sierra Nevada y a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir por las facilidades dadas.

Referencias

- Adarve, A.; Castillo, A.; Gisbert, J. & Al-Alwani, G. (1997). *Hydrogeology of Hard Rock*. Eds. Yelamos & Villarroya. AIH-GE. 115-124
- Adarve, A.; Castillo, A. y Fedeli, B. (1998). *Geogaceta*, 23: 3-6
- Castillo, A. (2000). *Geotemas* 1(2): 59-62
- Esteban Amat, A.,(1995). *Tesis Doct.* Univ. Barcelona
- Fedeli, B., & Castillo, A. (1997). *Hydrogeology of Hard Rock*. Eds. Yelamos & Villarroya. AIH-GE. 159-167.
- Fedeli, B. y Castillo, A. (1998). *Geogaceta*, 23: 47-50
- Gisbert, J. (2001). *Tesis Doct.* Univ. Granada
- Gómez Ortiz, A. y Salvador Franch, F. (1998). *Las huellas glaciares en las montañas españolas*. Univ. Santiago de Compostela, 385-430
- Gómez Ortiz, A.; Salvador Franch, F.; Sánchez Gómez, S. y Simón Torres, M. (1998). *En Itinerarios geomorfológicos por Andalucía Oriental*. Univ. Barcelona, 37-63

Fig. 1.- Localización del área de estudio

Fig. 1.- Location of the study area

Fig. 2.- Croquis simplificado con las diferentes "franjas hidrológicas" altitudinales que se pueden distinguir en la cuenca del río Dílar (3.242 a 2.300 m de altitud)

Fig. 2.- Simplified diagram of the different hydrologic altitude bands identified in the basin of the river Dílar (3.242 to 2.300 m a.s.l)

Fig.3.- Curvas de agotamiento, en escala semilogarítmica, obtenidas para los ríos Dílar y Monachil y para surgencias de la franja glacial y periglacial

Fig. 3.- Depletion curves, in a semilogarithmic scale, for the Dílar and Monachil, and springs of the glacial and periglacial band