

Granada



Asociación Internacional de Hidrogeólogos
Grupo Español

HIDROGEOLOGÍA DÍA

2018

11 de marzo 2018

Los caminos del agua en la Sierra de Loja

ORGANIZAN:



Avanzamos juntos

COLABORAN:



UNIVERSIDAD
DE GRANADA



CONOCER FUENTES



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico
y Minero de España



Ayuntamiento
de Loja



La Sierra de Loja forma parte del acuífero de Sierra Gorda, uno de los más importantes de Andalucía. La gran extensión de los carbonatos que la forman y las extraordinarias morfologías kársticas que se han desarrollado en su superficie hacen que un gran volumen del agua de lluvia que cae sobre ella penetre por el terreno, se almacene en sus entrañas y circule hacia los manantiales. En la ciudad de Loja y en su entorno surge la mayor parte de esa agua en un considerable número de caudalosos y bellos manantiales. En los límites del casco urbano se estima que nace un caudal medio de unos 600 litros por segundo, unos 1.000 litros lo hacen en la zona de Plines-Genazar, al oeste de la ciudad, y otros 1.000 más en el entorno de Ríofrío, en la parte más occidental. Y aún habría que citar la parte oriental donde surgen los manantiales del Manzanil, la Presa, La Cadena, Porrinas... que podrían sumar conjuntamente un caudal medio cercano a 500 litros por segundo.

No es de extrañar, por tanto, que en el siglo XVI Alonso de Castañeda y Frías escribiera refiriéndose a esta villa lo siguiente:

“... y quitándole el nombre de Tricolia, le pusieron el de Lacivis, que se interpreta lugar de muchas aguas y delicias...”

También Hernández de Jorquera, en el siglo XVII se refiere a la ciudad de Loja por sus manantiales: *“... en medio de un empinado cerro lleno de risueñas y cristalinas fuentes, algunas medicinales, gozando de hermoso cielo, está la ciudad de Loxa... Son muchas las fuentes y manantiales que tiene dentro y fuera de la ciudad y en particular un famosísimo estanque junto a su mayor plaza, claro, limpio y transparente, sangrando de más de doscientos caños por donde se dijo aquella copla tan cantada:”*

*“Si Motril tuviera fuentes
Como Loja y su comarca,
No tuviera el Rey tal villa,
Ni tal ciudad en España”*

Todas estas aguas alimentan al río Genil y son embalsadas aguas abajo en la presa de Iznájar, la de mayor capacidad de Andalucía.

El objetivo de esta edición del **Hidrogeodía 2018 - Granada** es recorrer una parte de la superficie del acuífero para observar las morfologías que favorecen que la lluvia penetre en su interior, mostrar algunos de los manantiales más importantes que manan en Loja y en su entorno, explicar sus características y, en definitiva, responder a preguntas tales como: ¿De dónde viene el agua?, ¿por dónde ha circulado hasta llegar aquí?, ¿tiene buena calidad?, ¿cómo y por qué varía el caudal que sale del manantial a lo largo del año?, ¿cómo se mide ese caudal?, etc.

EL HIDROGEODÍA

El **Hidrogeodía** es una jornada de divulgación de la Hidrogeología (rama de la geología que estudia las aguas subterráneas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas, químicas y sus interacciones con el medio físico, biológico y la acción del hombre), que se celebra con motivo del **Día Mundial del Agua** (22 de marzo).

Esta jornada está promovida por el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GE), ha sido organizada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Diputación Provincial de Granada en el marco del convenio de colaboración existente entre ambos organismos, con la colaboración de la Universidad de Granada, el Ayuntamiento de Loja, Conoce Tus Fuentes y el Parque La Presa S.A. La jornada consta de **actividades de divulgación, abiertas al público en general, gratuitas** y guiadas por especialistas en hidrogeología.

En Granada, el Hidrogeodía 2018 se celebra en **la Villa y la Sierra de Loja**. Se llevará a cabo una visita guiada por la sierra y por varios de los parajes y manantiales más representativos del entorno de la ciudad. Se han previsto cinco paradas temáticas:

- 1) **El Manantial del Frontil.**
- 2) **Los Infiernos de Loja.**
- 3) **El Manantial del Manzanil.**
- 4) **Los campos de dolinas y de lapiaz.**
- 5) **Los manantiales de Ríofrío**

ITINERARIO

El punto de partida en Granada será la entrada a la Diputación Provincial en la C/ Periodista Barrios Talavera, nº 1 desde donde partirá un autobús hacia Loja. En Loja se iniciará el recorrido en el Manantial del Frontil, en la margen derecha del río Genil, al pie del Hacho de Loja.



Figura 1. Punto de encuentro en Granada.



Figura 2. Punto de encuentro en Loja.

En el Frontil se hará el reparto de documentación y se visitará el manantial (**Parada 1**).

En este punto se explicarán aspectos básicos de los acuíferos formados por carbonatos (calizas y dolomías) y de los diferentes tipos de manantiales existentes, se realizará una

descripción del acuífero de la Sierra de Loja y se explicarán las singularidades del manantial.



Figura 3. Nacimiento del Manantial de El Frontil.

Desde allí subiremos en un autobús, a cargo de la organización, hacia la siguiente parada, que se encuentra a 5 minutos en vehículo y posteriormente realizaremos un breve paseo.



Figura 5. Los Infiernos de Loja.

La **Parada 2** tendrá lugar en el Mirador de los Infiernos de Loja, en las cercanías del barrio de La Esperanza. En este punto se observará el cauce del río Genil, la cascada de la Cola de Caballo y las terrazas formadas por rocas precipitadas por el agua subterránea (travertinos) en terrazas situadas a distintas alturas. Se explicará el significado de estas rocas tan peculiares y la información que puede extraerse de ellas.



Figura 4. Recorrido a realizar y situación de las paradas

Subiremos de nuevo al autobús para trasladarnos a la margen contraria del río Genil, hacia uno de los manantiales que alimentan la Cola de Caballo, el manantial del Manzanil o de las Pasaderas (**Parada 3**). En este manantial existe una estación de aforo que servirá para explicar cómo se miden los caudales de los manantiales. Allí también se explicarán las características de este manantial y sus diferencias con el visitado anteriormente.



Figura 6. Manantial dell Manzanil y estación de aforo

Nuevamente subiremos al autobús para acceder a la parte alta de la sierra, al cerro de las Cabras, a 1.642 m de altitud (**Parada 4**). Por el camino observaremos unas construcciones singulares que son aljibes contruidos para suministrar agua al ganado ovino y caprino. En esta zona existe una pasarela de madera y un mirador donde se contemplan unas vistas extraordinarias de las morfologías kársticas que han labrado la superficie de la sierra y otros aspectos geológicos que condicionan el funcionamiento del acuífero.

Se definirá qué es el Karst, cómo se han formado los campos de dolinas y de lapiaz y cómo favorecen la infiltración del agua hacia el interior del acuífero. Por otra parte, se explicará la estructura geológica de los carbonatos que forman el acuífero y su influencia en la circulación del agua subterránea hacia los manantiales.

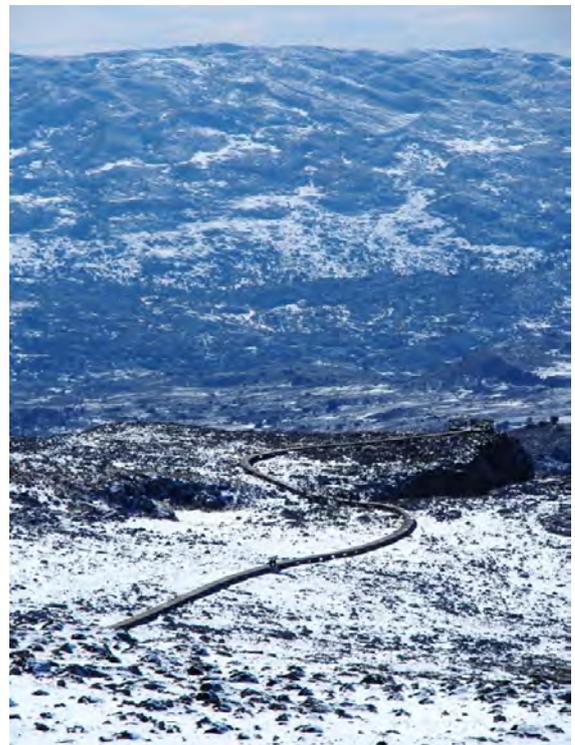


Figura 7. Pasarela y mirador del Cerro de las Cabras, al fondo, los campos de dolinas del Cerro de las Viboras.

Subiremos al autobús y retornaremos por la misma ruta hacia los manantiales de Río Frío (**Parada 5**), en la parte noroccidental de la sierra. Aquí surge un grupo de manantiales que se activan y desactivan en función de la precipitación caída sobre el acuífero.

Daremos un corto paseo circular desde el manantial de la Trucha hacia el del Martinete y hacia la caseta de toma para el abastecimiento a la pedanía. Circularémos por una vereda alta desde donde se contempla el valle del río Frío y volveremos por la orilla del mismo, donde observaremos restos de edificaciones y molinos de aprovechamiento de las aguas y distintos nacimientos en las márgenes del río, que van incrementando su caudal. En la zona del Martinete se explicarán las características especiales de este conjunto de manantiales y las diferencias con los anteriormente observados.

EL ENTORNO GEOLÓGICO

La Sierra de Loja está situada en la parte central de la Cordillera Bética, en sus zonas externas. Este relieve principal del sur de la Península Ibérica se extiende desde Alicante hasta la provincia de Cádiz y continúa al otro lado del Estrecho de Gibraltar en la Cordillera del Rif (Marruecos). La formación de la Cordillera Bética tuvo su origen en la colisión entre tres placas tectónicas: la placa Ibérica, la placa africana y la pequeña placa de Alborán.

La sedimentación en el margen continental Ibérico estuvo controlada por varios episodios de extensión que generaron una serie de zonas deprimidas y elevadas desde el Triásico superior. Las rocas de la Sierra de Loja pertenecen al dominio Subbético Interno. Se depositaron en una zona elevada (umbral) dentro de la cuenca marina, en la zona más alejada del continente emergido. Era una zona de escasa subsidencia que en determinadas épocas estuvo parcialmente emergida (Triásico).

La placa de Alborán, que hoy constituye las zonas internas de la cordillera (Sierra Nevada, Sierra de los Filabres y otras zonas adyacentes), actuó como una pala excavadora deformando y apilando las rocas sedimentarias depositadas sobre el margen. Este empuje produjo un cinturón de pliegues y fallas inversas de dirección ENE-OSO despegado de su basamento, mucho más resistente, y limitado al sur por las zonas internas y al norte por la cuenca sedimentaria del Guadalquivir.

Las rocas más antiguas que forman la Sierra de Loja son una potente sucesión de calizas,

depositadas en una plataforma marina somera, las cuales, en su base están dolomitizadas (Lías inferior).



Figura 8. Escala de tiempos geológicos (www.destinogea.es)

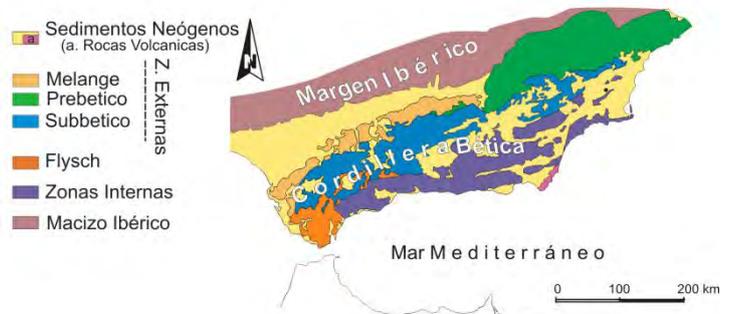


Figura 9. Dominios geológicos de la Cordillera Bética.

Sobre estas calizas masivas se disponen calizas con nódulos de sílex y calizas nodulosas de poco espesor (Jurásico medio y superior) depositadas en zonas alejadas de la costa (facies pelágicas). Siguen unas calizas margosas blancas y rosáceas del Cretácico inferior y del Cretácico superior al Paleógeno, respectivamente, las cuales son muy poco permeables que se superponen a los materiales jurásicos en los bordes de la sierra y localmente en la parte central, dando lugar a los límites impermeables del acuífero.

EL ACUÍFERO DE SIERRA GORDA

El conjunto de la secuencia jurásica constituye el acuífero de la Sierra de Loja y se dispone sobre arcillas triásicas con evaporitas (yesos fundamentalmente) con baja permeabilidad que afloran ampliamente al norte de la sierra. Se estima que el espesor máximo de los carbonatos supera los 2.500 metros en la parte oriental de la sierra disminuyendo drásticamente hacia el oeste y hacia el norte.

La Sierra de Loja está deformada por pliegues de dirección N-S asociados a fallas inversas con la misma dirección, inclinadas hacia el este. Estas estructuras son oblicuas a la dirección regional de los pliegues y cabalgamientos en las zonas externas. Las principales elevaciones de la sierra coinciden con una de estas fallas inversas y tiene asociado un anticlinal en su bloque de techo y un sinclinal en su bloque de muro (Figura 11). Estas estructuras tienen importancia desde el punto de vista hidrogeológico. Las rocas triásicas, que suponen la base del acuífero, están muy cerca de la superficie topográfica en la zona del anticlinal y muy profundas en la zona del sinclinal, lo que ocasiona una barrera al flujo del agua subterránea y hace que este se divida. Una parte del agua subterránea fluye hacia Riófrío y otra hacia la ciudad de Loja y sectores adyacentes.

La Sierra de Loja o macizo de Sierra Gorda es un conjunto montañoso calizo que se extiende desde Loja a Zafarraya. En planta, la sierra dibuja una gran forma ovalada (Figura 11) muy diferente a las crestas alargadas que muestran otras sierras cercanas. Por extensión, los hidrogeólogos hablamos del acuífero de Sierra Gorda, que coincide en gran medida con el macizo homónimo, incluyendo además la parte occidental de la llamada Sierra de Alhama y, según los últimos datos disponibles, parte del Hacho de Loja. Su altitud media es próxima a 1.300 m sobre el nivel del mar, alcanzándose la cota máxima (1.671 m) en el Cerro de Santa Lucía, y

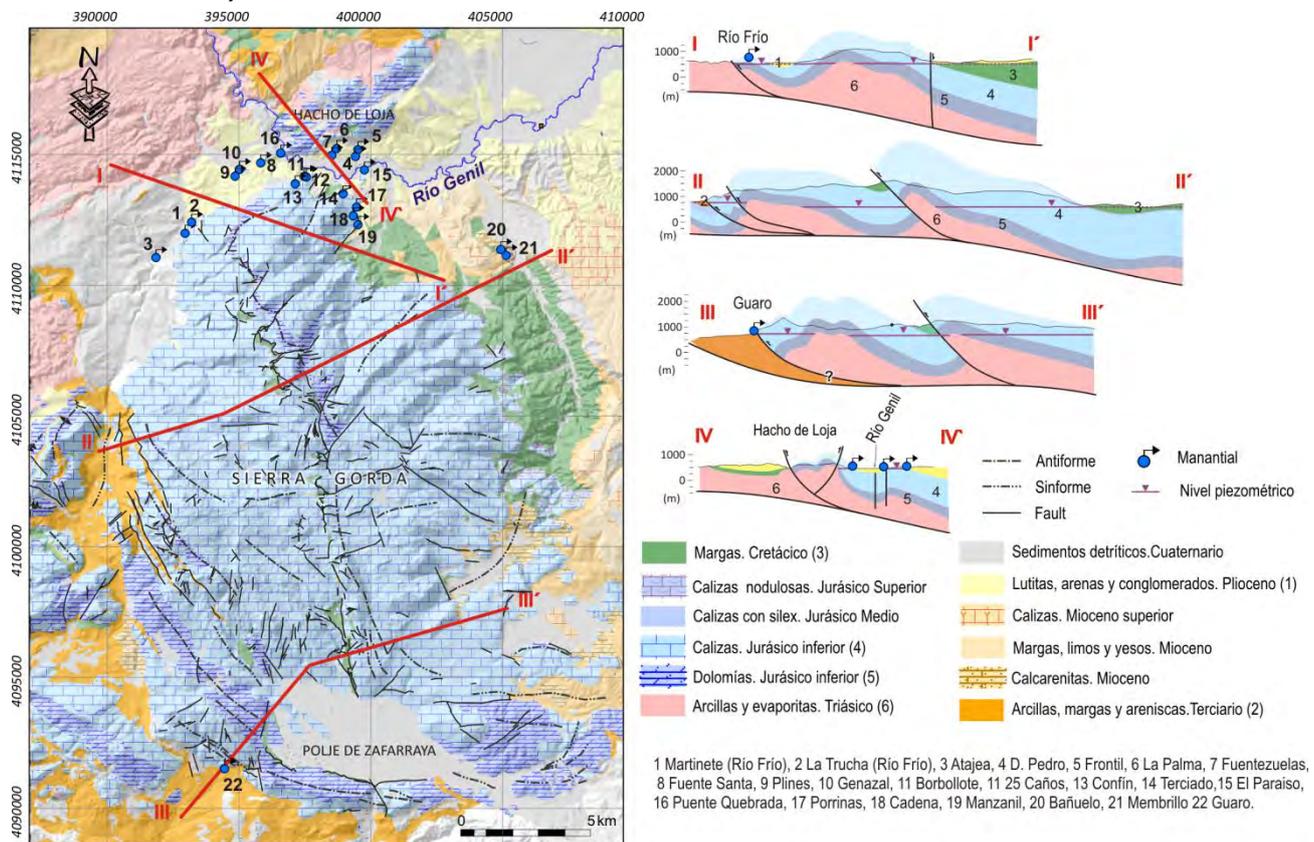


Figura 10. Situación de los principales manantiales del entorno de Loja.

mínima en el valle del río Genil (~ 450 m), en Loja. Este valle marca aproximadamente el límite del acuífero por el norte, mientras que

al este y al oeste son los valles de dos de sus afluentes, el barranco de Salar y el valle del río Frío, respectivamente. En la parte meridional encontramos la depresión de Zafarraya -que también forma parte del sistema acuífero ya que el arroyo de la Madre, que la recorre, vierte sus aguas al mismo a través de sumideros- y todavía más al sur la depresión de Colmenar-Periana, ya en la comarca malagueña de la Axarquía, donde los drenajes principales corresponden a los ríos Guaro y Vélez.

subterráneo, sale al exterior en los sectores más bajos del macizo, a través de numerosos manantiales (bien identificados) o con descargas directas a los ríos (difíciles de identificar visualmente). El drenaje se localiza principalmente en el borde norte del macizo, entre la Venta del Rayo y Salar pasando por la ciudad de Loja, si bien existe un flujo de agua menor (inferior al 10 % del total) hacia el sur, que aflora esencialmente en la aldea de Guaro, una pedanía de Periana.



Toda esta gran mole de rocas calizas y dolomíticas, de casi 300 km² de extensión, absorbe aproximadamente la mitad del agua de lluvia que cada año cae sobre ella, lo que viene a suponer unos 135 millones de metros cúbicos de agua, por término medio. Ese enorme volumen de agua se infiltra a grandes profundidades y, tras su recorrido

Generalmente, en los acuíferos como el de Sierra Gorda se diferencian dos zonas en profundidad: una primera zona más superficial denominada zona vadosa o zona no saturada, en la cual los poros, fisuras y huecos de las rocas no suelen estar completamente colmatados de agua y, si lo están, es por agua que no se encuentra

retenida en la roca sino en tránsito hacia las partes más profundas; y una segunda zona denominada zona saturada o manto freático, que corresponde a la parte del acuífero situada bajo un nivel por debajo del cual todos los poros y huecos se encuentran saturados de agua que no se encuentra estancada, sino en movimiento hacia los manantiales y puntos de descarga. El espesor de la zona no saturada en gran parte del acuífero de Sierra Gorda, dado su carácter montañoso, es superior a 700 m. Por ello, los ganaderos de la sierra se ven abocados a construir aljibes que recogen el agua de lluvia para abreviar al ganado, ya que perforar y extraer el agua a esas profundidades es excesivamente costoso. Algunos pequeños manantiales, de no más de medio litro por segundo de caudal, y dispersos por la parte alta de la sierra (Fuente del Espino, Fuente Alta, Fuente Baja, Fuentecilla del Pozuelo, Charco del Ranchuelo, etc.), constituyen verdaderos oasis para las plantas y la fauna acuática. Estos manantiales responden a la existencia de niveles de agua subterránea poco importantes colgados muy por encima de la zona saturada y del nivel freático principal debido a la existencia de retazos de rocas margosas impermeables entre las calizas que impiden que el agua percole a mayor profundidad. Pero estas manifestaciones hidrológicas son anecdóticas en la sierra; por lo general, el agua brilla por su ausencia en las altas cotas ya que estos terrenos son muy permeables.

Estudiar cómo el agua de lluvia infiltrada circula por el interior de la tierra, qué caminos sigue, qué procesos afectan a su composición y a sus características físicas, es una tarea apasionante, ya que se trata de desvelar algo que suele discurrir oculto a la vista, y es la tarea que ocupa a los hidrogeólogos. En el acuífero de Sierra

Gorda se vienen realizando estudios hidrogeológicos desde hace más de cinco décadas. A menudo, en dichos estudios se suele emplear la denominación de “acuífero kárstico” de Sierra Gorda. Dicho apelativo hace referencia al tipo de rocas (carbonatadas) y a la morfología del terreno que corresponde a un paisaje o relieve típicamente kárstico, tanto en el exterior (formas kársticas como dolinas, lapiaz, poljes, etc.) como en el interior (cuevas, simas, espeleotemas, etc.).



Figura 12. Esquema que explica la diferente productividad que presentan los pozos en los acuíferos kársticos.

Un aspecto muy típico del comportamiento del agua subterránea en los acuíferos kársticos son las grandes diferencias en los rendimientos de los pozos, incluso aunque estos se encuentren muy cercanos: mientras que algunos son capaces de suministrar caudales de varios cientos de litros por segundo con poco descenso del nivel freático, otros apenas permiten la extracción

de agua. Este fenómeno es debido al proceso de karstificación en profundidad, es decir a la disolución de las rocas calizas que lleva a cabo progresivamente el agua subterránea, ensanchando en profundidad las grietas y fisuras por las que pasa hasta formar grandes conductos. Cuando un pozo corta uno de esos conductos (no tiene por qué ser una gran cavidad, basta con una fisura de pocos centímetros de apertura) su rendimiento suele ser espectacular. La misma explicación podemos dar a las grandes diferencias que se suelen apreciar en los registros de nivel freático en diferentes pozos excavados en un mismo acuífero kárstico. En la figura 13 se muestran los registros realizados en los últimos años en diversos puntos de control del acuífero kárstico de Sierra Gorda, en los cuales, aparte de observarse una tendencia al descenso en todos los casos debido al periodo de sequía que atravesamos, vemos que algunos pozos responden pausadamente a las lluvias, con subidas y bajadas de nivel suaves, mientras que otros lo hacen con gran brusquedad. Estos últimos se corresponden con perforaciones que han encontrado conductos kársticos por los que el agua circula rápidamente cuando llueve de forma apreciable. Estos fenómenos los conocen muy bien los espeleólogos, los cuales saben del riesgo que corren de quedar aislados o atrapados en galerías subterráneas por los ascensos repentinos del nivel del agua en momentos de lluvias intensas.

A pesar de todo, hay que desechar la idea ampliamente extendida de que “las sierras calizas están huecas”. Los estudios realizados en Sierra Gorda apuntan a que la porosidad efectiva del acuífero ronda el 2 %, lo que quiere decir que 1 metro cúbico de roca puede contener aproximadamente 20 litros de agua. No está mal, aunque no son estos los terrenos más porosos que existen. Lo

que sí es cierto es que la mayor parte del agua subterránea a nivel de la zona saturada se encuentra en poros y grietas que son difíciles de observar a simple vista; los conductos kársticos, si bien son capaces de transmitir grandes volúmenes de agua y a gran velocidad, son tan anecdóticos que apenas almacenan grandes cantidades de ella.

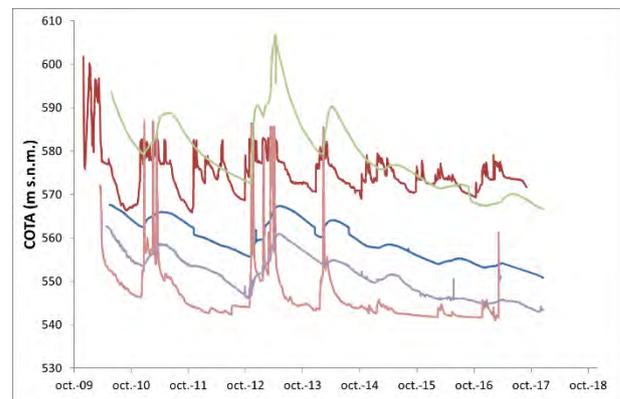


Figura 13. Registros de evolución del nivel piezométrico en varios sondeos situados en el entorno de Loja.

Hablando de velocidades de flujo, en Sierra Gorda se han realizado diversos estudios de inyección de trazadores. En estos ensayos se introduce un colorante u otra sustancia inocua, bien en sumideros o en pozos, y se registra su paso por diversos manantiales. Las velocidades obtenidas en dichos estudios, muy variables dependiendo lógicamente de la permeabilidad puntual de los terrenos y de las condiciones climáticas en el momento de los ensayos, están comprendidas entre 50 y 1.300 metros al día. En cualquier caso, se trata de velocidades muy altas para el flujo del agua en un acuífero, y ese hecho hace que estos medios hidrogeológicos sean altamente vulnerables a la contaminación, pues los contaminantes no tendrían tiempo de ser depurados de forma natural en el subsuelo dado su bajo tiempo de permanencia.

PARADA 1. EL MANANTIAL DEL FRONTIL

En los acuíferos kársticos carbonatados, los manantiales suelen situarse al pie de los relieves, normalmente en los puntos de cota más baja. El manantial del Frontil cumple estas características, pero presenta otros rasgos anómalos que dificultan su interpretación. Se sitúa al pie del afloramiento de carbonatos que forma la Sierra del Hacho, en la margen contraria del río Genil en la que se encuentra el límite de la Sierra de Loja.



Figura 14. El manantial del Frontil y la Sierra de Loja al fondo.

El caudal medio anual que surge por el manantial entre los años 2012 y 2017 ha sido de 325 L/s, con un máximo de 410 L/s y un mínimo de 255 L/s. Este es un caudal muy elevado y muy estable para un manantial asociado a un acuífero kárstico tan pequeño como es el Hacho de Loja, de tan solo 9 km² de extensión. Para que el manantial pudiera existir con estas características la precipitación en el Hacho de Loja debería ser superior a 2.000 mm anuales y sin periodos secos a lo largo del año. En Loja, la

precipitación media es actualmente de unos 510 mm anuales y el verano suele ser muy seco. No es posible, por tanto, que la procedencia del agua que nace en el Frontil sea la Sierra del Hacho. Podríamos suponer que el agua viene de zonas lejanas y asciende por fracturas profundas que afectan al terreno en que se sitúa el manantial. Pero en estos casos, que existen en la naturaleza, el agua siempre tiene una temperatura elevada y también una salinidad elevada. La temperatura del agua del manantial del Frontil es de 16,6°C, solo ligeramente superior a la temperatura media del aire en Loja, que es de 16,1°C, y su conductividad eléctrica, que está en relación con las sales disueltas en el agua, es de 550 $\mu\text{S/cm}$, ligeramente superior a la que tienen el resto de manantiales que nacen en Loja, en la margen izquierda del Genil. De hecho, el agua es perfectamente potable y se utiliza para abastecimiento de los barrios de Loja situados en esta margen del Genil.

La similitud en el contenido de las sales disueltas en estas aguas con el resto de manantiales de Loja es una prueba de que sus aguas proceden del mismo acuífero.

Pero hay más pruebas y están en la propia molécula de agua que surge por el manantial. Como es bien conocido, una molécula de agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, pero no todos los átomos de oxígeno ni de hidrógeno son iguales, ya que están formados por diferentes isótopos estables. Veamos qué significa esto: la mayor parte de los átomos de oxígeno que hay en el agua, del orden del 99,7 %, tienen

16 neutrones (^{16}O); aproximadamente un 0,2 % tiene 18 neutrones (^{18}O) y otra pequeña proporción tiene 17 neutrones. Con el hidrogeno ocurre algo similar.

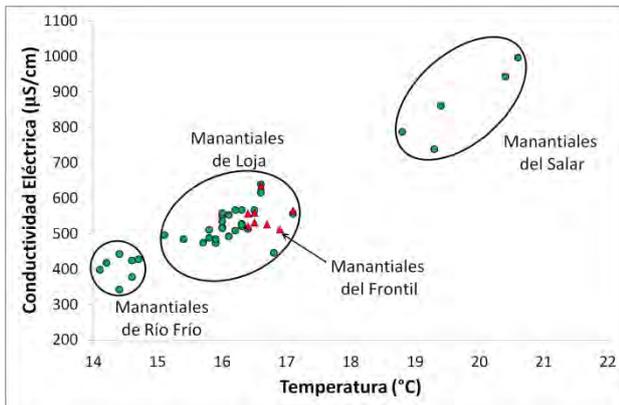


Figura 15. Relación entre la temperatura y la conductividad eléctrica del agua en los manantiales de la Sierra de Loja.

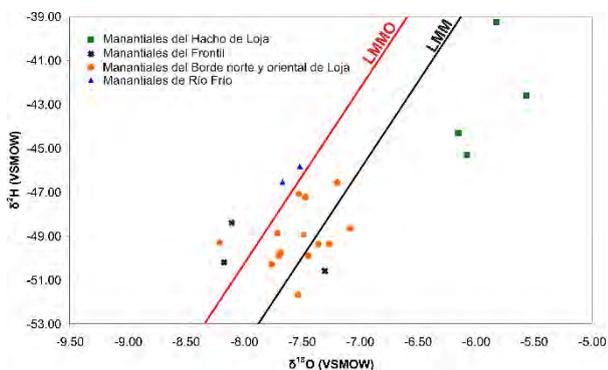


Figura 16. Relación entre los valores isotópicos del agua entre los manantiales de la Sierra de Loja y los del Hacho de Loja

En hidrogeología se estudian las relaciones que hay entre el ^{18}O y el ^{16}O , y las que hay entre el ^2H (también llamado Deuterio) y el ^1H . Así, la mayor o menor abundancia del primero frente al segundo, en los dos casos, es provocada por una serie de procesos que finalmente permiten diferenciar tipos de aguas. En un mismo acuífero es posible diferenciar aguas que han precipitado sobre la superficie del acuífero a diferentes altitudes. Por ejemplo, un agua que cayó en el acuífero

a una cota media de 800 m tiene una composición isotópica diferente de otra que cayó a una cota de 500 m. Esto nos puede servir para distinguir aguas de dos acuíferos en los que las cotas a las que el agua se infiltra son distintas. Pues bien, el agua del manantial del Frontil tiene similar composición isotópica a la del resto de manantiales de la Sierra de Loja y es diferente a la de los manantiales de las laderas E, N y O de la Sierra del Hacho. Además, se corresponde con aguas precipitadas a cotas del orden de 1.300 m que son a las se encuentran los campos de dolinas y lapiaz de la Sierra de Loja, que veremos en la parada 4. En el Hacho de Loja las cotas de recarga se encuentran entre 800-900 m.

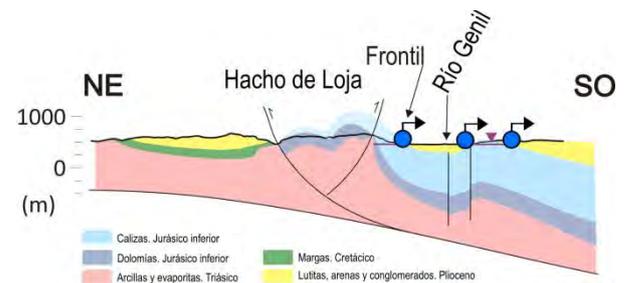


Figura 17. Corte geológico que muestra la relación entre el Hacho de Loja y la Sierra de Loja.

La información que se obtiene del agua que surge por el Frontil nos dice que fue infiltrada en la Sierra de Loja; ha tenido, por tanto, que cruzar bajo el río Genil, sin mezclarse con el agua que circula por el río, para poder llegar hasta aquí sin apenas alteración en su contenido en sales. Además, no ha podido circular a mucha profundidad, pues su temperatura es solo ligeramente superior a la del resto de aguas que nacen al otro lado del río.

PARADA 2. LOS INFIERNOS DE LOJA

Allí donde las aguas de los manantiales se unen al río Genil se observan unas espectaculares formaciones aterrazadas de rocas denominadas travertinos o tobas, que dan lugar a esplendidas cascadas. Estas formaciones son especialmente llamativas en dos zonas: los Infiernos Altos y los Infiernos Bajos. Los primeros se encuentran justo antes de que el río Genil atraviese la ciudad de Loja y se relacionan con las aguas drenadas por los manantiales del borde oriental de la Sierra de Loja y del Frontil. Los Infiernos Bajos han sido formados por las aguas drenadas por los manantiales de Plines y Genazar, al oeste de Loja. En esta parada visitaremos los Infiernos Altos.



Figura 18. El río Genil a su paso por los Infiernos Altos.

Cuando el agua procedente de las precipitaciones se infiltra en un acuífero carbonatado se carga en CO_2 que, en gran parte, es adquirido en el propio suelo. Este CO_2 hace que el agua adquiera mayor agresividad frente al carbonato y provoca su disolución hasta que se establece un equilibrio físico-químico entre el contenido en bicarbonato y el contenido en CO_2

disuelto en el agua. Cuando esta agua entra en contacto con la atmósfera de nuevo al surgir por los manantiales, puede perder parte de este CO_2 , sobre todo si se agita al discurrir por un cauce turbulento, y aún más si se despeña en una cascada. La pérdida de este gas desequilibra de nuevo el agua, lo que provoca la precipitación de carbonato cálcico que ocurre alrededor de la vegetación de las riberas por donde el agua circula con rapidez, o con formas esferoidales construidas por cianobacterias (oncolitos) cuando el agua está con fuerte agitación.



Figura 19. Aspecto de los travertinos depositados en zonas de talud en los Infiernos de Loja.

En las superficies de las terrazas de travertinos que forman los Infiernos podemos ver estas formas esferoidales, y en los taludes las morfologías que son consecuencia de la precipitación alrededor de la vegetación en cascadas y cauces turbulentos.

En ambos márgenes del río Genil se observan terrazas formadas a distintas alturas que dan lugar a un relieve escalonado y simétrico, ya que las superficies de las distintas terrazas están a la misma cota a un lado y al otro del cauce. Esto es una consecuencia de la evolución de la red fluvial provocada por los cambios en el nivel del mar ocurridos

durante el Cuaternario, debidos a la sucesión de periodos fríos (glaciaciones) y cálidos. Los periodos cálidos favorecen la formación y el crecimiento de los travertinos en las gruesas terrazas que observamos. En los periodos fríos, el brusco descenso del nivel del mar provoca que el río se encaje en estas terrazas y las deje colgadas sobre su cauce. Esto además tiene otra consecuencia, los bordes de los acuíferos son erosionados y los manantiales pueden ir descendiendo de cota.

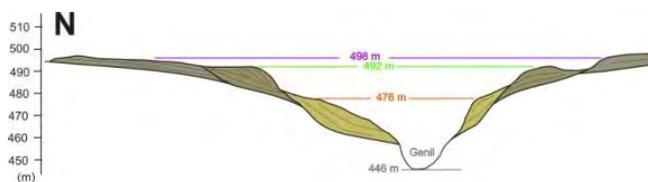


Figura 20. Situación de distintas generaciones de terrazas de travertinos en los Infiernos de Loja.

Las glaciaciones durante el final del Cuaternario (desde hace unos 800.000 años) se han ido sucediendo de forma cíclica, aproximadamente cada 100.000 años. En la margen derecha del Genil se observan al menos 5 terrazas y 4 en la izquierda, esto nos da información sobre donde se situaban los manantiales hace cientos de miles de años y también cuando empezaron a surgir. Existen formas de conocer la edad a la que se formaron los travertinos. El método más común es mediante el estudio de la serie de Uranio-Torio, que permite precisar la edad

de las rocas con menos de 500.000. Gracias a estas terrazas se puede, por tanto, reconstruir la evolución de las zonas de descarga del acuífero desde hace cientos de miles de años hasta la actualidad.

PARADA 3. EL MANANTIAL DEL MANZANIL

En el borde nororiental de la Sierra de Loja, nacen una serie de manantiales donde los carbonatos que forman el acuífero se hunden por debajo de otros materiales de baja permeabilidad más modernos. Los tres manantiales que nacen aquí son el manantial de Porrinas, el de menor cota, el de la Cadena que es utilizado por la envasadora de aguas del Parque de la Presa y el Manzanil, el más elevado. Este último es conocido también como las Pasaderas y como la Cueva de la Perra. Cuentan que este nombre se debe a que durante una gran sequía en la que el agua dejó de manar, la covacha donde nace el manantial fue utilizada por una perra para parir.



Figura 21. Zona de surgencia del manantial del Manzanil.

El nacimiento se sitúa justo en el contacto entre estratos de calizas nodulosas del Jurásico superior y margas y margocalizas del

Cretácico inferior. Las calizas son permeables y permiten que el agua circule por sus discontinuidades, fallas, fracturas y superficies de estratificación. Las margas son impermeables y no dejan pasar el agua a través de ellas, formando una barrera al flujo. Esta barrera hace que el agua salga a la superficie.

El manantial surge a favor de las discontinuidades que separan los estratos (superficies de estratificación) y discurre sobre las margas cretácicas hasta desembocar en el río Genil, formando la bella cascada de la Cola de Caballo en los Infiernos de Loja (parada 2).

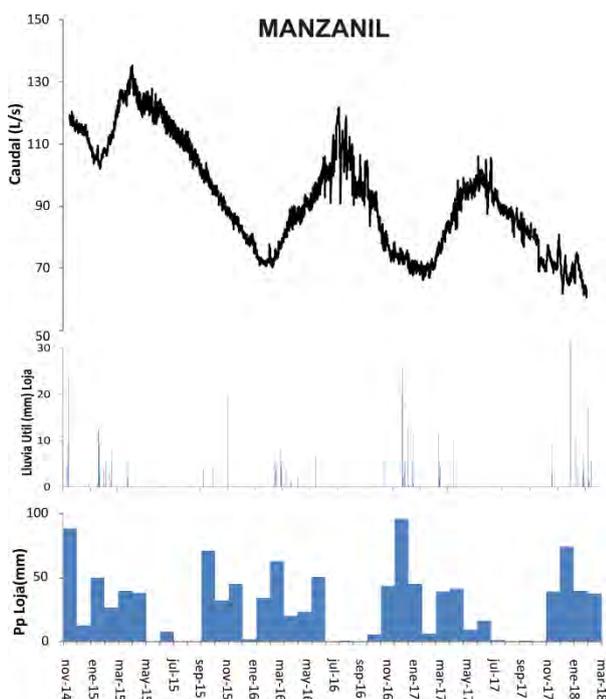


Figura 22. Curva de caudal del manantial del Manzanil, precipitaciones mensuales registradas en la estación agroclimática de la Junta de Andalucía en Loja y Lluvia Útil diaria.

Justo en el nacimiento se construyó una **estación de aforo** que consiste en un canal con un vertedero en “V” donde se mide la altura de la lámina de agua mediante un sensor de presión, que toma una medida y la

almacena cada hora. Esta altura se transforma en caudal a partir de una expresión matemática. De esta forma podemos saber cómo varía el caudal de forma casi continua. La variación del caudal nos da información sobre la forma y la velocidad a la que el agua circula por el acuífero, ya que puede ser comparada con la lluvia que cae en el mismo, que se mide en estaciones meteorológicas. Así es posible conocer la respuesta que un evento de lluvias o nieve caída sobre la sierra produce en el manantial. Algunos manantiales, que se denominan manantiales kársticos lo hacen bruscamente y en tan solo unos pocos días, otros lo hacen lentamente y tardan meses. Esto está relacionado con la mayor o menor permeabilidad de las rocas y con el grado de karstificación que presentan, es decir, con el grado de disolución que han sufrido las discontinuidades, que da lugar a la existencia de cuevas y simas.

Este manantial tiene mucha inercia y gran desfase frente a las lluvias, el efecto de las precipitaciones se prolonga durante meses, lo que hace que tenga ciclos de ascensos de caudal en primavera-verano y descensos en otoño-invierno. La amplitud de estos ciclos depende de si el año ha sido más o menos húmedo y su periodo es anual. La mayor parte de los manantiales que nacen en el entorno de Loja y en el borde oriental tienen un comportamiento de este tipo. En cambio, en el borde occidental, en la zona de Ríofrío, que se visitará en la parada 5, la respuesta a las lluvias es mucho más rápida, como veremos después.

PARADA 4.1 LAS DOLINAS Y EL LAPIAZ

Hay varios aspectos que llaman la atención cuando ascendemos a las partes altas de Sierra Gorda. El más inmediato es la ausencia generalizada de vegetación, lo cual es debido fundamentalmente a la situación actual de suelos pobres y poco desarrollados sobre los terrenos calizos, a la tala y quema indiscriminadas de bosques, al sobrepastoreo, a la actividad minera y a las duras condiciones climáticas que debieron existir en la sierra en los períodos fríos coincidentes con las últimas glaciaciones del periodo Cuaternario.



Figura 23. Dolinas alineadas en el Cerro de los Frailes y superficies de lapiaz en el primer plano.

Otro aspecto llamativo es el aplanamiento que presenta el macizo, pues, quitando las fuertes pendientes de los flancos de la sierra, su zona central muestra bastantes extensiones llanas sobre las que emergen esporádicamente cerros de morfología cónica, con aspecto de ser los residuos de una etapa de intensa erosión. Efectivamente, el paisaje kárstico de Sierra Gorda es el producto de una larga historia evolutiva, que comienza hace aproximadamente nueve

millones de años, cuando el macizo emerge por primera vez por encima del nivel del mar y se expone al ataque de los elementos naturales: agua viento, nieve, ácido carbónico procedente de la actividad vegetal, etc. En ese largo periodo de tiempo, la climatología ha cambiado drásticamente -no solo en esta sierra, sino en toda la Cordillera Bética-, alternando episodios de clima tropical, mediterráneo húmedo o intensamente frío característico de zonas periglaciares.

Otro rasgo que llama poderosamente la atención son los kilómetros y kilómetros de afloramientos pedregosos, agrestes y de gran rugosidad, salpicados por todas partes de pequeñas depresiones de forma aproximadamente circular, a modo de hundimientos. Estos últimos, citados en la literatura especializada como dolinas (torca es un término que se utiliza también en España), constituyen el rasgo más destacado del paisaje kárstico de Sierra Gorda, existiendo áreas con una densidad de hasta 80 dolinas por kilómetro cuadrado (un auténtico paisaje lunar). Lamentablemente, los extensos campos de dolinas de Sierra Gorda se aprecian mucho mejor desde el aire, no desde tierra. En estudios recientes, se han llegado a identificar más de 3.000 depresiones de este tipo en toda la sierra, la mayoría situada en torno a 1.300 m de altitud. Los análisis cuantitativos indican que predominan las depresiones de forma circular o ligeramente alargada según la orientación de las fracturas del terreno, de unos 22 m de diámetro y de menos de 10 m de profundidad. En el pico Cabras, algunas de estas depresiones fueron antiguamente acondicionadas con muros y utilizadas como neveros.

Las dolinas se forman por un hundimiento lento y progresivo o por un colapso súbito

del terreno en puntos donde el agua de lluvia o de escorrentía penetra a favor de zonas más fracturadas o fisuradas y ejerce su poder de disolución a cierta profundidad dentro de las rocas. Muchas de ellas dan paso a cavidades de cierto desarrollo por las que circula y penetra el agua cuando llueve, de manera que se comportan como pequeños sumideros.



Figura 24. Pozo de nieve en una dolina del pico Cabras.



Figura 25. Conducto kárstico de sección circular y unos 100 m de profundidad cuya entrada se localiza en una dolina cercana al pico Cabras.

En las partes altas de la sierra también podemos apreciar extensas superficies rocosas acanaladas y rugosas, sobre las que es muy difícil caminar, que constituyen otro tipo de morfología muy típica de los terrenos kársticos. Estas formas, generalmente de

tamaños que van del metro a pocas decenas de metros, reciben el nombre genérico de lapiaz. Aunque existen diferentes tipos de lapiaces, en función de los procesos concretos que los originan, los que podemos apreciar en esta parada son lapiaces de acanaladuras y crestas aguadas, coincidentes con zonas de rocas fisuradas, que se han formado bajo un suelo y una cobertura vegetal que actualmente ya no existen, gracias a la acción del dióxido de carbono procedente de la actividad vegetal y de la descomposición de la materia orgánica, el cual disuelto en el agua de percolación ataca y corroe las rocas calizas y ensancha las fracturas originales.

Dolinas y lapiaces constituyen formas superficiales de karstificación que se originan por efecto del agua de lluvia y de su infiltración. En consonancia con ese origen, estas formas del relieve son las responsables de que en las partes altas del macizo de Sierra Gorda no existan arroyos u otros cursos fluviales, o que los que existen nunca lleven agua, y de que una buena parte del agua de lluvia, en torno al 50 % de media (la otra mitad es agua que retorna a la atmósfera por evaporación y transpiración), se infiltre y alimente los manantiales situados en las partes bajas del acuífero.

PARADA 4.2 LA ESTRUCTURA DEL ACUÍFERO

Desde el mirador del Tajo de las Buitreras podemos observar una espléndida panorámica de las partes más elevadas de la Sierra de Loja. La pared vertical sobre la que se ubica el mirador tiene casi 100 m de desnivel. El tajo se extiende en dirección N-S como una cicatriz que afecta a gran parte de la Sierra. Esta cicatriz es consecuencia de un pliegue anticlinal seguido de otro sinclinal y afectado por una falla inversa. La falla inversa provoca que las calizas del jurásico se monten sobre materiales más blandos (margas) del Cretácico, es decir más modernos. Esas margas tienen baja permeabilidad y en la estrecha banda en la que se han preservado, junto al bloque hundido de la falla, impiden que el agua de precipitación penetre por el terreno. Esto hace que, en las zonas deprimidas, se formen pequeñas lagunas como la denominada Charca del Negro, de gran importancia ecológica ya que sostiene una población de un raro anfibio: los gallipatos.

La existencia del pliegue anticlinal en el bloque superior tiene consecuencias en el funcionamiento hidrogeológico del acuífero, pues provoca que su sustrato impermeable, formado por arcillas del Triásico, se eleve, lo que ocasiona una divisoria en el flujo de agua subterránea. El agua de la precipitación que se infiltra en el bloque hundido de la falla, circula hacia el norte alimentando los manantiales de Ríofrío y la Atajea, mientras que el agua infiltrada en el bloque levantado,

de mucha mayor extensión lo hace hacia los manantiales del entorno de Loja y de la zona oriental.

La falla inversa descrita no es la única, pues existen otras menores con una dirección similar. Esta estructura de fallas y pliegues está más apretada en la zona occidental de la sierra, donde, además, los carbonatos tienen menor espesor. La consecuencia es que la roca está más fracturada en la zona occidental, delimitada por la falla principal, y menos fracturada en la zona oriental, donde el espesor de los carbonatos alcanza más de dos millares de metros.

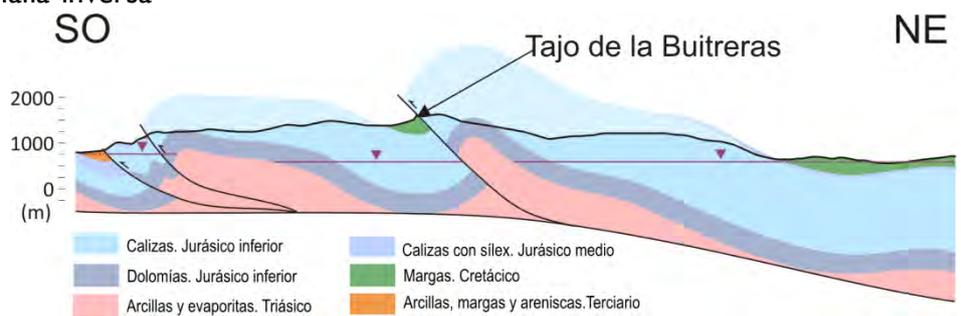


Figura 26. Corte geológico de la zona central de la Sierra de Loja. La línea morada indica la posición del nivel freático.

La mayor fracturación en la zona occidental provoca que la concentración de dolinas en ella sea mayor. Además, el flujo del agua que se infiltra en esta zona es mucho más rápido que en la zona oriental, por lo que los manantiales asociados responden mucho antes a las lluvias, es decir tienen un comportamiento kárstico, mientras que los asociados a la otra zona son mucho más inerciales. El ejemplo de los primeros son los manantiales de Ríofrío, como veremos en la parada 5. Con rápidas crecidas de caudal en los eventos lluviosos y rápidos descensos cuando estos cesan. El manantial del Manzanil, en la parada 3 es un buen ejemplo de manantial inercial. Registra una única

crecida anual cuyo máximo se registra a los 4 meses del periodo lluvioso.



Figura 27. Escarpes de calizas formados por una falla inversa que cabalga a margas del Cretácico.

PARADA 5. LOS MANANTIALES DE RIOFRÍO

El nacimiento de Riofrío, recientemente propuesto por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio para ser declarado Monumento Natural, representa el principal punto de descarga de aguas subterráneas del Acuífero de Sierra Gorda. Realmente no se trata de un único punto, sino de un borde de descarga de aproximadamente 400 m de longitud en el que existen numerosos lugares donde las rocas calizas rezuman agua, algunos de ellos con nombre propio como El Martinete, La Trucha, El Viejo Estanco, La Higuera, El Avellano, etc. En conjunto, el caudal habitual de estas surgencias sobrepasa los 1.100 litros por segundo; aunque, dependiendo del régimen de precipitaciones, el rango de variación del flujo hídrico suele estar entre 300 a más de 3.000 L/s.

Un aspecto destacable de la descarga de aguas subterráneas en Riofrío es la existencia

de manantiales de tipo “trop plein” (“demasiado lleno” en francés). Estos consisten en surgencias situadas a cotas más elevadas que las de los manantiales habituales y que solo entran en funcionamiento estacionalmente, durante épocas de lluvias muy abundantes, llegando a descargar grandes caudales, incluso muy superiores a los de las surgencias permanentes. Obviamente, la puesta en funcionamiento de estos manantiales coincide con una elevación del nivel freático en el acuífero, debido a la infiltración de la lluvia, pero su gran capacidad de evacuación de agua corresponde a su conexión con antiguos conductos kársticos que se desarrollaron en tiempos pasados y que ahora han quedado colgados por encima del nivel normal de las aguas subterráneas en la actualidad.



Figura 28. Surgencia efímera (trop plein) en Riofrío. Foto: Antonio Castillo.

El conjunto de manantiales de Riofrío muestra también respuestas muy rápidas a las lluvias, bastante más que otros sectores de

descarga del acuífero, lo que debe estar relacionado con un mayor desarrollo de conductos kársticos en la parte del acuífero que alimenta a estas fuentes. Esta explicación también nos sirve para justificar el origen del nombre Río Frío, consecuente con una temperatura media del agua relativamente baja (14,1 °C, entre uno y dos grados más baja que otros manantiales de Loja), pues el agua de lluvia que se infiltra en las altas cotas del macizo alcanzaría a gran velocidad los puntos de surgencia sin apenas tiempo para equilibrarse térmicamente con la roca. En la figura 28 se aprecia cómo el nivel freático medido en un pozo situado a menos de 300 m de los manantiales responde rápidamente a las lluvias de finales de noviembre de 2017.

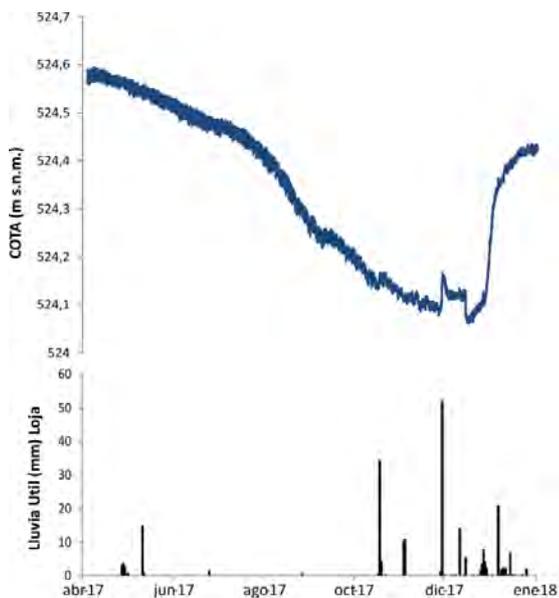


Figura 29. Evolución del nivel freático y precipitación en Loja en un pozo cercano a los manantiales de Río Frío.

Buena parte de los conductos kársticos del acuífero de Sierra Gorda debieron formarse en épocas pasadas, coincidiendo con climas más cálidos y lluviosos que el actual, lo que favorecería la existencia de una cobertera vegetal más densa en la sierra y, por tanto, un mayor aporte de ácido carbónico que disolvería fuertemente las rocas calizas. No

obstante, el proceso químico de corrosión continúa en la actualidad. A partir de los análisis químicos realizados a estas aguas podemos hacer un simple cálculo de la masa de roca evacuada de la sierra solo por estos manantiales, resultando valores del orden de 9.200 toneladas de roca al año, o lo que es lo mismo, unos 3.400 metros cúbicos de roca que se pierden anualmente de la zona que alimenta a las surgencias de Río Frío.

Desde hace tiempo es conocida la riqueza pesquera del río Frío, especialmente en cangrejos y truchas, lo que llevó en los años 60 del pasado siglo a la implantación por iniciativa privada de afamadas piscifactorías. Mucho antes de ello, el aprovechamiento de las abundantes aguas de la zona pasó por su utilización como fuerza motriz para el accionamiento de molinos harineros, batanes y martinets (alguno ya mencionado en el siglo XVII), y en menor medida en su utilización para el regadío (al menos desde el siglo XV) y para el abastecimiento de agua potable. Los restos de muchos de esos ingenios hidráulicos son visibles actualmente gracias a la labor de desbroce de la vegetación llevada a cabo recientemente.



Figura 30. Restos de antiguas edificaciones relacionadas con el agua de Río Frío (molinos, batanes y martinets) salpicados de manantiales.

CONSIDERACIONES SOBRE EL HIDROGEODÍA- GRANADA 2018

Se ruega puntualidad.

Llevar bebida y algo para comer (bocadillo).
Llevar calzado cómodo para caminar por la sierra.

Es recomendable informarse de las condiciones meteorológicas para llevar: gorra y crema solar, paraguas, chubasquero, etc.

Muy recomendable llevar cámara de fotos.

El lugar de finalización de la excursión será el mismo que el de salida.

La hora de regreso es aproximada (15.00-15.30 h).

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a las entidades que han apoyado y/o patrocinado el Hidrogeodía 2018-Granada: Unidad del Instituto Geológico y Minero de España en Granada, Diputación Provincial de Granada, Universidad de Granada, Conoce Tus Fuentes, Ayuntamiento de Loja, Protección Civil de Loja, Parque de la Presa y Agua Mineral Natural Font Natura.

COLABORADORES DEL HIDROGEODÍA GRANADA 2018

Gema Alcaín Martínez (DPG)

Sara Awad Serrano (UGR)

Ángela María Blanco Coronas (UGR)

Francisca Fernández Chacón (IGME)

Antonio González Ramón (IGME)

Jorge Jiménez Sánchez (IGME)

Manuel López Chicano (UGR)

Carlos Marín Lechado (IGME)

Sergio Martos Rosillo (IGME)

Antonio Pedrera Parias (IGME)

Tomás Peinado Parra (IGME)

Virginia María Robles Arenas (CTF)

Emilio Rodríguez Contreras (DPG)

Ana Ruiz Constán (IGME)

PARA SABER MÁS....

Diputación de Granada-IGME (2006). Guía de manantiales de la provincia de Granada. Una visión sobre su origen y naturaleza.

González-Ramón, A., López-Chicano, M., Durán-Valsero, J. J., Pedrera, A., Ruiz, A., & Gázquez, F. (2015). Estudio de las variaciones temporales y espaciales isotópicas e hidroquímicas del sulfato para la caracterización del movimiento del agua subterránea en acuíferos kársticos. El caso del acuífero de Sierra Gorda, S de España. *Málaga*, 4(6).

González-Ramón, A., López-Chicano, M., Gázquez, F., Durán-Valsero, J. J., Pedrera, A., Ruiz-Constán, A., & González-Egea, E. (2017). Isotopic and hydrochemistry spatial variation of sulfate for groundwater characterization in karstic aquifers. *Hydrological Processes*, 31:3242–3254

González Ramón, A., Peinado Parra, T., & Luque Espinar, J. A. (2012). Caracterización hidroquímica temporal y espacial del borde norte del acuífero de Sierra Gorda (Loja, Granada). *Geogaceta*, 52, 129–132.

IGME-Junta de Andalucía. Atlas hidrogeológico de Andalucía.

López Chicano, M. (1992). Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda y su entorno (Granada y Málaga). Univ. Granada.

López-Chicano, M. (1995). El paisaje kárstico de Sierra Gorda. Formas y evolución geodinámica reciente. Espeleotemas, 5, 31–50.

López Chicano, M. y Pulido-Bosch, A. (2002). Síntesis hidrogeológica de los acuíferos de Sierra Gorda, Polje de Zafarraya y Hacho de Loja. Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardenete. Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces. IGME, CHG, IAA (COPTJA), Diputación Provincial de Granada, Madrid, 311-340.

Martín-Vivaldi Caballero, M. E., Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J. A. & Pezzi-Ceretto, M. C. (2016): Geomorphology of the Sierra Gorda karst, South Spain. Journal of Maps, 12, 5: 1143-1151.

Pardo-Igúzquiza, E., Pulido-Bosch, A., López-Chicano, M. & Durán, J. J. (2016). Morphometric analysis of karst depressions on a mediterranean karst massif. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 98, 3: 247-263.