

## APLICACIONES DE LA GEOLOGÍA Y LA HIDROGEOLOGÍA A LOS TRABAJOS DE COOPERACIÓN EN CONTEXTOS DE EMERGENCIA

### *Geology and hydrogeology applied to cooperation on emergency contexts*

Javier Temiño (\*), Luis F. Rebollo (\*\*), Miguel Martín-Loeches (\*\*\*) y Gabriel Luis Miguel (\*\*\*\*)

#### RESUMEN

*La solución del abastecimiento de agua y del saneamiento ambiental requiere el estudio previo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas del territorio.*

*Se plantea un taller a través de grupos de trabajo en los que cada uno constituye un equipo técnico que ha de encontrar la mejor ubicación para un campo de refugiados, dentro de una región preestablecida. Para ello se ha recopilado la información preexistente que consiste en: mapa hidrogeológico de la región, inventario de puntos de agua, sondeos de reconocimiento y geofísica. Con dicha información se pretende encontrar la mejor localización de las fuentes de abastecimiento, de letrinas y de un vertedero para satisfacer las elementales necesidades higiénicas y de ingesta de agua potable en condiciones de salubridad.*

*Esta actividad ha sido exitosamente experimentada como parte de un curso de verano sobre agua y saneamiento ambiental en proyectos de cooperación con alumnos de muy distinta formación geológica.*

#### ABSTRACT

*Water supply and the solution of the sanitation of a certain village need a preliminary study of the geological and hydrogeological conditions of the area. A workshop to deal and to understand these subjects is proposed.*

*The workshop is structured to be coped through several teams of students, in a separate way ; each one of them playing the role of a group of technicians that has the task of the relocation of a refugee camp in a certain region of Africa. They have a package of existing information, composed by hydrogeological map, water points inventory, boreholes with the description of the drilled rocks and geophysics.*

*This information and the derived discussion will lead the students to get a solution for the location of the proper source of water for the refugees, and the correct position for both the latrines and the landfill site. All of these issues have to be well thought in order to cover the basic needs of fresh water provision in sanitary conditions.*

*The described activity was successfully undertaken during a summer course on the topic of water and sanitation in emergencies and development projects, with students of very different geological background.*

**Palabras Clave:** *Geología Aplicada e Hidrogeología, abastecimiento de agua, saneamiento ambiental, residuos.*

**Keywords:** *Applied Geology and Hydrogeology, water supply, sanitation, wastes.*

#### INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El suministro de agua potable en cantidad adecuada es la necesidad básica más acuciante para la supervivencia de las personas y, junto a ello, la protección de su calidad frente a posibles agentes contaminantes. Esas condiciones son especialmente exigibles en situaciones de emergencia, en las que una catástrofe natural, un accidente o una plaga de grandes dimensiones, un conflicto bélico, una hambruna o cualquier otra contingencia o gran desastre demandan la urgente atención de la población afectada. Es frecuente en estos casos que se produzcan desplazamientos masivos de las personas que han sufrido ese

suceso, muchas de ellas en condiciones precarias –económicas, sociales y, sobre todo, de estado físico-, por malnutrición, enfermedad o daño psicológico-, lo que precisa de la ayuda humanitaria y, en general, de la cooperación internacional.

En muchos de estos desastres se hace necesario buscar nuevos emplazamientos o “campamentos de refugiados” (como los denomina el ACNUR – Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados) para que la población afectada pueda ser atendida, alimentada y mantenida, a la vez que pueda recuperarse del trauma vivido y prepararse para iniciar de nuevo sus actividades una vez superado el suceso.

(\*) Dpto. de Geología. Universidad de Alcalá. Madrid, España. javier.temino@uah.es

(\*\*) Dpto. de Geología. Universidad de Alcalá. Madrid, España. luis.rebollo@uah.es

(\*\*\*) Dpto. de Geología. Universidad de Alcalá. Madrid, España. miguel.martin@uah.es

(\*\*\*\*) Dpto. de Geología. Universidad Agostinho Neto. Luanda, Angola. gabrielmig@gmail.com



Entre los trabajos de urgente planificación destacan los estudios de reconocimiento geológico e hidrogeológico, que permitan explorar las posibilidades de suministro de agua en condiciones de calidad y cantidad aceptables para la población desplazada. También se debe evaluar, a partir de estos trabajos de prospección, las posibilidades del territorio para acoger sistemas de saneamiento ambiental para la evacuación de las excretas y, en lo posible, de los desechos generados por el grupo. Esa caracterización del territorio tiene por objeto no sólo resolver la necesidad de suministro de agua potable, sino además proteger las fuentes de abastecimiento de su posible contaminación por aguas fecales y por lixiviados procedentes de los residuos acumulados.

Sobre esta base se plantea el taller que presentamos, con la intención de dar a conocer los fundamentos de este tipo de planificación –imprescindible en las acciones humanitarias de emergencia– y, al mismo tiempo, aplicarlos a la resolución de un caso práctico sencillo, que permita apreciar la importancia del trabajo en equipo para la puesta en común de las observaciones y análisis efectuados y la toma de decisiones colegiada.

Así pues, los objetivos básicos que pretende alcanzar el taller que se presenta abarcan tanto aspectos conceptuales como procedimentales y actitudinales. Son los siguientes:

- Mostrar la utilidad de los conocimientos geológicos para la búsqueda de recursos, ordenación territorial, gestión ambiental...
- Aplicar métodos y técnicas elementales de las Ciencias de la Tierra (análisis del mapa topográfico, elaboración de cortes geológicos, interpretación de perfiles geofísicos y mapas de isopiezas, valoración de datos de calidad del agua...) a problemas concretos.
- Promover el trabajo interdisciplinar y en grupo.
- Fomentar la educación en valores y propiciar la educación ambiental.

Para lograr estos objetivos en tan corto lapso de tiempo como es el de un taller o, en su caso, de una actividad práctica con los alumnos, es preciso trabajar de manera coordinada con la guía o el apoyo de uno o varios tutores, conforme a la metodología que se especifica a continuación.

## METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

La metodología a adoptar en la sesión de taller está basada en las siguientes pautas:

- Exposición teórica sintética, de unos 15 minutos, que introduzca las pautas básicas a tener en cuenta para el desarrollo del taller.
- Aprendizaje cooperativo, mediante el trabajo y la discusión tutelada en grupo. Para ello se establecerán dos, tres o cuatro grupos (según el número de participantes), atendidos cada uno de ellos por un tutor.

- Trabajo multi e interdisciplinar. Se abordarán aspectos básicos de geología, geofísica, hidrología, hidroquímica, planificación territorial...).
- Resolución de preguntas encadenadas que conducen, de forma progresiva, a la solución del problema, cada grupo por separado.
- Presentación, debate y puesta en común, durante unos 15 minutos, de las distintas alternativas de solución propuestas por los grupos participantes.

Así pues, la actividad consiste en la resolución del ejercicio que se presenta, para lo cual se hace necesario el análisis y la discusión en grupo de la situación planteada a través de una serie de preguntas encadenadas que conducirán a una propuesta final. Con la orientación o el asesoramiento del tutor, cada grupo deberá reflexionar sobre las distintas posibilidades que surgirán del análisis de los datos aportados, para acordar una propuesta de resolución que será contrastada y discutida con las correspondientes a los demás grupos de trabajo, a fin de buscar una solución consensuada que facilite la toma de decisiones final.

Esta actividad fue originalmente propuesta y desarrollada con éxito en el marco de un curso universitario de verano sobre “Agua y saneamiento ambiental en proyectos de emergencia y de ayuda al desarrollo” (Rebollo y Martín-Loeches, 2006) con alumnos de muy distinta procedencia y formación, lo que indica que no es imprescindible contar con amplios conocimientos geológicos para poder resolverla adecuadamente.

## PLANTEAMIENTO DEL CASO PRÁCTICO

A continuación se presenta el ejercicio concreto que se pretende resolver a lo largo de la sesión de taller con los alumnos.

*A una zona del África subsahariana han llegado 32.000 refugiados que se han instalado de forma provisional y sin ningún tipo de orientación previa en el sector SE del mapa adjunto (Figura 1), más concretamente entre el río principal y la laguna L-3. Sin control sanitario alguno, cubren sus necesidades de agua a partir del río, de la laguna y del pozo que allí existe. El ACNUR ha decidido reubicarlos en otro sector de la misma región del mapa.*

*La región tiene una pluviometría media de unos 500 mm/año, aunque muy irregularmente distribuida, de forma que en torno al 80% de las precipitaciones se concentran en los meses de otoño e invierno. La economía de la región se basa en la ganadería extensiva y en el cultivo agrícola de algunas parcelas dispersas por la llanura asociada al río principal. No existen núcleos de población en la zona, aunque sí hay algunas cabañas que se usan por pastores.*

*La colaboración de los pastores y agricultores con un pequeño equipo de técnicos extranjeros ha permitido elaborar un estudio hidrogeológico-*



co preliminar de la región. Ha consistido en la elaboración de un mapa geológico a partir de fotografías aéreas y de observaciones de campo, la realización de doce sondeos eléctricos verticales (SEV), la ejecución de tres sondeos de reconocimiento, la elaboración del inventario de los puntos de agua allí existentes y el análisis de la potabilidad del agua en algunos de ellos.

El resultado de estos trabajos de reconocimiento se ha sintetizado en el material que se adjunta en el Anexo: mapa hidrogeológico (Figura 1), cortes hidrogeológicos (Figuras 2 y 3), resultados de los SEV (Tabla 1 e, inventario de puntos de agua (Tabla 2)(ver anexos).

A la vista de la información disponible se pide:

- 1º) Explicar por qué el ACNUR quiere modificar la actual ubicación del campamento de refugiados.
- 2º) Estimar (en m<sup>3</sup>/día) las necesidades de agua para abastecer el futuro campo de refugiados. La dotación mínima en este tipo de asentamientos de población es 15 l/hab/día.
- 3º) Determinar las posibles zonas de captación (ríos, lagunas, manantiales, acuíferos,...) que aseguren agua en cantidad y en calidad natural suficientes para el futuro abastecimiento. Sintetizar los resultados en una tabla (Tabla 4).
- 4º) El saneamiento se resolverá mediante la construcción de unas 100 letrinas comunales de 2 m de profundidad, distribuidas por el interior del campamento. Para evacuar los residuos que se produzcan se construirá un vertedero. Indicar, para cada formación geológica, su mayor o menor adecuación para instalar en ella las letrinas y el vertedero. Sintetizar los resultados en una tabla (Tabla 5).
- 5º) En función de las respuestas dadas a las cuestiones anteriores, seleccionar las formaciones geológicas en que es razonable ubicar el futuro campo de refugiados.
- 6º) Ordenar las posibles captaciones de agua en función de su caudal y de su facilidad de puesta en servicio para el campo de refugiados. Para ello debe tenerse en cuenta que en este tipo de emergencias se consideran inadecuadas las obras caras y/o difíciles de mantener (depósitos de regulación, equipos mecánicos de bombeo, redes de distribución densas, ...); por el contrario, son adecuadas las obras que funcionan por gravedad y que son económicas en su ejecución y mantenimiento (así, se prefieren los manantiales a los pozos y éstos a los azudes, las conducciones cortas a las largas, y también las fuentes públicas).
- 7º) Analizar la información anterior y seleccionar un área apropiada para reubicar el campo de refugiados, que ocupará unos 2 km<sup>2</sup> de superficie.

8º) Valorar la adecuación de la zona seleccionada. Para ello es preciso tener en cuenta los siguientes condicionantes:

*No es posible instalar depósitos de regulación ni bombeos mecánicos.*

*Se debe asegurar el abastecimiento de agua durante todo el año, incluso en los meses secos.*

*La calidad del agua ya debe ser adecuada en la misma obra de captación, ya que no se puede garantizar el correcto funcionamiento de ningún sistema elemental de tratamiento.*

*En caso de captar el agua a partir de manantiales o azudes, su conducción hasta el campo de refugiados será por gravedad y la distribución se hará mediante fuentes públicas dispersas por el interior del campamento. En ambos casos sólo será aprovechable de forma efectiva el 50% del caudal captado; el resto del agua se perderá por no ser aprovechada en las fuentes públicas y por fugas en las conducciones.*

*En caso de captar el agua a partir de pozos, se empleará maquinaria capaz de construir pozos de hasta 20 m de profundidad y de 0,8 m de diámetro. Para extraer el agua sólo se pueden usar pequeñas bombas manuales de pistón, cada una de las cuales es capaz de extraer 1,2 m<sup>3</sup>/hora (considerar un caudal efectivo de 15 m<sup>3</sup>/día) y elevar el agua un máximo de 30 m. En cada pozo pueden instalarse hasta dos de ellas y usarse "in situ" como fuentes públicas.*

*La contaminación que pudieran producir las fosas sépticas o letrinas no debe afectar al abastecimiento de agua.*

9º) Seleccionar un área adecuada para ubicar el vertedero, que tendrá una superficie de 1 ha. Habrá de situarse a más de 1 km del campo de refugiados y no deberá afectar a la calidad del agua de abastecimiento.

10º) Poner en común las distintas soluciones aportadas por los diferentes grupos de trabajo y discutir las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, tratando de llegar a una alternativa consensuada que facilite la toma de decisión de las autoridades.

## CONCEPTOS BÁSICOS NECESARIOS

Para desarrollar adecuadamente la actividad se hace necesario disponer de unos conocimientos elementales de geología, geofísica, hidrogeología, con algunos elementos añadidos calidad del agua. A continuación, a modo de glosario ampliado, se exponen algunos de estos conceptos.

### Riesgo de inundación

El cauce de los ríos, especialmente en sus tramos medios y bajos, transcurre sobre una llanura creada por los sedimentos que el río ha depositado en mo-



mentos de crecida. Estas llanuras se denominan vegas, llanuras aluviales o llanuras de inundación; son las zonas activas del sistema fluvial y están sometidas a episódicas inundaciones que pueden provocar que el cauce cambie de posición dentro de la llanura. El cauce del río puede encajarse en la vega si gana capacidad erosiva. Los restos de llanura de inundación que quedan elevados respecto al río cuando éste se encaja se denominan terrazas fluviales, que al quedar muy por encima de él ya no pueden inundarse.

### Abastecimiento de agua

El abastecimiento de agua es el conjunto de operaciones que permiten poner a disposición de cada habitante de una población agua en cantidad y calidad adecuadas a sus necesidades. Las infraestructuras de abastecimiento generalmente incluyen la captación, la regulación y el transporte del agua hasta los puntos de uso.

El agua puede captarse de un río, bien directamente de su cauce o desde azudes o embalses construidos en él; o del subsuelo mediante pozos o galerías de captación. El agua subterránea también puede aflorar en superficie de forma natural a través de manantiales, que a su vez frecuentemente son objeto de captación para abastecimiento.

El transporte del agua captada se realiza generalmente mediante tuberías, que la conducen desde el punto de captación hasta el depósito regulador. Si la captación está topográficamente más alta que el depósito, el transporte se realiza por gravedad; en caso contrario, el transporte hay que realizarlo elevando el agua mediante bombeo hasta el depósito.

El depósito sirve básicamente para ir almacenando el agua que accede desde la captación en mayor cuantía que la que se precisa (por la noche o en los momentos de poco uso), a fin de poder disponer de agua en cantidad suficiente en los momentos de mayor demanda. Esto permite adecuar mejor la disponibilidad de agua al requerimiento variable de la población, pudiendo disponer temporalmente en los momentos de mayor uso de un caudal superior al que aporta la captación. El depósito debe estar a cota topográfica más elevada que el asentamiento de la población a abastecer.

Al salir el agua del depósito se suele clorar para garantizar la ausencia de microorganismos patógenos, causantes de buena parte de los trastornos y enfermedades ligados a la ingesta de agua. Luego, mediante una red de tuberías y conducciones menores, se distribuye por gravedad el agua hasta las fuentes públicas y, en su caso, a los grifos de las viviendas.

Se considera que el consumo mínimo necesario para cubrir las necesidades humanas más básicas (bebida, higiene, cocina...), es de 7,5 a 15 litros por persona (l/hab) al día (Esfera, 2004), aunque variable en función del clima y de las costumbres de las comunidades (en países desarrollados como España el consumo doméstico medio se sitúa en torno a 150 l/hab/día).

### Criterios básicos de potabilidad y control sanitario del abastecimiento.

La calidad del agua de abastecimiento debe ser tal que se pueda garantizar que el uso del agua no provoque ningún tipo de enfermedad o malestar a los usuarios. Cada país posee unas normas destinadas a asegurar esta calidad (en España éstas se encuentran reguladas por el Real Decreto 140/2003, publicado en el BOE del 21 de febrero de 2003).

El agua puede ser considerada “no potable” por contener microorganismos patógenos y/o por contener compuestos químicos en concentraciones insalubres.

La amenaza más grave –habitual en situaciones de emergencia– es la contaminación causada por las heces (de origen humano o animal). Por ello, en ausencia de otras posibles fuentes de contaminación, se puede considerar el agua apta para el consumo si las determinaciones microbiológicas no dan indicios de contaminación fecal (descartan la presencia de coliformes fecales). Sin embargo, si los estudios hidrogeológicos o la existencia de una actividad industrial o militar en la zona hacen sospechar que el agua puede presentar riesgos químicos o radiológicos para la salud, estos riesgos deben ser valorados de inmediato llevando a cabo análisis químicos.

### Reconocimiento geológico, geofísico e hidrogeológico.

La información geológica básica de una determinada región, como los cuerpos rocosos que se encuentran presentes, su disposición espacial y sus estructuras, se obtiene a partir de su reconocimiento en fotografías aéreas, con el apoyo de observaciones en campo. Estos datos se sintetizan en **mapas geológicos**, los cuales, para completar su información y facilitar su comprensión, se suelen acompañar de **cortes geológicos** representativos.

Un mapa geológico en el que se indica qué rocas o materiales son acuíferos (es decir, formaciones capaces de contener y transmitir agua con facilidad a través de sus poros, grietas o cavidades) constituye un **mapa hidrogeológico** elemental. Esta información hidrogeológica procede de un conjunto de pozos, manantiales y otros puntos con presencia de agua subterránea que se localizan y catalogan durante los trabajos de campo –el llamado **inventario de puntos de agua**–. En ellos se mide la profundidad del agua, a partir de la cual es posible conocer la posición y forma del nivel freático, que se plasma en el mapa hidrogeológico por medio de **líneas isopiezas** (curvas representativas de la cota del nivel freático). Estas líneas permiten conocer la dirección de circulación preferente del agua subterránea (perpendicular a las isopiezas).

A partir del mapa hidrogeológico se puede confeccionar **cortes hidrogeológicos**, en los que se representan los pozos atravesados y los niveles del agua subterránea. Suele realizarse estos cortes exagerando la escala vertical, para que se puedan apreciar mejor los elementos dibujados.

Una forma directa de estudiar el subsuelo y las aguas subterráneas es a través de la realización de



sondeos y catas. Los **sondeos** son perforaciones se realizan con maquinaria específica; el terreno se reconoce al estudiar los testigos continuos o los detritus que se extraen al perforar el subsuelo. Una vez finalizado el sondeo se puede medir la profundidad del agua subterránea, tomar muestras para análisis y realizar ensayos de permeabilidad. Las **catas** pueden hacerse manualmente o con máquinas excavadoras; en ambos casos la profundidad que se puede alcanzar es limitada (generalmente hasta 4 m).

La naturaleza y estructura del terreno también pueden deducirse de forma indirecta, sin realizar perforaciones, a través del uso de **técnicas de prospección geofísica**. Las técnicas que utilizan un campo eléctrico para estudiar el subsuelo son las más empleadas en Hidrogeología, y dentro de éstas los llamados **Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)**. El procedimiento consiste en medir la resistencia (**resistividad**) que ofrecen las distintas capas del subsuelo al paso de la corriente eléctrica que es introducida través de dos barras de hierro clavadas en superficie. A partir de esa resistividad, y de un conocimiento previo de la geología del lugar, se deduce el tipo de material, su espesor y su posible estado de alteración y/o fisuración. Otros métodos geofísicos se basan en el magnetismo, la gravedad y la propagación de las ondas sísmicas. Aplicando estos métodos y su experiencia, el hidrogeólogo puede aventurar la sucesión de materiales que serán perforados. Para profundizar en estos métodos de reconocimiento del subsuelo, desde un punto de vista didáctico, se recomienda consultar el trabajo de Linares *et al.* (2002).

#### Capacidad depuradora del terreno

Cuando un contaminante se infiltra en el terreno, sus elementos nocivos sufren procesos físicos, químicos y biológicos que los transforman o los retienen; es así como el terreno depura el contaminante. Esta depuración será más completa cuanto mayor sea, en el espacio y en el tiempo, el recorrido efectuado por el agua contaminada a través del suelo y el subsuelo.

A efectos prácticos, puede ser de utilidad una tabla como la siguiente (Tabla 3) para evaluar, al menos cualitativamente y en primera aproximación, el riesgo de contaminación química del agua subterránea en función de la capacidad autodepuradora de la zona no saturada del terreno.

<b>Litología, permeabilidad y contenido en arcilla</b>			
Profundidad del nivel freático	Rocas karstificadas o muy fisuradas, gravas, arenas y otros materiales no arcillosos con PERMEABILIDAD ALTA y MEDIA	Rocas poco fisuradas, gravas areno-arcillosas, arenas arcillosas y otros materiales con PERMEABILIDAD BAJA	Arcillas, arcillas arenosas, margas y rocas no fisuradas con MUY BAJA PERMEABILIDAD
< 3 m	<b>ALTO</b>	<b>ALTO</b>	<b>MEDIO</b>
3 – 10 m	<b>ALTO</b>	<b>MEDIO</b>	<b>BAJO</b>
> 10 m	<b>MEDIO</b>	<b>BAJO</b>	<b>BAJO</b>

Tabla 3. Riesgo de contaminación del agua subterránea (adaptado de Temiño *et al.*, 1996).

Debe tenerse en cuenta, no obstante, que la atenuación de la contaminación microbiológica es, por lo general, mayor y más eficaz que la que afecta a la contaminación química. La eliminación de los microorganismos patógenos se consigue normalmente con un tránsito de unos pocos metros (ordinariamente entre 1 y 3 m) a través del suelo y la zona no saturada del terreno; también es factible esa “autodepuración microbiológica” durante la circulación del agua contaminada por el interior de la zona saturación del acuífero, siempre que recorra unas decenas de metros (normalmente entre 15 y 30 m). Ello se debe, por un lado, a la gran capacidad de filtración y adsorción de bacterias y virus que tienen los medios detriticos (particularmente los más finos) y, por otro, al reducido tiempo de supervivencia de estos microorganismos en el medio subterráneo (normalmente inferior a dos o tres meses) (IGME, 1985).

#### SOLUCIÓN PROPUESTA AL EJERCICIO

A continuación se presenta una propuesta de solución al ejercicio planteado; ello no obsta para que puedan ser aceptadas otras posibles alternativas de resolución. En todo caso, el ejercicio contempla el debate y la confrontación de ideas razonables entre los participantes en el taller.

1º) *La localización actual de los desplazados tiene fundamentalmente tres graves problemas:*

- *El actual campo está expuesto a riesgo de inundación, ya que está ubicado en la llanura aluvial del río principal.*
- *El agua de la laguna L-3 no es potable (ver la Tabla 2). Se desconoce la calidad del agua del río, pero no se puede asegurar que sea adecuada para el consumo sin tratamiento previo.*
- *No existe saneamiento alguno en el actual campamento, con el consiguiente riesgo sanitario.*

2º) *Considerando una dotación básica de 15 l/hab/día (Esfera, 2004), las necesidades mínimas de agua para los 32.000 desplazados serán de:*

$$32.000 \text{ hab} \times 15 \text{ l/hab/día} = 480.000 \text{ l/día} = 480 \text{ m}^3/\text{día}$$



3º) En principio, y a falta de otros datos, podríamos considerar que es probable que se puedan captar caudales de agua suficientes en los ríos y las lagunas para satisfacer los 480 m<sup>3</sup>/día demandados, pero no se puede asegurar de manera permanente su potabilidad natural. **Para la utilización segura del agua del río y de las lagunas sería necesario efectuar un tratamiento de potabilización.**

Respecto a las aguas subterráneas, si estudiamos el mapa, los cortes y el inventario de puntos de agua, podríamos concluir que:

- Se han realizado análisis de agua subterránea en siete puntos que toman el agua de todas las formaciones geológicas existentes: llanura aluvial (puntos 1 y 10), terraza fluvial (puntos 8 y 9), granito descompuesto (puntos 4 y 11) y granito (punto 2). En todos ellos el agua es potable, por lo que debe considerarse que **el agua subterránea tiene una calidad natural adecuada en toda la zona estudiada.**
- Los caudales de los manantiales de los puntos acuíferos 1 y 4 superan siempre los 480 m<sup>3</sup>/día necesarios para el consumo de agua de los refugiados. En los otros dos manantiales (puntos acuíferos 2 y 3) sus caudales siempre son menores que los demandados.
- La mitad septentrional de la región estudiada está constituida por granito. Éste tiene siempre muy baja permeabilidad, excepto en zonas muy diaclasadas y en grandes fallas (por ello existe el manantial del punto 2). Si se construyeran pozos, los cauda-

les esperados serían despreciables y el riesgo de hacer pozos fallidos es elevado. Por lo tanto, **el granito sano no es acuífero y se desaconseja hacer pozos en él.**

d) Las otras tres formaciones geológicas de la zona muestran las siguientes características generales (ver Tabla 4, en la que figuran también los caudales de agua esperados en los nuevos pozos que se construyan en ellas)

- **La llanura aluvial es el acuífero más importante de la zona**, tanto por su amplia extensión como por su espesor y su alta permeabilidad.

- La terraza fluvial, también con gran extensión superficial, tiene 20 a 22 m de espesor y una permeabilidad reducida. **Si se construyesen pozos que atravesasen la totalidad del espesor de la terraza, los caudales esperados serían de unos 6 m<sup>3</sup>/hora (mayores que los del pozo 8).**

- Existen amplias zonas donde el granito está muy alterado, pero sólo tiene interés como acuífero el afloramiento más extenso de granito descompuesto. **En este acuífero se podrían obtener caudales del orden de 1 a 5 m<sup>3</sup>/hora en pozos que atravesasen todo el espesor del granito descompuesto**, ya que tiene la misma permeabilidad que las arenas arcillosas de la terraza (2 m/día) y el espesor saturado suele ser mayor (2 a 7 m).

4º) De acuerdo con la anterior Tabla 4 y la Tabla 3, a continuación se sintetizan los valores utilizados para caracterizar la adecuación

	ACUÍFERO		
CARACTERÍSTICAS	LLANURA ALUVIAL	TERRAZA FLUVIAL	GRANITO DESCOMPUESTO
Litología	Grava arenosa	Arena arcillosa	Arena no arcillosa
Pozos, sondeos, catas	6, 7, 10, C-1, C-2	5, 8, 9, C-4	11, C-3
SEV	A, B, F, G	C, D, E	H, I, J, K, L
Espesor del acuífero	11 a 14 m	20 a 22 m	6 a 10 m
Espesor no saturado	≤ 3 m	6 a 10 m	3 a 6 m (*)
Espesor saturado	9 a 12 m	9 a 12 m	2 a 7 m
Permeabilidad	35 m/día	2 m/día	2 m/día
Caudales actuales de explotación	Pozo 7: espesor saturado = 4 m caudal = 20 m <sup>3</sup> /hora	Pozo 8: espesor saturado = 4 m caudal = 3 m <sup>3</sup> /hora	
Caudales esperados en los pozos nuevos	> 20 m <sup>3</sup> /hora	6 m <sup>3</sup> /hora 1	a 5 m <sup>3</sup> /hora
(*) Menor de 3 m en el entorno del manantial 4 y las lagunas L-1 y L-2.			

Tabla 4. Síntesis de las características generales de los acuíferos de la zona.



de cada formación geológica para instalar letrinas de 2 m de profundidad y un vertedero de residuos en la superficie del terreno (Tabla 5).

interés para complementar otras alternativas de abastecimiento. En el caso de instalarse el futuro campo de refugiados en la zona de granito descompuesto, estos tres ma-

		LLANURA ALUVIAL	TERRAZA FLUVIAL	GRANITO DESCOMPUESTO	GRANITO
Profundidad del nivel freático		≤ 3 m (≤1 m en letrinas)	6 a 10 m (4 a 8 m en letrinas)	3 a 6 m (1 a 4 m en letrinas)	
Permeabilidad y contenido en arcilla		ALTA (grava)	BAJA (arena arcillosa)	BAJA (arena sin arcilla)	MUY BAJA (granito sano)
Facilidad de excavación		EXCAVABLE	EXCAVABLE	EXCAVABLE	NO EXCAVABLE
Riesgo de contaminación del agua subterránea		ALTO	MEDIO	ALTO-MEDIO (let.) MEDIO (vertedero)	BAJO
Adecuación para el emplazamiento	LETRINAS	MALA	MEDIA	MALA-MEDIA <sup>(*)</sup>	MALA
	VERTEDERO	MALA	MEDIA	MEDIA <sup>(*)</sup>	BUENA
(*) En el entorno del manantial 4 y las lagunas L-1 y L-2 la adecuación para el emplazamiento de letrinas y vertedero es MALA (el nivel freático está a menos de 3 m y las letrinas pueden llegar a él).					

Tabla 5. Valoración global del riesgo de contaminación del agua subterránea y la facilidad de excavación del terreno.

• El resultado indica que el mejor lugar para instalar las letrinas es la terraza fluvial, aunque con un riesgo medio de contaminar el agua subterránea. No es viable construir las letrinas en el granito sano, ya que es muy duro y, por lo tanto, no es excavable.

• El mejor lugar para ubicar el vertedero es el afloramiento de granito sano. También podría instalarse en la terraza o en el granito descompuesto, pero con riesgo medio de contaminar el agua subterránea.

5º) A la vista de las cuestiones estudiadas, se concluye que no es recomendable ubicar el futuro campo de refugiados en la llanura aluvial (por su riesgo de inundación) ni en el granito sano (por ser inviable resolver el saneamiento mediante letrinas). Por lo tanto, debería instalarse el futuro campamento en la terraza fluvial o en el granito descompuesto.

6º) A partir de los datos del inventario de puntos de agua (Tabla 2) y su localización en el mapa (Figura 1), y conforme a lo expuesto en el apartado 3º) anterior, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

• Los mejores puntos de captación son los manantiales 2, 3 y 4. Todos ellos tienen agua potable y se localizan topográficamente por encima de la terraza, por lo que podría llevarse el agua por gravedad hasta el campamento si éste se emplazase en la terraza. El caudal del manantial 4 (610 m<sup>3</sup>/día en estío y hasta 1.000 m<sup>3</sup>/día en invierno) es muy adecuado para ser usado como fuente de abastecimiento, pero los caudales de los manantiales 2 y 3 son reducidos y sólo pueden tener

nantiales tendrían el grave inconveniente de precisar instalaciones de bombeo.

• Los caudales de los pozos construidos en la terraza aluvial (unos 6 m<sup>3</sup>/hora) serán mayores que los de los pozos que explotan el granito descompuesto (1 a 5 m<sup>3</sup>/hora). En ambos acuíferos el agua subterránea es potable actualmente, si bien en este último existe mayor riesgo de contaminación. Por lo tanto, será mejor y más seguro construir pozos en la terraza que en el granito descompuesto.

• El acuífero de la llanura aluvial tiene el manantial 1 con caudal muy elevado (1.000 a 2.000 m<sup>3</sup>/hora), por lo que aquí se podrían construir pozos con agua de buena calidad y caudales elevados. No obstante, se desaconseja usar este acuífero para el abastecimiento, pues su puesta en servicio requeriría utilizar equipos de bombeo e instalar largas conducciones para llevar el agua hasta el campo de refugiados. Además, al estar sometido a riesgo de inundación, una avenida podría averiar dichos equipos y desabastecer a la población.

• Los ríos y lagunas son los lugares menos aptos para captar el agua de abastecimiento, principalmente por la inseguridad de poder mantener su potabilidad de forma natural. Además, tanto los ríos como las lagunas siempre están en las zonas topográficas más deprimidas de su entorno, por lo que sería necesario instalar potentes sistemas de bombeo para llevar el agua al campo de refugiados.

Como consecuencia de ello, el orden de preferencia de las posibles captaciones de agua es:



1°. **Manantial 4** (especialmente si el campo de refugiados se ubica en la terraza fluvial).

2°. **Manantiales 2 y 3** (sólo como complemento si se ubica el campo en la terraza).

3°. **Pozos en la terraza fluvial.**

4°. **Pozos en el granito descompuesto.**

5°. **Manantial 1 y pozos construidos en la llanura aluvial** (se desaconseja).

6°. **Ríos y lagunas** (se desaconseja).

7°) Del estudio de toda la información previa se concluye que en la región estudiada no existen zonas óptimas para ubicar el futuro campo de refugiados. Como ya se ha comentado en el apartado 5°, las únicas zonas razonablemente apropiadas son la terraza fluvial y el granito descompuesto.

**Aunque cada grupo de trabajo deberá seleccionar una sola área, optamos por analizar una zona en la terraza y otra en el granito descompuesto:**

**Área 1:** en el granito descompuesto, entre la posición del sondeo 11 y el SEV-K.

**Área 2:** en la terraza aluvial, entre el pozo 8, la cata C-4 y el SEV-C.

8°) **Valoración del Área 1** (entre el sondeo 11 y el SEV-K):

- Esta propuesta se sitúa en el granito descompuesto (arenas muy angulosas sin arcilla), en un sector donde el nivel freático está a una profundidad entre 4 y 5 m (sondeo 11 y SEV-K), es decir de 2 a 3 m por debajo de las letrinas. El espesor saturado de acuífero es de unos 7 m (sondeo 11 y SEV-K), por lo que en los pozos nuevos se espera obtener caudales del orden de 5 m<sup>3</sup>/hora (ver Tabla 4).

- Se propone realizar el abastecimiento mediante pozos construidos en el sector septentrional del campo. El saneamiento se realizará con 100 letrinas comunales de 2 m de profundidad distribuidas por el interior del campamento.

- **El riesgo de contaminación del agua subterránea por las letrinas es alto o medio** (ver Tabla 5). El agua subterránea que podría ser contaminada se moverá en dirección perpendicular a las líneas isopiezas y sentido hacia las de menor cota, es decir, hacia el cercano manantial 4. El riesgo de que éste se contamine desaconseja usarlo para el abastecimiento (aunque, como se comenta en el apartado 4.5, es muy probable que la contaminación microbiológica no llegue a afectarlo).

- Por lo tanto, el abastecimiento de agua deberá realizarse exclusivamente con pozos nuevos. Se propone construirlos al Norte del Área 1, siguiendo aproximadamente la posición de la línea isopieza de 330 msnm y alejados al menos 200 m de las letrinas más próximas. Esta localización está en el senti-

do opuesto al flujo del agua subterránea desde el campo y suficientemente alejada de él como para poder asegurar que no serían contaminados. **Los pozos deberán perforarse en el granito descompuesto** hasta llegar al granito sano (muy duro), para captar el máximo espesor saturado de acuífero y consecuentemente obtener los mayores caudales posibles. Se estima que su profundidad sea de 10 a 11 m y los caudales que aporten del orden de 5 m<sup>3</sup>/hora (ver Tabla 4).

- **Será necesario construir unos 16 pozos** para cubrir la demanda de 480 m<sup>3</sup>/día, ya que teniendo en cuenta las condiciones de uso impuestas en el enunciado (hasta 2 bombas manuales por pozo, que en conjunto podrán extraer hasta 2,4 m<sup>3</sup>/hora y un caudal efectivo de 30 m<sup>3</sup>/día):  $(480 \text{ m}^3/\text{día}) / (30 \text{ m}^3/\text{día}/\text{pozo}) = 16$  pozos.

8°) **Valoración del Área 2** (entre el pozo 8, la cata C-4 y el SEV-C):

- Esta propuesta se sitúa en las arenas con matriz areno-arcillosa de la terraza aluvial, en un sector donde el nivel freático está a una profundidad entre 6 m (pozo 8) y unos 8 m (SEV-C), es decir 4 a 6 m por debajo de las letrinas. El espesor saturado de acuífero será mayor de 10 m y los caudales de pozos nuevos serán de unos 6 m<sup>3</sup>/hora (ver Tabla 4).

- El abastecimiento del campamento se piensa hacer por gravedad desde los manantiales 2 y 4, complementándolo en verano con pozos construidos en el sector septentrional de esta Área 2. El saneamiento será de 100 letrinas comunales de 2 m de profundidad distribuidas en el interior del campamento.

- **El riesgo de contaminación del agua subterránea por las letrinas es medio** (ver Tabla 5). El agua subterránea que podría ser contaminada se moverá en dirección perpendicular a las líneas isopiezas y sentido hacia las de menor cota, es decir, hacia el Sur o Sureste. La laguna L-3, al estar alejada más de 1,5 km del campo de refugiados y contaminada, no empeoraría su calidad actual.

- El abastecimiento de agua se haría con los manantiales próximos y situados a mayor cota (puntos acuíferos 2 y 4). Teniendo en cuenta las condicionantes impuestas en el enunciado, el agua aprovechable de ambos (50% del caudal) variará desde unos 365 m<sup>3</sup>/día en estío hasta 600 m<sup>3</sup>/día en los meses más húmedos. Por lo tanto, en los meses de estío serían necesarios unos 115 m<sup>3</sup>/día adicionales (480 m<sup>3</sup>/día – 365 m<sup>3</sup>/día).

- La conducción desde el lejano manantial 3 sería costosa y aportaría escaso caudal (unos 15 m<sup>3</sup>/día aprovechables en estío), por lo que se descarta. Otra forma de obtener los 115 m<sup>3</sup>/día sería **construir pozos en el Norte del Área 2**, alejados al menos 200 m de las





letrinas más próximas. Esta localización está en el sentido opuesto al flujo del agua subterránea desde el campo y suficientemente alejada de él como para poder asegurar que no serían contaminados. **Los pozos deberán perforarse en las arenas arcillosas de la terraza hasta llegar al granito sano (muy duro) o hasta los 20 m (máxima capacidad de perforación de la máquina disponible); así se espera captar caudales del orden de 5 m<sup>3</sup>/hora (ver Tabla 4).**

• **Será preciso construir 4 pozos para captar los 115 m<sup>3</sup>/día e instalar en cada uno de ellos dos bombas manuales que funcionarán como fuentes públicas en los meses estivales, ya que teniendo en cuenta las condiciones de uso impuestas en el enunciado (2 bombas manuales por pozo, que en conjunto podrán extraer hasta 2,4 m<sup>3</sup>/hora y un caudal efectivo de 30 m<sup>3</sup>/día):**  $(115\text{m}^3/\text{día}) / (30\text{m}^3/\text{día}) = 4$  pozos.

9º) **Se propone ubicar el vertedero de residuos sólidos en el granito sano, más concretamente en la zona llana y sin fallas que existe a unos 2 km al SE del manantial 4 y a 2 km al NE del sondeo 9.**

• **Éste es un sector de territorio suficientemente alejado del futuro campo de refugiados, para evitar riesgos sanitarios. Está localizado en un terreno que no es acuífero (granito sano sin fracturas) y además está alejado más de 1,5 km de los acuíferos y ríos de la zona, lo que evitará la contaminación del agua por los lixiviados que se generen en el vertedero.**

10º) **De las dos alternativas estudiadas para instalar el futuro campo de refugiados, la más adecuada es el Área 2. En ella existe menor riesgo de contaminación del agua que en el Área 1 y además requiere una infraestructura de abastecimiento más barata y fácil de mantener que los 18 pozos y las 36 bombas de mano que resultan necesarios en el Área 1.**

## CONCLUSIONES Y VALORACIÓN DE LA ACTIVIDAD PROPUESTA

El ejercicio expuesto posee un indudable interés didáctico, especialmente en el ámbito del Bachillerato y la Universidad, por los siguientes motivos:

• **Su desarrollo implica el concurso de varias disciplinas** que el alumno o el profesor abordan desde sus aspectos prácticos y su utilidad; la geología, la hidrogeología, la geofísica, las técnicas de prospección del terreno y sus relaciones se ponen en juego para resolver un problema.

Debe valorarse especialmente el hecho de que el ejercicio constituya un ejemplo sencillo y didáctico de actividad propia de la **Geología Aplicada**, disciplina de difícil desarrollo en la práctica docente.

Al abordarse también aspectos relativos al

medio ambiente –contaminación, sanidad ambiental, optimización de los recursos, planificación territorial-, el conjunto de la actividad se complementa transversalmente y facilita la comprensión y la discusión de aspectos muy diversos entre los alumnos.

• **Es un trabajo para ser realizado en equipo** y, por tanto, potencia este tipo de aprendizaje cooperativo.

• El ejercicio plantea una situación de pobreza extrema, generada por un conflicto o desastre que es “respondida” con prontitud por la comunidad internacional, constituyéndose así en un marco idóneo para **fomentar el sentido de la solidaridad y la cooperación entre los pueblos.**

• La situación expuesta en el ejercicio práctico **puede plantearse para otros contextos (poblaciones rurales, campamentos de verano, campings, acuartelamientos, etc.)** y no perder por ello validez, ya que los conocimientos necesarios, el método de trabajo y la valoración de alternativas serían muy semejantes a los aquí empleados.

• Esta actividad **puede desarrollarse como ejercicio práctico con alumnos de Bachillerato o de los primeros años de Universidad**, con garantías suficientes de aprovecharla al máximo, entendiéndola y resolviéndola, con apoyo del profesor. Sin embargo, es compleja si se plantea como práctica para alumnos de Enseñanza Secundaria Obligatoria; en este caso el profesor puede exponer a los alumnos el ejercicio y su solución como un ejemplo de la aplicación de la Geología.

Finalmente, es importante resaltar, a la vista de la valoración realizada por los alumnos que desarrollaron esta actividad, que su aparente complejidad no es impedimento para alcanzar los objetivos didácticos planteados.

## BIBLIOGRAFÍA

ESFERA (2004). *El Proyecto Esfera*. En: <http://www.sphereproject.org/spanish/manual>.

IGME (1985). *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Informe de Síntesis*. Tomo 1, Memoria: 181 pp.

Linares, R.; Brusi, D.; Pallí, L.; Roqué, C.; Almanza, X.; Cebriá, A.; Geis, C.; Zamorano, M.; Soler, D.; Vehí, M. y Clapés, S. (2002). Métodos de reconocimiento del subsuelo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, vol. 10, nº 1: 61-72.

Rebollo, L.F. y Martín-Loeches, M. (2006). Experiencia y conclusiones de la aplicación de un curso de verano sobre el agua y el saneamiento ambiental en proyectos de emergencia y de ayuda al desarrollo. *III Congreso Universidad y Cooperación al Desarrollo*. Madrid, 26-28 de abril de 2006. Resúmenes de ponencias y comunicaciones: 122-123.

Termiño, J.; Pividal, A.J.; Villarroya, F.; Gómez, M.T.; y Centeno, J. de D. (1996). Caracterización del territorio para la instalación de VRSU: metodología aplicada a las aguas subterráneas. *Geogaceta*. Vol. 20 (6), 1.315-1.317. ■



**ANEXOS**

<b>SEV – A</b> (Cota = 267 msnm)	<b>SEV – B</b> (Cota = 263 msnm)	<b>SEV – C</b> (Cota = 282 msnm)	<b>SEV – D</b> (Cota = 283 msnm)
0 – 14 m = 680 Ω.m	0 – 12 m = 600 Ω.m	0 – 20 m = 90 Ω.m	0 – 20 m = 85 Ω.m
> 14 m = 2.820 Ω.m	> 12 m = 2.950 Ω.m	> 20 m = 3.000 Ω.m	> 20 m = 2.600 Ω.m
<b>SEV – E</b> (Cota = 281 msnm)	<b>SEV – F</b> (Cota = 265 msnm)	<b>SEV – G</b> (Cota = 263 msnm)	<b>SEV – H</b> (Cota = 336 msnm)
0 – 20 m = 80 Ω.m	0 – 11 m = 700 Ω.m	0 – 14 m = 620 Ω.m	0 – 10 m = 900 Ω.m
> 20 m = 3.000 Ω.m	> 11 m = 2.900 Ω.m	> 14 m = 2400 Ω.m	>10 m = 2600 Ω.m
<b>SEV – I</b> (Cota = 338 msnm)	<b>SEV – J</b> (Cota = 333 msnm)	<b>SEV – K</b> (Cota = 329 msnm)	<b>SEV – L</b> (Cota = 334 msnm)
0 – 6 m = 850 Ω.m	0 – 10 m = 980 Ω.m	0 – 10 m = 800 Ω.m	0 – 6 m = 850 Ω.m
> 6 m = 2.500 Ω.m	> 10 m = 3.100 Ω.m	> 10 m = 3.100 Ω.m	> 6 m = 2.450 Ω.m

Tabla 1. Datos de resistividad correspondientes a los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

PTO.	TIPO	PROF. (m)	COTA DEL SUELO (msnm)	PROF. DEL AGUA (m)	USO	POTABLE	CAUDAL (Y PERMEABILIDAD)	LITOLOGÍA
1	Manantial	0	261	0	Sin uso	Sí	1.000 a 2.000 m <sup>3</sup> /día	
2	Manantial	0	328	0	Sin uso	Sí	120 a 200 m <sup>3</sup> /día	
3	Manantial	0	322	0	Sin uso		30 a 100 m <sup>3</sup> /día	
4	Manantial	0	321	0	Sin uso	Sí	610 a 1.000 m <sup>3</sup> /día	
5	Pozo excavado	15	280	12	Desconoc.			0 – 15 m = Arena con matriz de arcilla y arena fina
6	Pozo excavado	4	264	2	Desconoc.			0 – 4 m = Grava no arcillosa
7	Pozo excavado	7	266	3	Riego		20 m <sup>3</sup> /hora	0 - 7 m = Grava no arcillosa
8	Pozo excavado	10	287	6	Riego	Sí	3 m <sup>3</sup> /hora	0 – 10 m = Arena con matriz de arcilla y arena fina
9	Sondeo	25	285	10	Reconocim.	Sí	(Perm. = 2 m/día)	0 – 22 m = Arena con matriz de arcilla y arena fina 22 - 25 m = Granito muy duro
10	Sondeo	15	267	1	Reconocim.	Sí	(Perm. = 35 m/día)	0 - 11 m = Grava no arcillosa 11 - 15 m = Granito muy duro
11	Sondeo	15	333	4	Reconocim.	Sí	(Perm. = 2 m/día)	0 – 11 m = Arena angulosa, sin arcilla (granito alterado) 11 - 15 m = Granito muy duro
L - 1	Laguna	< 2	332	0	Ganadero			
L - 2	Laguna	< 2	332	0	Ganadero			
L - 3	Laguna	< 4	266	0	Riego	No		
C-1	Cata	3,5	265	3	Reconocim.			0 – 3,5 m = Grava con matriz de arena sin arcilla
C-2	Cata	3,5	262	3	Reconocim.			0 – 3,5 m = Grava con matriz de arena sin arcilla
C-3	Cata	3,5	336	3	Reconocim.			0 – 3,5 m = Arena angulosa, sin arcilla (granito alterado)
C-4	Cata	3,5	285	Seco	Reconocim.			0 – 3,5 m = Arena con matriz de arcilla y arena fina

Tabla 2. Inventario de puntos de agua.



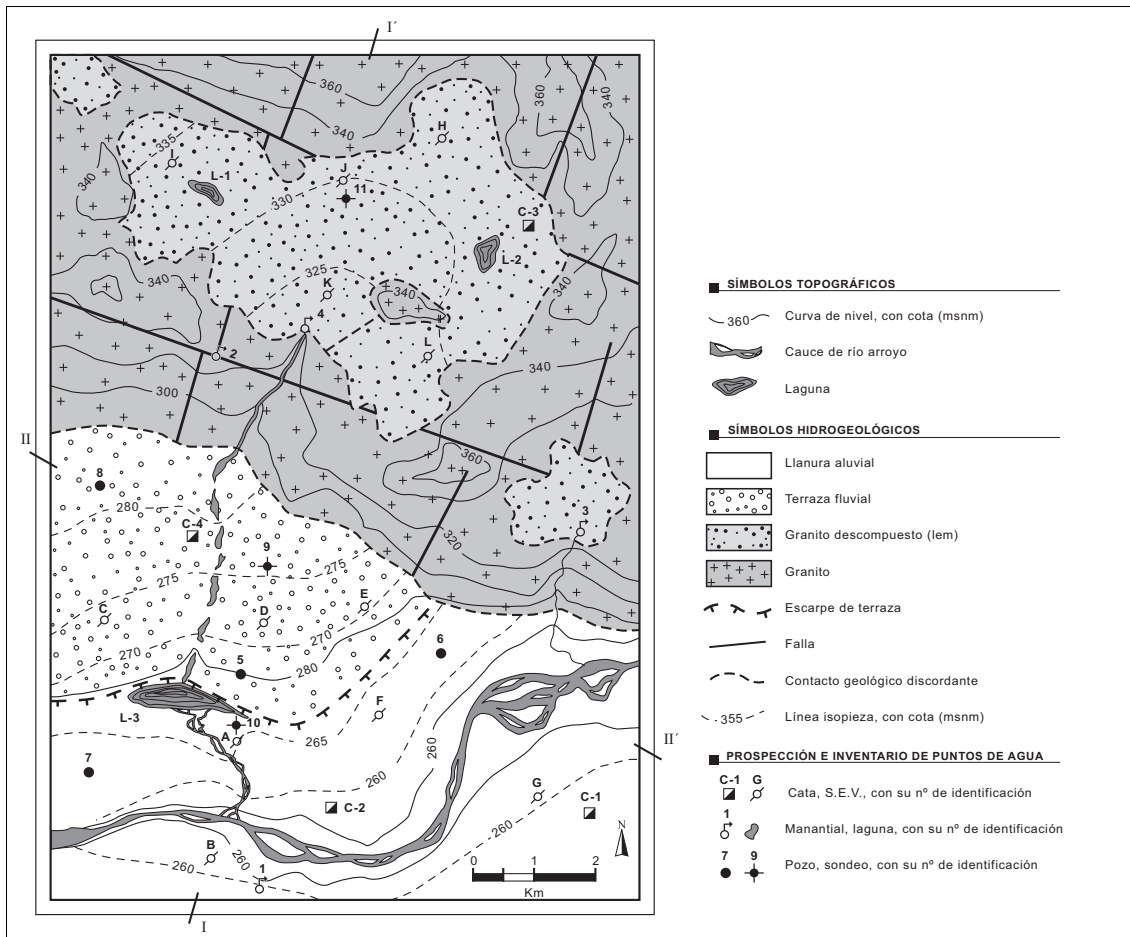


Figura 1. Mapa hidrogeológico.

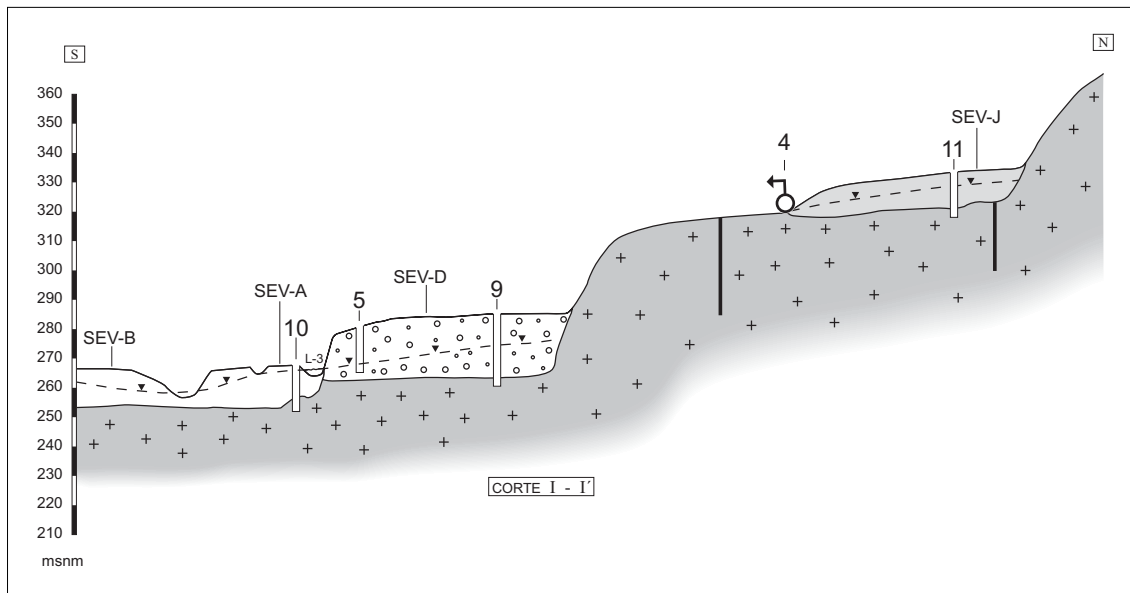


Figura 2. Corte hidrogeológico I-I'.



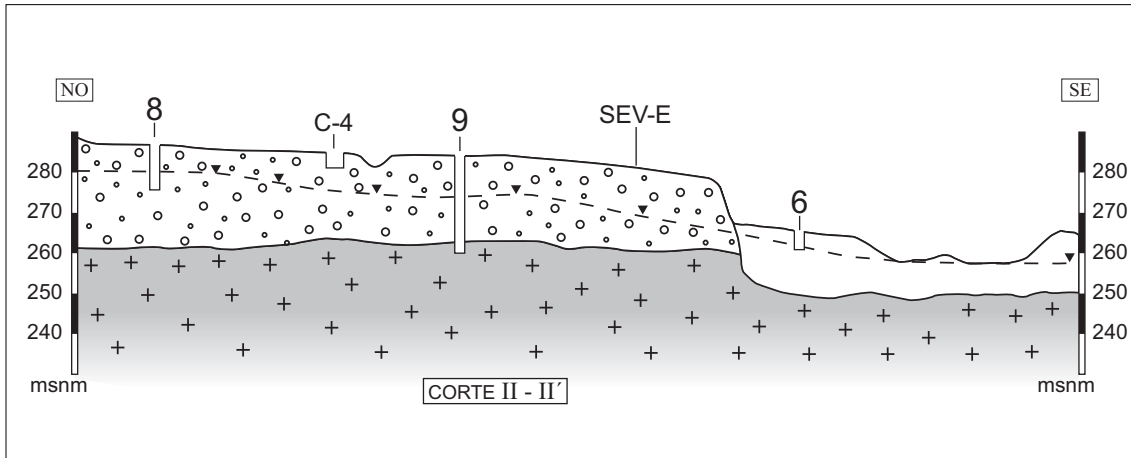


Figura 3. Corte hidrogeológico II – II'.

