MÉTODOS DE RECONOCIMIENTO DEL SUBSUELO
Subsoil studies methods

Rogelio Linares, David Brusi, Lluís Pallí, Carles Roqué, Xavier Almanza, Albert Cebrià, Christian Geis, Manel Zamorano, David Soler, Montse Vehí y Santi Clapés (*)

RESUMEN:

El taller tiene como objeto principal facilitar al profesorado de Ciencias de la Tierra el contacto directo con los principales tipos de métodos que se utilizan en el estudio del subsuelo. Éstos comprenden un conjunto de equipos que generalmente son explicados en el aula sin que haya habido un contacto directo con los mismos (los sondeos mecánicos de reconocimiento y los instrumentos geofísicos son los casos más habituales). A través de diversas actividades, ubicadas en el entorno del campus universitario de Girona, los asistentes participan en la realización de las mediciones mediante equipos diversos. Estas actividades se desarrollan en campo con el objeto de contribuir a la resolución de una problemática concreta planteada. Se trata de situaciones, reales en su mayoría, en las cuales suele ser habitual la utilización de métodos de reconocimiento del subsuelo. Los casos presentados han sido utilizados como estrategias de enseñanza-aprendizaje con estudiantes universitarios y de secundaria de nuestro entorno. El taller se complementa con la presentación de varios ejemplos de una tipología de ejercicios que incluyen el tratamiento de datos obtenidos mediante métodos de reconocimiento del subsuelo.

ABSTRACT:

The aim of this workshop is to present the main methods of subsoil studies (namely mechanical and geophysical methods) to the Earth Sciences professorate. These methods frequently involve the use of specific material. The different methods are usually taught in the classroom where there is no real contact between the students and the equipment.

Several activities, all of them taking place in surrounding areas of the university campus of Girona, will provide the assistants to the workshop with the opportunity of making measurements with different equipment. These activities will be made in the field so as to contribute to the resolution of a problem which will have been previously proposed. The problems presented are situations, most of them real, when subsoil investigation techniques are usually used. These cases have been employed as teaching-learning strategies with university and second grade students in the area of Girona.

Finally, some examples of exercises involving the treatment of data obtained through subsoil investigation techniques are also presented to complement the workshop.

Palabras clave: *Investigación del subsuelo, métodos mecánicos de reconocimiento, métodos geofísicos.*
Keywords: *Subsoil investigation, mechanical methods, geophysical methods.*

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, el interés del hombre por conocer la naturaleza geológica del subsuelo ha estado vinculado al desarrollo de las actividades constructivas y de la explotación de los recursos naturales. En ambos casos, las necesidades o problemáticas suscitadas requieren para su solución del conocimiento de los materiales y de su geometría, y de alguna característica o propiedad de los mismos. La Geología debe ser capaz de ofrecer soluciones a problemas de índole social, económica o ecológica. Sus campos de aplicación pueden dar respuestas a problemas de ingeniería, de gestión territorial, de impacto ambiental, entre otros muchos.

Hoy en día, la necesidad de conocer la naturaleza del subsuelo va más allá de la simple prospección en busca de recursos geológicos. Otros campos, como los derivados del estudio de los procesos o riesgos geológicos o de los efectos provocados por la actividad humana en el medio natural, enriquecen y diversifican las situaciones o problemáticas que requieren de un reconocimiento del subsuelo. Las siguientes cuestiones nos permiten ilustrar algunos ejemplos de los tipos de problemas planteados: ¿Por dónde pasa la conducción del gas o del agua? ¿Existen cavidades en el subsuelo? ¿Están contaminados los materiales y/o las aguas subterráneas? ¿Existen fugas de líquidos contaminantes en un vertedero? ¿Puede deslizarse una ladera?, etc.

(*) Área de Geodinámica Externa. Universidad de Girona. Campus de Montilivi. 17071. Girona. e-mail: rogelio.linares@udg.es

En general, acorde con esta diversidad de situaciones, la cartografía geológica de superficie no basta para resolver los problemas. Los métodos de prospección deben complementarlos. Las profundidades a investigar pueden ser muy variadas. No obstante, en la mayoría de los reconocimientos difícilmente se superan las primeras decenas de metros.

Los métodos de reconocimiento del subsuelo que abordaremos en este taller corresponden a equipos de reconocimiento habitualmente vinculados al campo de la Geotecnia o Ingeniería Geológica (Geología aplicada).

PRINCIPALES MÉTODOS DE RECONOCIMIENTO DEL SUBSUELO. ASPECTOS TEÓRICOS BÁSICOS DE APOYO A LAS ACTIVIDADES DEL TALLER.

Se recogen este apartado algunos aspectos básicos en relación con los métodos de reconocimiento del subsuelo. Para ello se ha sintetizado la información elaborada por Ayala et al (1998), Almazán, J.L. (2001), Carbó (2001) y González de Vallejo, et al (2002). A efectos prácticos, estas técnicas se agrupan en dos categorías principales: procedimientos directos e indirectos.

Métodos de reconocimiento directo o mecánicos

Éstos permiten un reconocimiento de la naturaleza del terreno con la posibilidad de obtener muestras o testigos. Dentro de esta tipología se encuentran las excavaciones y los sondeos.

Excavaciones

La observación directa del terreno se puede realizar mediante labores sencillas de excavación con la ayuda de maquinaria adecuada. Las mínimas dimensiones están definidas por el espacio requerido para la accesibilidad y las necesidades de inspección.

Las ventajas que presentan las excavaciones son el acceso directo, observación continua, muestreo continuo, tamaño de muestra, y posibilidad de realizar ensayos *in situ*. Por el contrario este método esta condicionado por una profundidad limitada, presencia de agua y problemas de estabilidad de las paredes.

La tipología principal, más comúnmente utilizada, corresponde a las calicatas y zanjas (figura 1). Estas técnicas de reconocimiento son excavaciones "a cielo abierto", en general rápidas y poco costosas, permitiendo alcanzar profundidades moderadas (3-4 m), por métodos mecánicos en terrenos excavados, preferentemente cohesivos y con ausencia de nivel freático. Otros tipos de excavaciones como son los pozos y las galerías son, comparativamente, menos utilizadas.

Sondeos

Consisten en perforaciones de pequeño diámetro que permiten reconocer la naturaleza y la localización



Figura 1.- Zanja de reconocimiento del terreno.

de las diferentes capas del subsuelo, obtener muestras, determinar la posición del nivel del agua o la carga hidráulica (nivel piezométrico) (figura 2) y realizar, en algunos casos, ensayos *in situ*. Se trata de la modalidad habitual de reconocimiento en profundidad y pueden ser manuales o mecánicos. Centraremos nuestra atención en estos últimos (figura 3).

Los sondeos mecánicos permiten atravesar cualquier terreno cohesivo, granular o rocoso. Este tipo de sondeo es imprescindible cuando se quieren alcanzar profundidades superiores a las logradas con los métodos ya mencionados; reconocer el terreno por debajo del nivel freático; atravesar terrenos rocosos duros; obtener muestras inalteradas profundas; realizar ensayos geotécnicos *in situ* de tipo mecánico, ya sean de

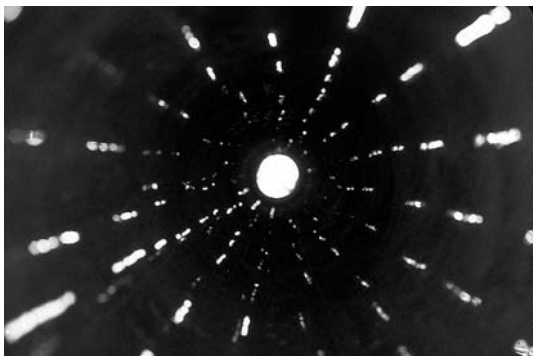


Figura 2.- Tubo de sondeo ranurado para la captación de aguas subterráneas.



Figura 3.- Sondeo mecánico de reconocimiento del terreno. EGGA.

penetración (perforación con batería cilíndrica o barrena helicoidal) o de carga (se aplica un peso sobre una sección del terreno); muestrear acuíferos profundos o realizar ensayos hidrogeológicos.

Según la clase del terreno y la finalidad del trabajo, se deberá escoger el tipo de sondeo más adecuado de los muchos disponibles. Entre éstos cabe destacar los procedimientos a percusión y a rotación.

Los sondeos a percusión se emplean en las formaciones incoherentes. La prospección avanza por golpes sucesivos producidos por la caída del útil en el fondo de taladro o bien por hinca de una tubería mediante una maza. El conocimiento de la energía empleada en la hinca proporciona una primera información de las características mecánicas del terreno por lo que es importante realizar esta operación en condiciones normalizadas; así se define uno de los ensayos más conocidos de la Geotecnia de cimentaciones, el ensayo de penetración estándar (S.P.T.). La perforación que se suele usar consiste en la hinca en el terreno de tubos de acero que harán de entibación, y la extracción del material contenido dentro del taladro mediante cucharas, trépanos, etc.

En el caso de los sondeos a rotación el principio general consiste en ejercer con un útil, llamado corona, una presión en el terreno y al mismo tiempo una acción rotativa mediante un varillaje conectado a la cabeza giratoria, conocida como "mandril", de una sonda accionada por un motor. El avance de la corona se obtiene accionando sobre el mandril solidario al varillaje al cual se le transmite su rotación. La extracción del material se efectúa por bombeo de agua o cualquier otro fluido de perforación. En función de los tipos de útiles de perforación se diferencian dos grupos: baterías de rotación y barrenas helicoidales.

Métodos de reconocimiento indirecto

La Prospección Geofísica integra un conjunto de métodos de investigación del subsuelo que se basan en el estudio de las variaciones de parámetros físicos significativos y su correlación con las propiedades geológicas. Estos parámetros físicos, básicamente, son: la densidad, la susceptibilidad magnética, la resistividad/conductividad eléctrica; la permeabilidad magnética; la velocidad de propagación de ondas sísmicas y las emisiones radiactivas naturales o provocadas. La agrupación de las técnicas encaminadas a detectar anomalías o características de cada uno de los parámetros citados, es lo que da lugar a su clasificación en métodos geofísicos: Gravimétrico, Magnético, Eléctrico, Electromagnético, Sísmico y Radiactivo.

Destacamos a continuación algunos aspectos teóricos de los métodos geofísicos que serán utilizados en el taller, los más habituales en Ingeniería Geológica o Geotecnia.

Métodos eléctricos

La obtención de resistividades del subsuelo, mediante métodos eléctricos resistivos, en concreto por las técnicas del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) o Calicatas Eléctricas (CE), es una operación ya clásica en la prospección geofísica. El método se basa en la introducción en el terreno de una corriente continua de intensidad conocida (I) mediante unos electrodos de contacto, y la medida de la diferencia de potencial (V) creada, entre otros dos electrodos, como consecuencia del paso de la corriente (figura 4). Ambas medidas permiten conocer la resistividad aparente (ρ_a) del terreno afectado por el paso de la corriente generada, mediante el empleo la ecuación siguiente:

$$\rho_a = K\ (V/I)$$

K, es una constante de configuración geométrica que depende de las distancias entre electrodos: AM, AN, BM y BN

Si sucesivamente alejamos los electrodos de corriente A y B, afectaremos cada vez a un conjunto más potente de terreno, medido desde la superficie, y la resistividad aparente calculada, será lógicamente de conjuntos cada vez más potentes.

La representación de la resistividad aparente como función de la apertura de alas AB/2 se hace como se muestra en la figura 5. La forma de la curva

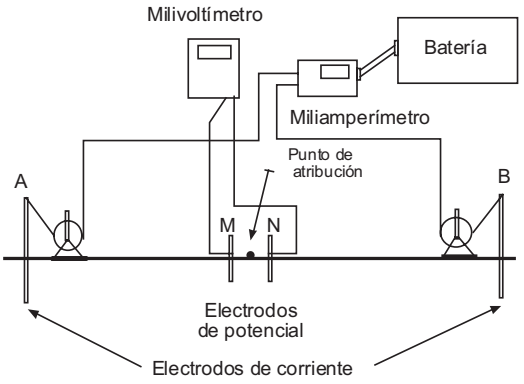


Figura 4.- Esquema del dispositivo de prospección eléctrica, en corriente continua, mediante la técnica del sondeo eléctrico vertical (SEV) según dispositivo Schlumberger. Extraído de Almanza (2002).

nos indica como varía la resistividad a medida que profundizamos en el terreno.

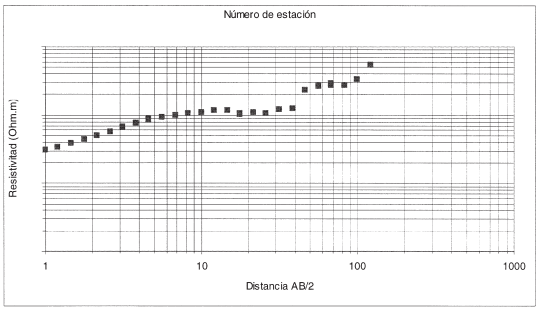


Figura 5.- Ejemplo de curva eléctrica (SEV).

Los múltiples sistemas de interpretación conocidos, calculan las resistividades y espesores de cada uno de los niveles individuales que conjuntamente y apilados, producen las resistividades aparentes obtenidas.

Si en lugar de separar los electrodos, desplazamos lateralmente todo el dispositivo (CE) y calculamos en cada punto la resistividad aparente, obtendremos la curva de variación de las resistividades, aproximadamente, para cada nivel.

Métodos electromagnéticos (EM ligeros)

A grandes rasgos, los métodos se basan en la generación eléctrica de un campo magnético primario mediante una antena emisora situada en las proximidades de la superficie del terreno. Este campo magnético primario induce un campo magnético secundario en el subsuelo. La medida de la relación entre ambos, valorada en una antena receptora situada a una cierta distancia, permite valorar la conductividad aparente de los diversos cuerpos geológicos del subsuelo.

Siguiendo el esquema expositivo de McNeill (1980), consideramos una situación (figura 6) en la cual una antena transmisora Tx se encuentra colocada sobre un terreno considerado uniforme y conectada con otra antena receptora Rx que se localiza a cierta distancia s. La variación a lo largo del tiempo del campo magnético causada por la corriente alterna con una frecuencia de audio en la antena transmisora induce pequeñas corrientes en el terreno. Estas corrientes generan un campo magnético secundario Hs que es detectado, conjuntamente con el campo primario Hp, para la antena receptora. En general, este campo magnético secundario constituye una función compleja que depende del espaciado entre antenas; de la frecuencia de operación f; y de la conductividad del terreno s. Bajo ciertos requerimientos, técnicamente definidos como "operación a valores bajos de inducción", el campo magnético secundario puede ser considerado como una función simple

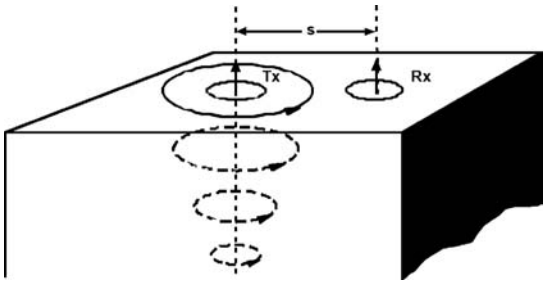


Figura 6.- Flujo de corriente inducido en un semiespacio, según McNeill (1980)

de estas variables. Estos requerimientos están incorporados en el diseño de los aparatos geofísicos y, por tanto, el campo magnético secundario puede expresarse como:

$$\frac{Hs}{Hp} \approx \frac{i\omega\mu_0\sigma S^2}{4}$$

donde:

Hs , campo magnético secundario en la antena receptora

Hp ,campo magnético primario en la antena receptora

ω , $2\pi f$, donde f es la frecuencia (Hz)

μ_0 , permeabilidad del espacio libre

s , separación entre antenas

i,= $\sqrt{-1}$

σ , conductividad del terreno (mho/m)

La relación entre el campo magnético secundario y primario es linealmente proporcional a la conductividad del terreno. Este hecho permite interpretar, a partir de lecturas directas, la medida de la conductividad del terreno a partir de la simple medida de esta relación. Según la proporcionalidad *Hs/Hp* (componente en cuadratura), la conductividad aparente (σ_a) indicada para el instrumento puede ser definida para la ecuación siguiente:

$$\sigma_a = \frac{4}{i\omega\mu_0\sigma S^2} \Big/ \left(\frac{Hs}{Hp}\right)$$

Los conductivímetros EM-31 y EM-34 de empresa GEONICS, son dos de los equipos electromagnéticos más utilizados, hoy en día, en nuestro país (figura 7).

El instrumento EM-31 presenta un espaciado entre antenas fijo de 3,7 m y una frecuencia de 9,8 kHz, que permite llegar a profundidades de investigación máximas del orden de 6 m. El registro de los



Figura 7.- Anillo receptor del equipo de sondeo electromagnético EM-34, GEONICS.

componentes en cuadratura y en fase de los campos electromagnéticos generados se realiza de manera automática. El equipo está diseñado para que sea portátil y que lo pueda utilizar una sola persona, que pueda hacer medidas en puntos predeterminados o bien de manera continua.

El instrumento EM-34, que se puede utilizar mediante dos operadores, presenta dos antenas conectadas de modo flexible a través de un cable (figura 8). El espaciado entre antenas se mide electrónicamente, utilizando la componente en fase, y es preseleccionado para separaciones de 10, 20 i 40 m (correspondiente a frecuencias de 6400 Hz, 1600 Hz y 400 Hz, respectivamente). Se consiguen diferentes profundidades de exploración dominantes, en función de la separación entre antenas y su orientación (tipos de dipolos).

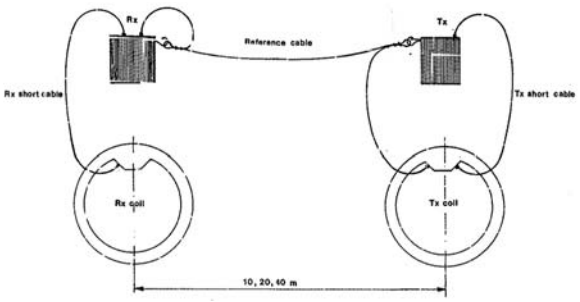


Figura 8.- Esquema de funcionamiento del equipo de sondeo electromagnético EM-34 GEONICS, según McNeill (1980)

Sísmica de refracción

La sísmica de refracción, estudia la transmisión de ondas sísmicas en el terreno, cuando se producen refracciones totales sobre superficies que delimitan medios con distintas constantes elásticas a uno y otro lado. Este fenómeno, permite el retorno a la superficie de una onda cuando incide sobre las discontinuidades del subsuelo y detectarla con sensores específicos (geófonos).

Utilizando las leyes de la óptica, podemos reconstruir el camino seguido por las ondas refractadas y calcular, por tanto, la profundidad a que se producen dichas refracciones, así como las velocidades de transmisión de las ondas sísmicas para cada nivel (figura 9)

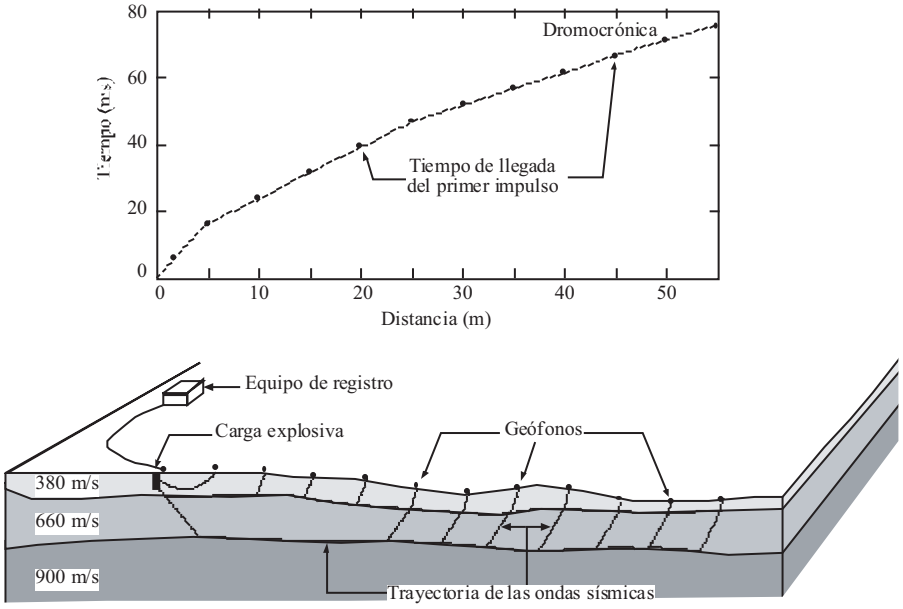


Figura 9.- Esquema de funcionamiento del método sísmico por refracción, y de domocrona (gráfico tiempo-distancia). Extraído de Linares et al (2001).

El procedimiento para realizar este tipo de prospecciones consiste en situar a distancias conocidas y alineados con el lugar en que se genera el impulso varios detectores de señales sísmicas (geófonos). Los tiempos de llegada a cada geófono, permiten representar la curva denominada *domocrona*.

Cada refractor está identificado por un segmento recto de la *domocrona*. A partir de cada uno de ellos calculamos la velocidad de transmisión como inversa de cada pendiente y la profundidad a que se sitúan los refractores por su relación con la ordenada en el origen. La inclinación de los refractores obliga a repetir la operación con impulsos a uno y a otro lado de la línea de geófonos para determinar el ángulo de buzamiento del plano de discontinuidad.

Esta síntesis que acabamos de realizar de los principales métodos de reconocimiento del subsuelo será complementada en cada una de las actividades o paradas mediante material gráfico de soporte de las mismas.

MARCO DE LAS ACTIVIDADES DEL TALLER: "¿Es posible ver en el subsuelo?"

Los métodos de reconocimiento del subsuelo surgen como consecuencia de unas necesidades o problemas que se le plantean al hombre. Es lógico, por tanto, que hayan sido ideados para solucionar unos problemas concretos y no todos los posibles. De esta manera suele haber una asociación entre el tipo de problemática y el tipo de método de reconocimiento necesario o más idóneo para solucionarlo. Resultará importante conocer las potencialidades y limitaciones de cada uno de ellos.

De acuerdo con estas premisas, y con los objetivos generales descritos anteriormente, el taller plantea distintas actividades que simulan problemas concretos y sus soluciones a través del empleo de los métodos de reconocimiento del subsuelo más adecuados para ello. Las actividades que se proponen son fruto de una experiencia adquirida a través de prácticas de campo realizadas con estudiantes universitarios de Ciencias Ambientales de la Universidad de Girona, y con profesores de secundaria con los que hemos compartido cursos de formación. Todas las actividades giran entorno al papel clave que el conocimiento del subsuelo tiene en las actividades humanas. Se desarrollan en las inmediaciones de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Girona a través de preguntas del tipo siguiente:

- Ya que disponemos de tan poco espacio en nuestra Universidad y las zonas verdes son prácticamente inexistentes, ¿por qué no se substituye el parking de la Facultad de Ciencias por una Zona Verde, un Campus Universitario, y el parking lo construimos debajo, subterráneo?

-Ya que el consumo de agua de nuestra Universidad es tan elevado… ¿Por qué no utilizamos el agua subterránea para regar este nuevo campus? ¿Existe agua subterránea en nuestro subsuelo? ¿Dónde está?

-Ya que las afueras de las ciudades como la nuestra fueron utilizadas durante muchos años como áreas de vertidos incontrolados de residuos de todo tipo... ¿No construiremos ningún algún edificio o zona de recreo se construya sobre suelos contaminados?

-Ya que existen antecedentes de la existencia de arcillas expansivas en la zona... Si construimos un nuevo edificio… ¿Se tomarán las medidas preventivas oportunas?

El desarrollo de las actividades parte de cada uno de los problemas planteados y se lleva a cabo mediante la utilización guiada de equipos de frecuente empleo en el estudio de subsuelo.

Respecto a los métodos directos de reconocimiento del subsuelo los equipos e instrumentos que se utilizan son los siguientes: camión de sondeos mecánicos de reconocimiento (penetrosonda TECOINSA a rotopercusión), equipo de sondas manuales; perforadoras automáticas, sondas piezométricas y tomamuestras de agua y suelos. Las actividades se complementaran con la realización de ensayos in-situ del tipo SPT, penetrómetros de bolsillo, pruebas esclerométricas, ensayos infiltrométricos, etc., así como la realización, a partir de muestras inalteradas, de algún ensayo de laboratorio.

En cuanto a los procedimientos geofísicos de estudio del subsuelo serán empleados los métodos y equipos siguientes: método de prospección eléctrica en corriente continua mediante equipo convencional de sondeos eléctricos verticales (SEV), tipo GEOTRON, método electromagnético mediante conductivímetros de campo tipo EM-31 y EM-34 de la casa GEONICS, y, por último, método sísmico por refracción mediante sismográfo SMARTSEIS de 12 canales de la casa GEOMETRICS. Este tipo de actividades se complementarán con la interpretación en gabinete de algún tipo de medición geofísica realizada.

Creemos que los asistentes, una vez finalizada las diversas actividades, podrán responder a la pregunta ¿Es posible ver en el subsuelo?

UTILIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RECONOCIMIENTO DEL SUBSUELO EN LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL MEDIO AMBIENTE

A continuación presentamos tres ejemplos de una tipología de ejercicios extraídos de las pruebas de selectividad de Catalunya que ilustran las potencialidades de aplicación de los métodos de reconocimiento del subsuelo en la materia Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente (PAAU, 1998 y 1999).

Este tipo de ejercicios han sido utilizados como actividades de enseñanza-aprendizaje en el aula y en libros de texto, teniendo una gran aceptación en el ámbito docente. Por ello, entendemos que pueden suponer un buen ejemplo, válido para ejemplificar las potencialidades de aplicación de los métodos de reconocimiento del subsuelo en el estudio de problemáticas geoambientales.

De acuerdo con las directrices autonómicas que enmarcan los contenidos de la asignatura Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, los ejercicios tan sólo incluyen datos obtenidos mediante métodos de reconocimiento directo del subsuelo (sondeos mecánicos, principalmente). Ello es debido a que en este contexto educativo, hasta la fecha, los métodos de prospección geofísica no han sido considerados.

Ejemplo 1.

EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS GEOLÓGICOS EN SEDIMENTOS ALUVIALES RECIENTES

(Ejercicio 1 de las pruebas de selectividad de Catalunya, Serie 3, junio de 1998).

En un sector del aluvial de un río se quiere llevar a cabo una explotación de materiales. Por este motivo se han realizado tres sondeos de reconocimiento que junto a la información de campo, completan la información sobre la geometría del cuerpo aluvial que se quiere explotar.

Observa la figura que representa el corte del río (figura 10) y lee los datos de los sondeos siguientes:

- *S-1. Hasta 12,5 m de profundidad gravas y arenas; desde esta cota hasta el final de la perforación, a una profundidad de 20 m, pizarras y esquistos. A partir de los 7,5 m las gravas y arenas se encuentran completamente saturadas.*
- *S-2. Hasta 5 m de profundidad, gravas y arenas; desde esta cota hasta el final de la perforación, a una profundidad de 15 m, pizarras y esquistos.*
- *S-3. Hasta 2,5 m de profundidad, gravas y arenas; desde esta cota hasta el final de la perforación, a una profundidad de 15 m, pizarras y esquistos.*

La zona de explotación prevista está marcada en la figura con un recuadro (zona c).

1. *Completa el corte que tienes en la figura adjunta (figura 10) con los datos facilitados por los sondeos realizados. Indica la posición del nivel freático.*
2. *A partir del corte que has completado, razona si la zona inicialmente escogida es la óptima o no para explotar el máximo volumen de materiales aluviales. ¿Qué problemática puede comportar la posible variación del nivel freático?*
3. *¿En que categoría se consideran los materiales aluviales atendiendo a su uso como rocas industriales? ¿En función de la litología de estos materiales a que usos se destinan?*
4. *Una vez finalizada la explotación se quiere utilizar la excavación creada para el vertido de residuos sólidos urbanos. ¿Es una buena idea? ¿Qué tipo de impacto puede ocasionar?*

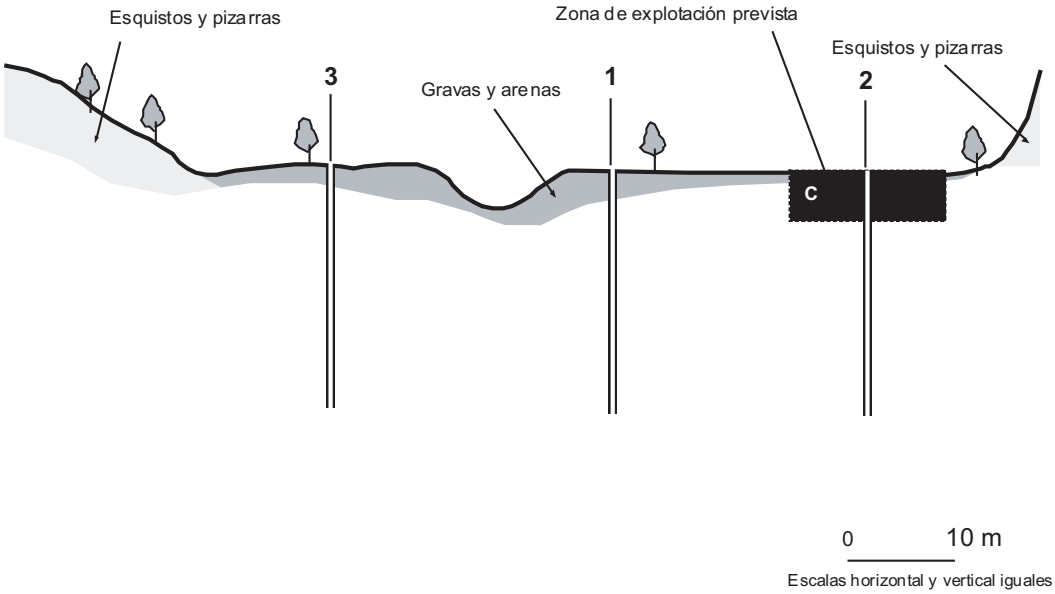


Figura 10.-. Corte geológico incompleto que acompaña al enunciado del ejercicio 1, correspondiente a la serie 3 de les pruebas se selectividad de junio de 1998 (PAAU, 1998).

Ejemplo 2.

RIESGOS E IMPACTOS AMBIENTALES EN LA ORDENACIÓN TERRITORIAL
(Ejercicio 1 de las pruebas de selectividad de Catalunya, Serie 6, junio de 1999).

El objetivo último de la planificación y la ordenación territorial es desarrollar las actividades humanas en un territorio respetando sus potencialidades y limitaciones de uso.

En el corte esquemático correspondiente a la parte a de la figura 11 aparecen representados parcialmente los diferentes materiales que constituyen el subsuelo de una zona que se quiere urbanizar. En la simbología de esta parte a de la figura 11 se indican los tipos de litologías y los rasgos estructurales principales.

En el área denominada en esta figura como Zona 1, el terreno es inestable. El suelo experimenta un desplazamiento lento pero p6resivo, que ha motivado que los árboles presenten una curvatura basal, y que incluso estén inclinados.

La propuesta de urbanización de este sector (parte b de la figura 11) consiste en construir un complejo polideportivo y destinar el resto del espacio disponible para un uso recreativo. En la parte baja, y una vez realizadas las excavaciones que se indican en la figura, se construirían las pistas deportivas y un estanque artificial. El suministro de agua para el estanque se haría a través de una conducción proveniente del pozo de captación localizado en la parte superior.

En la parte superior del talud se pretende realizar un vertido de tierras (gravas y arenas) y una reforestación con el objeto de utilizar estos terrenos como zona verde.

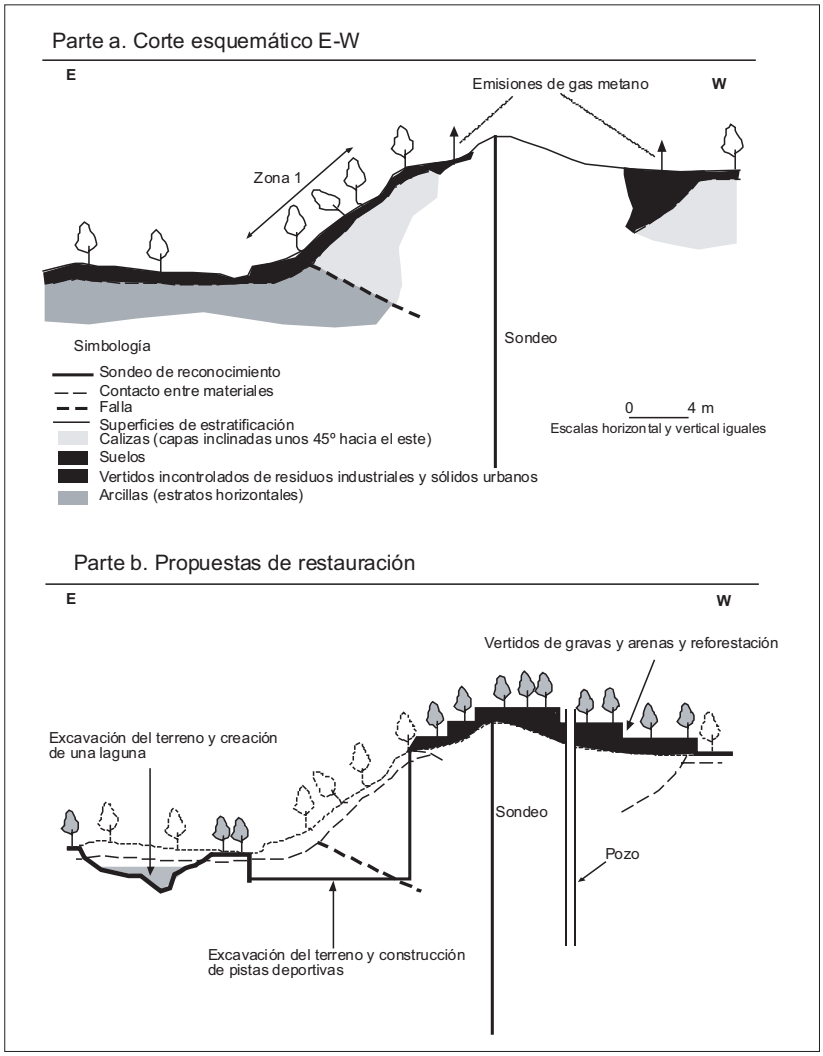


Figura 11.-. Corte geológico incompleto y esquema de la propuesta de urbanización que acompaña al enunciado del ejercicio 1, correspondiente a la serie 6 de les pruebas se selectividad de junio de 1999 (PAAU, 1999).

1. Completa el corte geológico esquemático (parte a de la figura 11) a partir de los datos facilitados por el sondeo de reconocimiento realizado:

- *de 0 m a 7 m, vertidos incontrolados de residuos sólidos urbanos e industriales;*
- *de 7 m a 14 m de profundidad, caliza;*
- *y desde esta profundidad hasta el final de la perforación (22 m), arcillas.*
- *A la profundidad de 10 m se encuentra el nivel freático.*

2. Según la información de que dispones, explica qué tipo de procesos dinámicos y/o impactos puede haber en este sector. Razona la respuesta.

3. Analiza el grado de idoneidad de la propuesta de urbanización esquematizada en la parte b de la figura 11 según los siguientes riesgos-impactos potenciales: contaminación de aguas subterráneas, movimientos en masa, eutrofización, inundaciones por aguas subterráneas, pérdida de suelo e incendios que afecten a la cubierta vegetal. (Si es necesario, vuelve a dibujar en la parte b de la figura la información geoambiental que has elaborado al responder a la pregunta 1).

Ejemplo 3.

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UNA LLANURA ALUVIAL

(Ejercicio 2, opción A, de las pruebas de selectividad de Catalunya, Serie 6, junio de 1999).

Las llanuras aluviales y fluvio-deltaicas presentan determinadas características geoambientales que las convierten en zonas muy apreciadas para diferentes usos del territorio. La disponibilidad de agua subterránea es uno de los factores condicionantes.

Para realizar este ejercicio hay que recordar que para un determinado acuífero, las líneas que unen los puntos que presentan la misma cota o profundidad del nivel freático se denominan isopiezas. Asimismo, las direcciones del flujo subterráneo son perpendiculares al trazado de las isopiezas.

1. En la parte a de la figura 12 tienes representado, parcialmente, un mapa esquemático de isopiezas de un acuífero existente en un sector de una llanura fluviodeltaica. A partir de la información de que dispones, dibuja las isopiezas que faltan. A continuación, dibuja flechas (unas 10) como la propuesta en la simbología, que indiquen las direcciones del flujo subterráneo que se desprende de la lectura de las isopiezas.

De los bloques diagrama que tienes representados en la parte b de la figura 12, di cual corresponde a cada una de las situaciones de relación río-acuífero que se dan las zonas indicadas en el mapa de isopiezas con las letras A y B.

2. De acuerdo con el mapa de isopiezas que has elaborado al responder al apartado anterior, en caso de que se detecten sustancias contaminantes en las aguas subterráneas de los pozos 6 y 13, ¿De que zonas podrían proceder? Delimítalas aproximadamente en cada caso en el mapa esquemático de isopiezas.

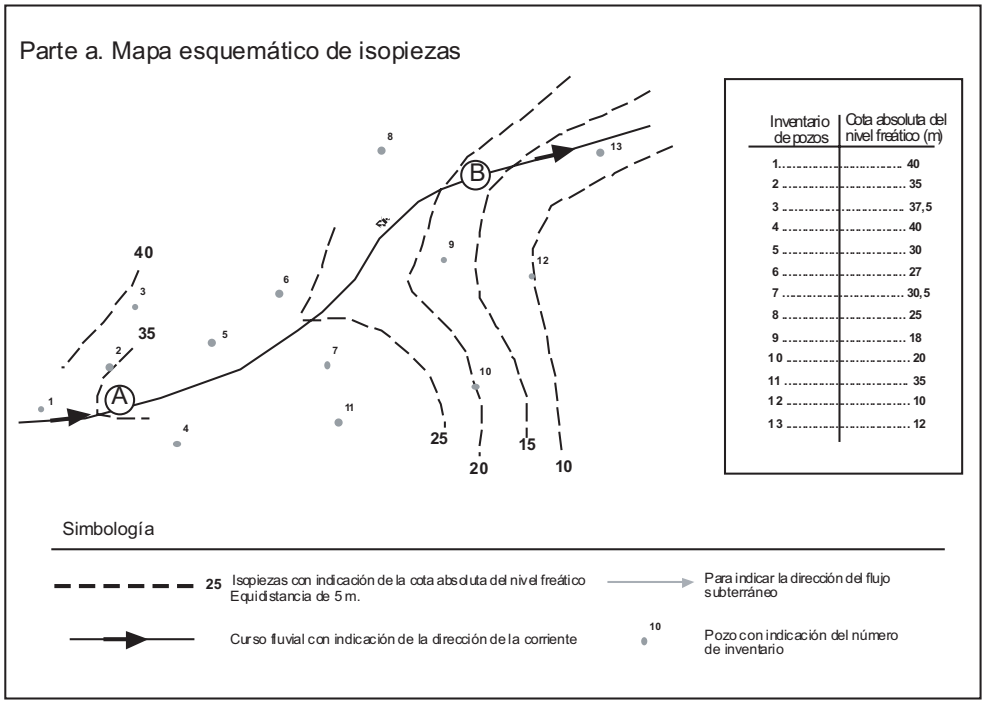


Figura 12a.

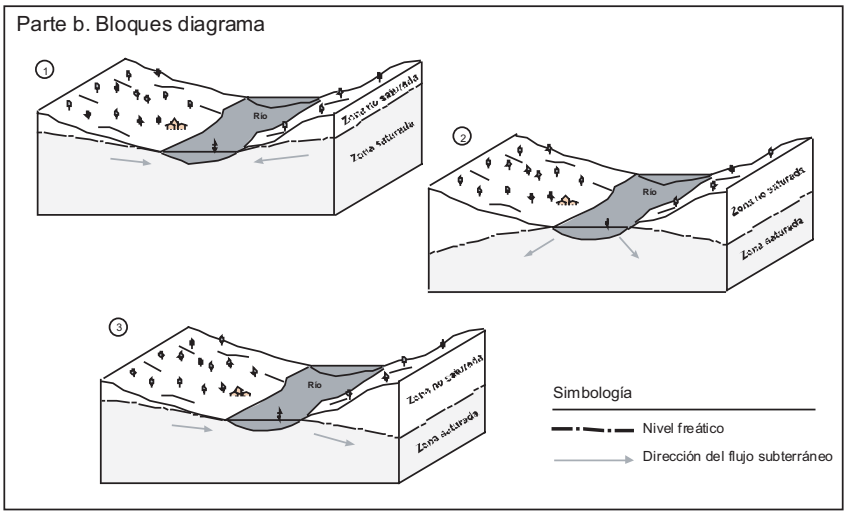


Figura 12.-. Mapa y esquemas que acompañan al enunciado del ejercicio 2, correspondiente a la opción A de la serie 6 de les pruebas se selectividad de junio de 1999 (PAAU, 1999).

Agradecimientos:

Los autores, profesores del área de Geodinámica Externa del Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Girona desean manifestar su agradecimiento a la empresa E.G.G.A. (Estudios Geotécnicos y Geología Aplicada) por poner a la disposición de los asistentes al taller de sus equipos de prospección.

BIBLIOGRAFIA

Ayala, F.J. (Dir) (1987). *Manual de Ingeniería de Taludes*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE), 455 p

Almazán, J.L. (2001). *Excavaciones, Sondeos, Muestro y Testificación. Ensayos in-situ I. En IV Curso de Ingeniería Geológica y Geología Aplicada*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España. Madrid.

Almanza, X. (2002). Investigación del flujo del agua en acuíferos aluviales mediante métodos de prospección geofísica. *Scientia Gerundensis*, en premsa.

Carbó, J.L. (2001). *Métodos de Prospección Geofísica aplicados a la Ingeniería Geológica. En IV Curso de Ingeniería Geológica y Geología Aplicada*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España. Madrid.

González de Vallejo (2002). *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall. Madrid.

Linares, R., Lomoschitz, A., Pallí, L., Roqué, C., Brusi, D. y Quintana, A (2001). Reconocimiento geofísico del deslizamiento de Rosiana (depresión de Tirajana, Gran Canaria). *Scientia gerundensis*, nº25:35-50.

McNeill, J.D. (1980). Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Technical note TN-6, Geonics Limited, Ontario, Canada.

PAAU (1998). Proves d'aptitud per a l'accés a la Universitat. Curs acadèmic 1997-1998. Ciències de la Terra i del Medi Ambient. LOGSE. Consell Interuniversitari de Catalunya. Coordinació del COU i de les PAAU.

PAAU (1999). Proves d'aptitud per a l'accés a la Universitat. Curs acadèmic 1998-1999. Ciències de la Terra i del Medi Ambient. LOGSE. Consell Interuniversitari de Catalunya. Coordinació del COU i de les PAAU.

ANEXOS

Corrección de los ejercicios.

Pautas de corrección del ejercicio 1.

1. La respuesta gráfica al primer apartado de la pregunta se muestra en la figura 10b.

2. La zona de extracción prevista no es la más adecuada para explotar el máximo de áridos naturales posibles ya que afloran litologías (esquistos y pizarras) que se pueden aprovechar para la obtención de este tipo de roca industrial.

Si como consecuencia de un periodo de lluvia se produce un ascenso del nivel freático, la explotación podría quedar inundada.

3. Se trata de áridos naturales. Se utilizan sobretodo en la industria de la construcción para la fabricación de hormigón. Otras utilizaciones del tipo fabricación de vidrio a partir de arenas silícicas, como abrasivos o filtro, son comparativamente, menos importantes.

4. No es una buena idea. Los materiales aluviales (gravas y arenas) objeto de explotación son permeables por porosidad y se comportan como una formación acuífera. Por tanto, el vertido de residuos en el hueco creado por la extracción puede originar que los lixiviados contaminen las aguas subterráneas. Es este aspecto de contaminación el impacto ambiental más notorio de este tipo de actividades antrópicas incontroladas.

Pautas de corrección del ejercicio 2.

1. La respuesta gráfica al primer apartado de la pregunta se muestra en la parte a de la figura 11b.

2. En este sector (figura adjunta) se identifica como proceso dinámico la inestabilidad gravitatorio que afecta a la vertiente. Se trata, según la información facilitada, de un movimiento lento de tipo flujo (reptación), indicativo de fenómenos de creep.

Los principales impactos se localizan en el área de influencia de los vertidos incontrolados de residuos industriales y residuos sólidos urbanos. Dentro

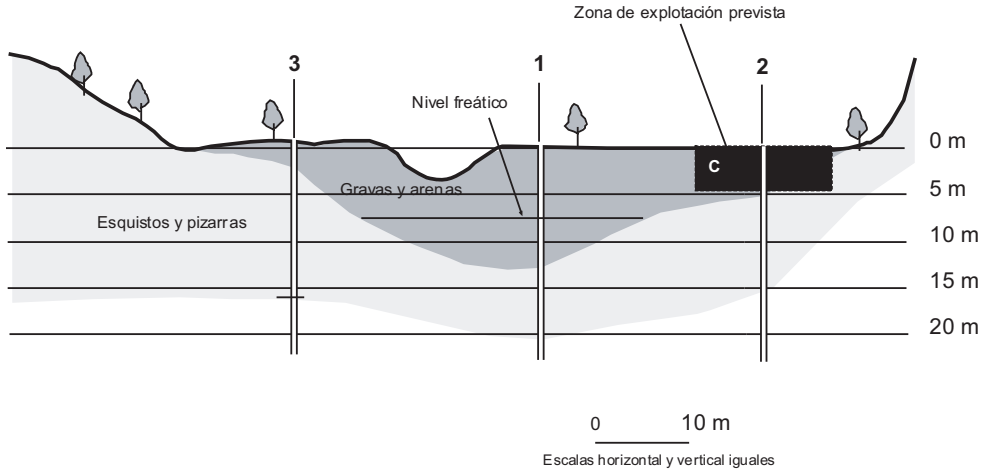


Figura 10b-. Ejemplo de solución gráfica al primer apartado del ejercicio 1, correspondiente a la serie 3 de les pruebas se selectividad de junio de 1998 (PAAU, 1998).

del contexto geoambiental representado en la figura adjunta, destaca la posible contaminación de las aguas subterráneas por lixiviados provenientes de la masa de residuos y la emisión de gases (metano) producto de su combustión.

3. Los riesgos-impactos indicados se podrían desarrollar en los siguientes puntos:

-Contaminación de aguas subterráneas.

El recubrimiento propuesto de la masa de residuos, mediante materiales permeables: gravas y arenas, no evitaría la infiltración de las aguas superficiales, y por tanto pueden percolar por la masa de residuos cargándose en contaminantes que finalmente irán a parar al acuífero infrayacente.

-Movimientos en masa.

A pesar que la excavación propuesta en la parte baja, al lado derecho de la zona ocupada por el estanque, elimina el riesgo de movimientos en masa del tipo flujo, se pueden generar otros nuevos. Se crea un talud verticalizado en el que las capas de calizas se inclinan desfavorablemente, y por tanto, potencialmente, se pueden producir movimientos tipo deslizamientos y/o desprendimientos.

-Eutrofización.

Este fenómeno se podría desencadenar en el estanque como consecuencia del aporte de agua contaminada del acuífero.

-Inundaciones por aguas subterráneas.

La excavación que se realizaría para edificar intercepta el nivel freático, por lo que el acuífero descargaría en este punto.

-Perdida de suelos.

La práctica totalidad de suelos existentes en la zona desaparecen.

-Incendios que afecten a la cobertera vegetal.

Las emisiones de gas metano pueden provocar explosiones e incendios que afecten a la cobertera vegetal.

Así pues, atendiendo a los riesgos-impactos que de manera potencial se desarrollarían, el grado de idoneidad de la actuación urbanística propuesta es bastante deficiente.

Pautas de corrección del ejercicio 3.

1. La solución gráfica no es, evidentemente, única; pero se debe aproximar a la presentada en la figura 12b.

Como se observa en esta figura se trata de los bloques diagramas número 1 para la zona A y número 3 para la zona B. El primero, esquematiza la relación río-acuífero existente en la zona situada en las inmediaciones del río en el tramo comprendido entre los pozos números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 11. En este

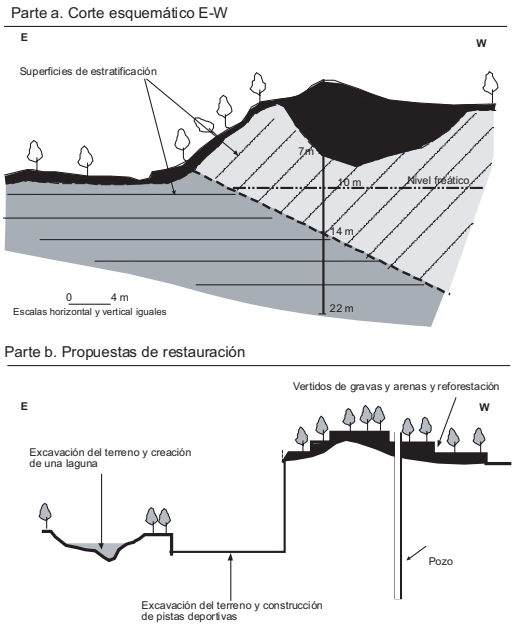


Figura 11b.-. Solución gráfica del ejercicio 1 correspondiente a la serie 6 de les pruebas se selectividad de junio de 1999 (PAAU, 1999).

sector el río actúa como colector del sistema, ya que recibe aguas subterráneas por ambos márgenes. El bloque número 3 esquematiza una relación río-acuífero en la cual el primero recibe los aportes subterráneos del acuífero en un margen, y a la vez participa en la recarga del acuífero por el otro margen. Esta situación es la que se observa en la zona comprendida entre los pozos números 8, 9, 12 y 13, aproximadamente.

2. En este caso, la respuesta del alumno ha de ser coherente con su mapa piezométrico. En la figura adjunta (parte b de la figura 12b) se ha dibujado la solución a partir del mapa que hemos elaborado anteriormente y que sirve de guía del que debe ser la respuesta del alumno. ■

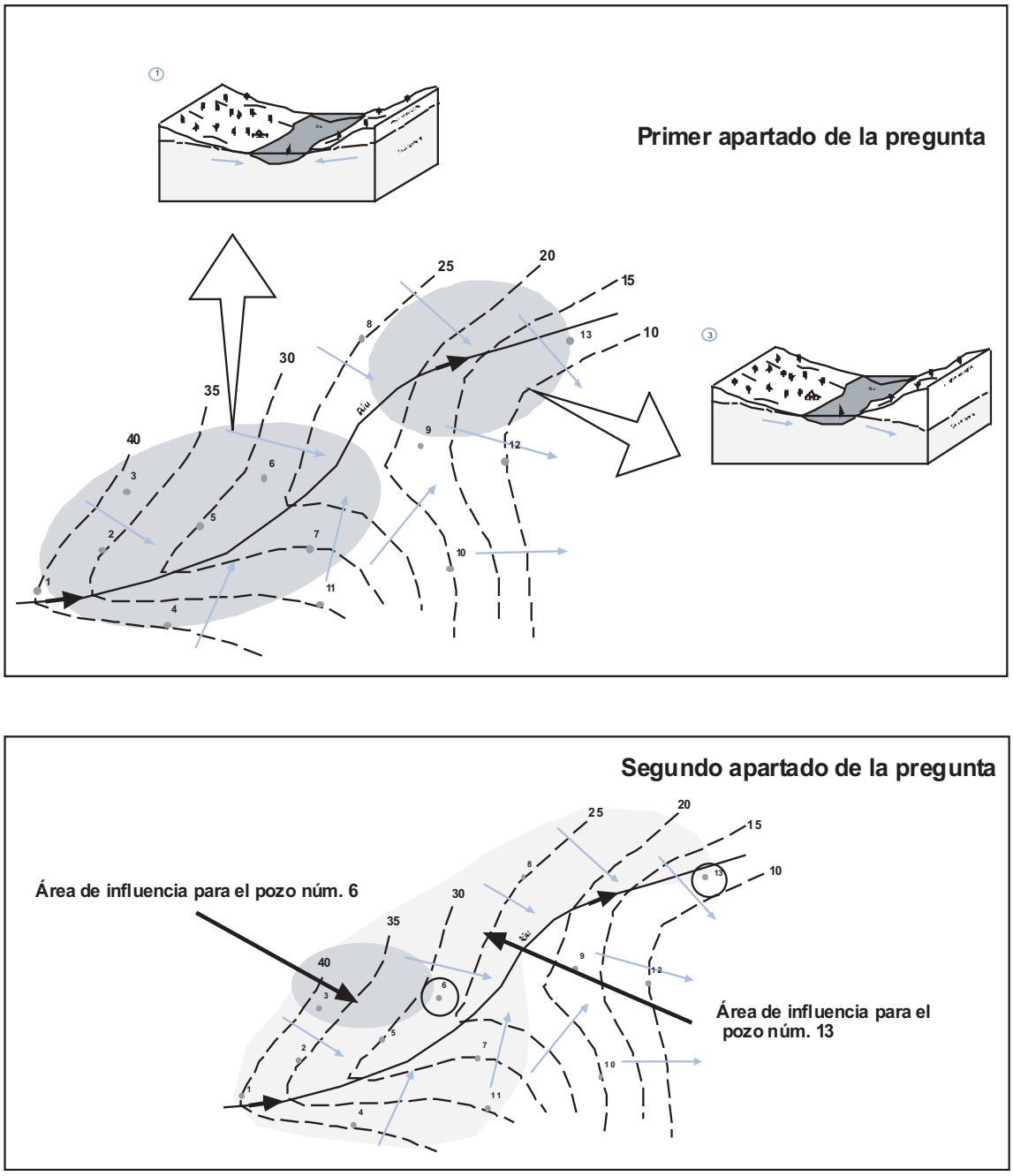


Figura 12b.-. Ejemplos de soluciones gráficas del ejercicio 2, correspondiente a la opción A de la serie 6 de les pruebas se selectividad de junio de 1999 (PAAU, 1999).