

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DEL SUBSUELO

La Geofísica constituye una disciplina mixta entre dos ciencias: la Física y la Geología y, como tal, se nutre de ambas para aportar una serie de conocimientos útiles tanto para una como para otra. La prospección geofísica puede considerarse la parte de la Geofísica que emplea esos conocimientos de forma aplicada para prospectar el terreno y determinar diferentes características del subsuelo. Esta rama aplicada de la Geofísica constituye una herramienta de apoyo a la Geología, la Hidrogeología, la Minería, el Medio Ambiente y la Geotecnia.

Con esta afirmación se quiere resaltar que, si bien los datos que se obtienen en campo con los distintos aparatos constituyen la información real de partida, hay que tener en cuenta dos aspectos importantes: En primer lugar, deberá tenerse mucha cautela a la hora de realizar la interpretación de los mismos y, en segundo lugar, al ser los resultados obtenidos un apoyo al resto de la información (estratigrafía, hidrogeología, estructuración, etc), deberá evitarse, en la medida de lo posible, su utilización de forma aislada.

Dentro de la prospección geofísica hay numerosos métodos, cada uno basado en un fundamento específico. Entre todos ellos puede establecerse una distinción en dos grupos: métodos de superficie, que prospectan el terreno desde superficie, y métodos de sondeos, que hacen la medición directa de parámetros del subsuelo mediante la introducción de sondas en sondeos. El empleo de un método u otro vendrá condicionado por varios parámetros: El objetivo perseguido, las condiciones del entorno, las condiciones geológicas y el coste previsto

1.- TÉCNICAS GEOFÍSICAS. PRINCIPALES MÉTODOS DE PROSPECCIÓN

Se va a detallar, a continuación, una serie de métodos que, sin ser todos los existentes y utilizables en la actualidad sí son un reflejo de los más representativos por su frecuente empleo en la investigación geológica con fines hidrogeológicos. Cada uno de ellos estudia la distribución en el subsuelo de alguna determinada propiedad físico-química de las unidades litológicas del subsuelo o de alguna característica relacionada con dichas propiedades.

Clasificación de métodos más comunes:

- Métodos eléctricos
- Métodos electromagnéticos
- Métodos Gravimétricos
- Métodos Sísmicos

Aunque se haya realizado esta clasificación podrían haberse tenido en cuenta otros factores de agrupación. Por ejemplo, los Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT) se agruparían en los métodos de prospección electromagnética, conjuntamente con el georrádar y el VLF (Very Low Frequency), siendo su mayor parecido de aplicación y resultados con los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

Independientemente de una u otra clasificación, lo importante es conocer la existencia de los métodos de prospección geofísica del subsuelo y cual es la aplicabilidad de cada uno de ellos.

1.1.- Métodos de Prospección Eléctrica

Dentro de estos métodos, que son los más conocidos por su carácter generalista y ser

empleados desde hace décadas, destacan los sondeos eléctricos verticales (SEV) y, cada vez con más importancia, la tomografía eléctrica.

Estos métodos prospectivos se basan en el estudio de la respuesta de los materiales ante los campos de potencial eléctricos, tanto naturales como provocados de manera artificial. Su aplicación en hidrogeología es tanto para la localización en el subsuelo niveles acuíferos como para caracterizar su calidad y su posible contaminación. En cualquier caso, el método trata de determinar, identificar o diferenciar diversos aspectos geológicos en base a diferencias de comportamiento eléctrico.

Por ejemplo, un nivel acuífero tiene unas determinadas propiedades de conductividad eléctrica que permite diferenciarlo de las propiedades eléctricas de niveles impermeables. También un acuífero contaminado por la salinización que causa la intrusión marina presentará un carácter muy conductor.

Con estos métodos eléctricos se habla de resistividad, que se expresa en ohmios por metro. Es la propiedad que tienen los materiales para oponerse al paso de la corriente eléctrica a su través. Cuando un material opone mucha resistencia a esa conducción eléctrica se dice que es muy resistivo, frente a los materiales que se denominan conductores en virtud de la facilidad que presenten para que se realice esa conducción.

Por lo general puede decirse que los materiales litológicos son todos muy resistivos pero hay una serie de factores que los hace más o menos resistivos:

- La proporción de volumen de poros frente a volumen total de la roca. A priori, a mayor volumen de poros puede esperarse una menor resistividad.
- De la disposición geométrica de dichos poros (denominado factor de formación). A mayor conexión de poros implica una menor resistividad.
- De la proporción de poros rellenos de agua frente a poros secos. A mayor proporción de poros rellenos de agua, la resistividad va a ser menor.
- De la resistividad o conductividad de dicha agua. A mayor conductividad del agua, menor será la resistividad de la formación.

1.1.1.- Sondeos Eléctricos Verticales

De entre los métodos más comunes, el más conocido o aplicado a la investigación hidrogeológica es el método de las resistividades. Dentro de este método destacan los SEV como modalidad más universalmente conocida, si bien hay otras modalidades que pueden ser de utilidad como es el caso de las calicatas eléctricas.

Una vez emplazado el equipo de medida y emisión de corriente se colocan los cuatro electrodos siguiendo una línea, que es la dirección de apertura del dispositivo. A ambos lados del punto de medida se disponen los electrodos M y N una distancia determinada y los electrodos A y B otra distancia algo mayor. Se emite corriente al terreno y se determina la R. Sucesivas separaciones a determinadas distancias del dentro darán medidas de R que constituirán un listado de valores de R *versus* separación de electrodos. Representado ese listado en un papel logarítmico se obtiene una curva de resistividades cuya morfología va a depender de los espesores de las capas y su naturaleza.

Este dispositivo descrito es el denominado dispositivo tetraelectrónico simétrico Schlumberger, el más conocido y empleado en la reconstrucción litológica del subsuelo para investigaciones hidrogeológicas. Otros dispositivos conocidos son Wenner y Dipolo-Dipolo, con configuraciones electrónicas diferentes.

Mediante el empleo de programas especiales se obtiene como resultado, para cada SEV, una

columna de capas caracterizadas por un determinado espesor y una determinada resistividad. La correlación de estos datos en perfiles da lugar a los perfiles geoelectricos y su correlación de planos da lugar a planos de isoresistividad. La atribución litológica posterior a cada unidad geoelectrica es la que permite obtener como resultado cortes y planos del subsuelo que deberán estar apoyados, en la medida de lo posible, por información de superficie y de sondeos.

1.1.2.- Tomografía Eléctrica

La tomografía eléctrica se presenta, entre todos los métodos, quizás como el más polivalente y de resultados más inmediatos (Aracil, et al. 2002). Podría decirse que la mayor parte de los objetivos perseguidos en el subsuelo pueden acometerse mediante el empleo de esta técnica que, gracias a la tecnología actual, permite ver los resultados obtenidos casi en tiempo real.

La tomografía eléctrica es un método prospectivo geoelectrico no destructivo que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, es decir, que diferencia los mismos en función de resistividad eléctrica, propiedad de los materiales que indica su grado de oposición a conducir la corriente eléctrica a su través, es decir, la opuesta de la conductividad.

Este método se basa en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de un perfil, con una separación determinada. Todos los electrodos se conectan a un cable que, a su vez, va unido al equipo de medida y, mediante un programa secuencial específico que se crea para cada objetivo, el aparato "ordena" a cada electrodo si debe o no emitir o si debe o no recibir corriente en cada momento. Es decir, se programan cuáles deben ser los cuádrupolos de todo el perfil que funcionan en cada momento y con qué disposición (Loke, 2000).

Cada uno de estos cuádrupolos hace una medida de la resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico del subsuelo cuya posición y profundidad en el perfil depende de la posición de dicho cuádrupolo y de la separación entre los electrodos que lo conforman. En la figura 1 se puede ver un esquema de medida de un perfil.

Los perfiles de tomografía eléctrica son secciones del terreno que reflejan la distribución de valores de resistividad a distintas profundidades correspondientes a diferentes capas de investigación. El perfil obtenido contiene la distribución de medidas de resistividad aparente que ofrece una visión distorsionada o tan sólo aproximada de los valores reales en el subsuelo porque la forma y contornos de las imágenes dependen tanto del tipo de dispositivo electródico utilizado como de la distribución real de resistividad en el subsuelo (Loke, 2000). Dicho perfil inicial formado por resistividades aparentes se refina mediante un programa informático específico para modelado que, utilizando cálculos analíticos por diferencias finitas y tras sucesivas iteraciones automáticas, ajusta los valores medidos a un modelo 2D muy aproximado a la distribución de valores de resistividad real.

La profundidad de investigación depende del espaciado entre electrodos y del dispositivo seleccionado pudiendo alcanzarse los 200 m de profundidad, si bien menores penetraciones en el subsuelo repercuten positivamente en una mayor resolución, ya que a menor profundidad mayor densidad al utilizarse una malla más cerrada. En principio, la resolución de la investigación disminuye con la profundidad logarítmicamente (Dahlin y Loke, 1998).

Cuando se trata de estudios sobre estructuras complejas, la densidad de medidas es un factor primordial, especialmente cuando existe ruido, ya que una malla de medidas demasiado dispersa podría dejar pasar por alto rasgos del subsuelo verdaderamente importantes o podría generar falsas estructuras (Dahlin y Loke, 1998).

De entre los numerosos objetivos hidrogeológicos que pueden abordarse con esta técnica destacan: la localización de acuíferos y determinación de su morfología y profundidad; la

determinación de su calidad y la identificación de la cuña de intrusión marina.

1.2.- Métodos de prospección electromagnética

La prospección electromagnética se basa en que un campo magnético alterno inducirá una corriente en un material conductor. Si no existe material conductor, un campo electromagnético dado tendrá ciertas características, pero si existe material conductor, será diferente y esta diferencia puede reconocerse y medirse. Desde el punto de vista de la Geofísica esto quiere decir que existe una anomalía en el subsuelo cuando el campo se aparta de las características que debe cumplir un campo normal.

Los métodos electromagnéticos responden a las propiedades eléctricas del subsuelo, cuya propiedad principal es la resistividad. Los equipos son muy diferentes en virtud de los distintos tipos de dispositivos que se utilizan y las profundidades de investigación y la metodología de trabajo, pero en todos es similar el principio de actuación: todos se componen de un transmisor y un receptor. De entre los métodos electromagnéticos se van a comentar las características principales de los dos siguientes: Sondeos Electromagnéticos en la modalidad del Dominio de Tiempos (SEDT) y VLF (Very Low Frequency) ya que son los de más frecuente utilización en trabajos de prospección hidrogeológica.

1.2.1.- Sondeos Electromagnéticos

Los SEDT son una modalidad de prospección geofísica que guarda parecidos muy importantes con el de los SEV y, por lo tanto, la explicación del mismo va a hacer continuadas referencias al método de prospección eléctrica. Se denominan sondeos electromagnéticos porque se basan en la lectura de la resistividad eléctrica de los materiales en base al comportamiento de los materiales a la presencia de un campo magnético generado. En la modalidad del dominio de tiempos se controlan los tiempos en los que se realizan las medidas y recibe este nombre para diferenciarlos de los sondeos electromagnéticos que trabajan en la modalidad del dominio de las frecuencias.

El equipo es un sistema transmisor y receptor al que se une un cable que se dispone en superficie con forma de bucle cuadrado. Por este cable se hace pasar la corriente de intensidad constante que crea un campo magnético primario. Al cortar bruscamente esta corriente se inducen unas corrientes en el terreno que crean un campo magnético secundario que, al actuar sobre el cable del bucle, que funciona también como receptor, induce un voltaje que es medible. Este voltaje dependerá de la resistividad de las formaciones del subsuelo y, por tanto, de las características del subsuelo.

La realización del SEDT consiste en medir el voltaje inducido en cada instante (denominado transitorio). Las medidas las toma el aparato en unos tiempos determinados, desde la generación del campo magnético secundario hasta la extinción del mismo (1 ó 2 segundos después). Estos tiempos de medida son las ventanas de tiempo en las que se produce la lectura y se consigue abriendo y cerrando el circuito emisor varios centenares de veces, promediando las lecturas de cada ventana para minimizar el error que pueda producir el ruido.

Sus características más importantes son:

- Respuesta muy focalizada, lo que evita los no deseados efectos laterales de los SEV.
- Penetración a través de materiales de alta resistividad insalvables o poco operativos para los SEV. Tal es el caso de las arenas eólicas dunares, las capas de sal de gran espesor, etc.
- Operatividad. Este método suele tener una mayor la facilidad operativa que los SEV.
- Señal más pura: las lecturas de resistividad de cada ventana de tiempo son representativas de esa capa, actuando el resto de la sección como medio "transparente".

- Fiabilidad de la medida. Cada ventana de medida en un SEDT da una gran fiabilidad a los resultados ya que opera por repetición del proceso un mínimo de 256 veces.

El resultado final lo constituyen las curvas de SEDT, parecidas a las de los SEV pues se trata de una representación en papel logarítmico de valores de resistividad medidos frente a la ventana de tiempo de las lecturas (en el caso de los SEV, la resistividad se representa con respecto a la separación de electrodos). La introducción de los datos en un ordenador y su posterior procesado, partiendo de un premodelo geológico, dará lugar, por cada SEDT, a una columna de capas caracterizadas por una resistividad y un espesor.

Las ventajas de este método con respecto a los SEV ya se han visto al describir las características de los SEDT, pero también hay inconvenientes, destacando entre ellos, la menor resolución de este método en los sectores más superficiales del subsuelo. Se puede generalizar que, por encima de 50-75 m de profundidad y para objetivos de potencia inferior a 10-20 m, es más aconsejable el empleo de los SEV ya que sus posibilidades resolutivas son mayores.

1.2.2.- VLF

El denominado VLF (de las iniciales de Very Low Frequency) es otro método geofísico basado en la prospección electromagnética. Tiene un campo de actuación más limitado en el sentido de que su empleo se reduce a la detección de fracturas, su caracterización y orientación y siempre en materiales competentes y homogéneos (por ejemplo granitos) a ser posible localizados bajo una capa fina de materiales conductores (por ejemplo arcillas). Esto no quiere decir que sólo funciona en estas condiciones sino que si se dan éstas, las probabilidades de éxito son mucho más grandes.

Los aparatos de medida utilizan los componentes magnéticos del campo electromagnético generado por transmisores de larga distancia en la banda de muy baja frecuencia (de ahí el nombre very low frequency), que operan a 10-30 kHz. Hay una serie de antenas distribuidas por el mundo (Francia, Inglaterra, Noruega, Canadá, Japón, Estados Unidos, Alemania, etc) que emiten ondas de radio de manera continuada y que llegan a las antenas de los receptores de estos equipos en forma de una señal constante. Sólo en presencia de estructuras conductoras cercanas a superficie es afectada su dirección generándose un campo secundario que da lugar a un "pico" en la lectura. La detección del mismo y su distorsión es lo que permite localizar estas estructuras, sus características y orientación.

La metodología de trabajo es sencilla pues el aparato también lo es. Las operaciones aconsejan realizar una serie de perfiles paralelos para detectar en varios las anomalías. De esta manera, con la identificación de la anomalía en más de un perfil se le da más peso a la misma y, al mismo tiempo, se puede definir su dirección.

1.3.- Métodos de prospección gravimétrica

Este método se basa en la medida en superficie de las anomalías de la componente vertical del campo gravífico terrestre. Un hipotético subsuelo formado por una masa litológica homogénea no presentaría anomalías, pero la real distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades (litologías y texturas distintas dan densidades diferentes) da lugar a la existencia de esas anomalías. Su detección, medición e interpretación conllevan la identificación más o menos probable de esas masas diferentes en el subsuelo.

Los resultados aportados con este método no indican la presencia o no de niveles acuíferos. Su aplicación fundamental se centra en la determinación de la estructuración de cuencas permitiendo estos resultados, en combinación con otros métodos, determinar sectores más

adecuados para la captación de aguas subterráneas. Es, por tanto, un método que se emplea como complemento de otros métodos y siempre en trabajos de índole regional.

La metodología consiste en distribuir en campo una serie de estaciones de medida y medir en ellas el valor de la gravedad mediante el empleo de un gravímetro. Este aparato no es más que una balanza extremadamente sensible que acusa las diferencias en el peso de una masa cuando ésta se sitúa en lugares diferentes. Es decir, que mide los cambios de peso que experimenta una masa que tiene en su interior. Estos cambios son debidos sólo a la fuerza de la gravedad ya que, por su blindaje, está exento de la afección de los que pueden producir la presión y/o la temperatura.

Esta medida de la gravedad varía con los siguientes parámetros:

- Con la latitud, debido a que la Tierra no es esférica.
- Con la altitud. A este respecto, está influida por tres aspectos que obligan a su corrección para tener el dato real:
 - Corrección de aire libre o de Fayé: debido a su altura respecto al centro de la Tierra.
 - Corrección de Bouguer: Efecto gravífico del terreno comprendido entre la estación (plano de cota h) y el nivel del mar
 - Corrección topográfica: Eliminación del efecto gravífico de las masas situadas por encima y por debajo del nivel h de la estación, ya que el plano h se supone horizontal en la corrección de Bouguer.

Con estas correcciones hechas y una serie de calibraciones del aparato, del establecimiento de bases gravimétricas, de controles, etc., se obtiene el mapa de anomalías de Bouguer en la zona de estudio, que es el mapa que contiene el efecto integrado de todas las masas terrestres. Pero una anomalía consta de dos componentes: una regional (de gran amplitud de onda o baja frecuencia) y otra residual (de baja amplitud de onda o alta frecuencia). La separación de ambas consiste en predecir los efectos regionales y encontrar las anomalías residuales (locales) restándole esos efectos regionales.

Con el mapa de anomalías residuales se puede "observar" la distribución de las distintas unidades y la estructura de la cuenca sedimentaria. En estos mapas suelen aparecer unas anomalías más o menos intensas y más o menos extensas, de distinto valor: unas son positivas y otras negativas. Las anomalías negativas indican zonas de menor densidad que la correspondiente al substrato mientras que las anomalías positivas indican sectores con valor de densidad mayor que el del substrato. Considerada una cuenca sedimentaria detrítica desarrollada en una zona granítica, por ejemplo, las anomalías negativas indicarán sectores de mayor espesor de relleno y será éste tanto mayor cuanto más intenso sea el valor de la anomalía. Las anomalías positivas indicarán la presencia de materiales más densos, como pizarras aflorantes o subaflorantes.

El conocimiento de la geología de superficie se hace fundamental para este tipo de trabajos ya que el control de las fracturas y la litología facilitan en gran medida la interpretación de los mapas y, al mismo tiempo, dan más garantías a los resultados obtenidos.

Con toda esta información se pueden obtener resultados en planta (mapas estructurales y gravimétricos), en la vertical (perfiles gravimétricos) y en volumen (bloques tridimensionales de la cuenca sedimentaria estudiada para determinar los sectores más favorables para futuras actuaciones de índole hidrogeológico, la posible existencia de una estructuración de la cuenca en bloques, el grado de hundimiento y elevación de los mismos, etc.

1.4.- Métodos de prospección sísmica

Dentro de los dos métodos de prospección sísmica existentes, sísmica de reflexión y sísmica

de refracción, es al primero de ellos al que se va a hacer referencia en este apartado ya que la aplicación de la modalidad de refracción está dirigida, casi de forma exclusiva, a la prospección sísmica con fines geotécnicos dados los resultados que de ella se obtienen.

Los métodos sísmicos de prospección requieren la inyección en el terreno de una energía que, comúnmente, se genera mediante una explosión controlada si bien también se puede producir por medios mecánicos, mediante vibrador o por martillo. Con estos medios se generan ondas sísmicas, semejantes a las sonoras, que se propagan por los materiales de diferente manera según el comportamiento elástico de los mismos, el cual viene condicionado por su litología y su textura.

La metodología de trabajo de este método prospectivo, que en la actualidad comienza a dar sus primeros pasos para la investigación hidrogeológica, es la más laboriosa, la que más personal precisa y, tal vez, la que más pasos tiene que seguir en el procesado de los datos. Por ello es el método más caro, hasta ahora de uso casi exclusivo en las campañas de prospección petrolífera y minera.

Consiste en registrar los tiempos de llegada de las ondas reflejadas en los contactos del subsuelo a una serie de detectores superficiales o geófonos. En función de los tiempos de llegada de las ondas a los distintos geófonos, localizados a distancias conocidas, se podrá conocer la posición de los estratos en profundidad que producen las reflexiones de las ondas sísmicas. Para que un contacto entre estratos dé una reflexión es necesario que exista un contraste de impedancia acústica entre ambos, parámetro condicionado en gran medida por la densidad de dichos materiales.

Este esquema que, en sí parece sencillo, se complica mucho con la topografía, la heterogeneidad de los materiales, los cambios laterales de facies, las fracturas, los pliegues, las capas inclinadas, etc. En definitiva, que para conseguir obtener una sección sísmica interpretable con garantías es necesario el paso previo de los datos por una serie de "tamices" que filtren el ruido y los errores de la señal buena, situando cada reflector en su lugar correspondiente y generando una línea en la que la componente horizontal sea la posición de los geófonos y la componente vertical la profundidad de los receptores en éstos. Aquí es donde radica gran parte de la complicación de este método prospectivo: en el procesado. El resultado final es una sección sísmica.

La situación de los geófonos, distancia entre ellos, número, fuente de energía a emplear, etc, constituyen el dispositivo a realizar. Según sean las características del objetivo perseguido y la profundidad a investigar, el dispositivo cambiará.

Una sección sísmica incrementa su valor si viene acompañada por información del subsuelo procedente de sondeos perforados en la misma sección. La razón se debe a que hay que hacer el "calado" de la línea, es decir, la identificación de los distintos, o al menos los más importantes, reflectores sísmicos para conocer el verdadero perfil geológico en el subsuelo.

Toda esta información constituye, de forma sucinta, la descripción de los métodos de prospección geofísica relacionados con la investigación hidrogeológica. Son muchos más los métodos que existen pero su enfoque está más dirigido a prospecciones de otra naturaleza: búsqueda de materias primas (minería), obra civil (geotecnia), etc.

2.- TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA DE SONDEOS

La **testificación geofísica** de sondeos no es más que la medición de diferentes parámetros geofísicos dentro de un sondeo mediante el empleo de sondas. La representación gráfica de cada uno de esos parámetros medidos con respecto a la profundidad constituye el resultado de esta técnica. Estos documentos son los denominados registros geofísicos, diagráfias o logs.

Para realizar la testificación geofísica se emplea un equipo de medida, situado en superficie, unas sondas y el cable que une ambas partes. Los equipos de medición actualmente son digitales, desde la adquisición de los datos en el fondo del pozo por las sondas, su transporte por el cable y su almacenamiento y tratamiento en el equipo.

La **metodología** general es la siguiente: una vez finalizada la perforación del sondeo se introduce la sonda y, bien durante el descenso de la misma o en su ascenso se inicia el proceso de registro.

Las **sondas** son los instrumentos que se introducen en el sondeo y que, dada la configuración de éste, condicionan que la morfología de aquéllas sea también alargada y, lo que es más importante, de escaso diámetro, para que esta característica no suponga el impedimento de la introducción de una sonda determinada en un sondeo determinado. Como los parámetros que miden son diferentes, también lo es la maquinaria que encierra en su interior lo cual va a condicionar que los diámetros sean también variables.

La testificación geofísica es necesaria por múltiples razones entre las que cabe destacar las siguientes:

- La obtención de testigo continuo es un proceso caro.
- La recuperación de testigo no siempre es posible.
- El parámetro a determinar no se puede hacer en el testigo, como es el caso de la conductividad y temperatura del fluido, el flujo, el diámetro, la verticalidad o la desviación del sondeo.

Una vez emplazado el equipo de testificación geofísica en la boca del sondeo, se procederá a la introducción de la primera sonda. Si el objetivo es hidrogeológico, siempre es conveniente que la primera sonda sea la que registre los parámetros concernientes a la calidad del agua (conductividad y temperatura del fluido). Si fuera necesario introducir más sondas, se haría a continuación.

Un sondeo hidrogeológico, por ejemplo, es frecuente realizar la testificación geofísica a sondeo desnudo para el diseño de la columna de entubación mediante la distribución de tramos de tubería de filtro y de tubería ciega.

Concluido el proceso de registro y una vez comprobada la calidad constructiva del sondeo (verticalidad adecuada) se observará en campo el registro con los principales parámetros para la colocación de filtros (radiactividad gamma natural resistividad normal corta y larga, potencial espontáneo y conductividad del fluido). La colocación de filtros dependerá de la situación y potencia de los tramos aportadores de agua y de la calidad de la misma. En el diseño final también interviene la longitud de los tramos de filtro y el tipo de tubería de filtro de que se trate (si es filtro Johnson no se puede cortar y si es tubería ranurada, si fuera necesario podría cortarse y hacer tramos filtrantes de potencias variables).

Todas estas operaciones deben realizarse con cuidado pero sin pérdidas de tiempo con el fin de minimizar el tiempo de paralización de la maquinaria de perforación.

2.1.- Registros Geofísicos

A continuación se describen los registros geofísicos más comunes para la Hidrogeología.

2.1.1.- Radiactividad Gamma Natural.

Este registro refleja el valor de radiación gamma que, de forma natural, emiten las distintas litologías. Litologías diferentes emitirán intensidades diferentes de radiación lo que permitirá diferenciar capas de distinta radiactividad natural y, por atribución, capas de distinta litología (Rider, 1986).

Este registro es el más común y el más relacionado con la litología. Entre las aplicaciones principales de este registro se pueden resumir en dos: la identificación litológica y la determinación del porcentaje de contenido en arcillas.

Con respecto a la identificación litológica este registro permite hacer una reconstrucción litológica de la columna de materiales atravesados por el sondeo en tanto que las distintas litologías tienen un diferente comportamiento desde el punto de vista de radiación emitida de manera natural. Parece pues lógico pensar que a partir de un registro geofísico de este tipo se va a poder generar una columna litológica.

Si bien esto es cierto, siempre hay que hacerlo con reservas. Es muy importante disponer de los datos aportado por las muestras de la perforación (ripios o testigos) pues muchas veces hay litologías que pueden dar valores de radiactividad parecidos. Una serie en la que alternan capas de caliza con capas de margas puede confundirse con una serie detrítica de alternancia de arenas cuarcíticas con arcillas. Tanto las calizas como las cuarzoarenitas tienen bajos valores de radiactividad y tanto las margas como las arcillas presentan valores altos.

La otra aplicación de este registro geofísico, la estimación del porcentaje de contenido en arcillas de una formación detrítica, es menos importante para la hidrogeología ya que es más útil para la estimación del porcentaje de arcillas que pueden tener las unidades de áridos explotables (gravas, arenas).

2.1.2.- Potencial Espontáneo

Este registro refleja las medidas de la diferencia de potencial natural entre un electrodo localizado en el sondeo y otro emplazado en superficie. Estas diferencias de potencial se generan a partir del desequilibrio eléctrico creado al poner en contacto, mediante un sondeo, formaciones litológicas que naturalmente están desconectadas.

Para que se produzcan estas diferencias de potencial se hace necesaria la coexistencia de tres factores: existencia de un fluido conductor en el sondeo, presencia de una capa permeable rodeada por una formación impermeable y una diferencia de salinidad (o presión) entre el fluido del sondeo y el agua de formación. Con todo ello se producen las corrientes potenciales al entrar en contacto los fluidos correspondientes a partir de un medio poroso o de un medio semipermeable (en función de que sea uno u otro medio la polaridad va a ser opuesta, positiva o negativa, respectivamente).

Entre las aplicaciones más importantes de este registro destaca la determinación de la permeabilidad o impermeabilidad de las capas, es decir, que permite diferenciar las capas que contienen agua y son permeables de las capas que son impermeables (o que están cementadas) y, por otro lado, diferenciar las capas permeables con agua dulce de las que contienen agua salinizada.

2.1.3.- Resistividad

Es el registro que refleja la propiedad intrínseca de cada material para oponerse al flujo de la corriente eléctrica. Este parámetro, opuesto a la conductividad, es muy elevado en los materiales que forman la roca (cuarzo, calcita, dolomita), del orden de 100×10^6 ohmxm, pero el agua de los poros y la capacidad del cambio catiónico de los minerales arcillosos reducen su valor en gran medida. Al final, la resistividad de una formación va a depender de diversos aspectos, como:

- La salinidad del agua de formación
- El volumen de saturación de agua en los poros
- La geometría de los poros
- La temperatura de la zona
- La morfología y tipos de minerales arcillosos

La resistividad va a ser, por tanto, función de la litología y su textura (porosidad, fracturación, etc). En términos generales, calizas, dolomías, areniscas y granitos, por ejemplo, van a presentar mayores resistividades que arcillas, margas o calizas fracturadas, dolomías fracturadas o granitos fracturados o alterados. Esta fracturación y/o alteración va a ser uno de los condicionantes del descenso de valor de resistividad de dicha formación.

Teniendo en cuenta que una formación porosa o fracturada va a sufrir invasión por el lodo, esta invasión a condicionar que la resistividad varíe entre la zona invadida y la zona virgen. Si la resistividad somera y la profunda son iguales implica que la invasión es muy penetrante (poca porosidad o fracturación). Si es mayor la profunda, implica que el agua de la formación es más dulce que el lodo de perforación. Si, por el contrario, es menor la resistividad de la formación, es indicativo que el agua de la formación es más salina que el lodo.

Dada la importante relación entre resistividad y litología, este registro es uno de los más empleados para cuestiones dirigidas a la interpretación litológica y de la textura. Así, una formación calcárea presentará una determinada resistividad alta y los descensos en dicho valor van a indicar tramos de mayor porosidad, relacionados con presencia de fracturas.

2.1.4.- Conductividad y Temperatura del Agua

Este registro geofísico refleja el valor de conductividad del agua contenida en el pozo. Las sondas pueden medir o la conductividad o la resistividad o ambas. La conductividad del agua es un parámetro que, en cierta medida, indica la mayor o menor concentración de sales en la misma, es decir, su salinidad dado que los incrementos en la concentración de sales en un fluido van a facilitar la conducción de la corriente eléctrica.

Esta característica que presentan los fluidos puede variar en función de la temperatura. Para una misma concentración, a mayor temperatura, la conductividad va a ser también mayor y, a menor temperatura, la conductividad disminuye. Por esta razón, de forma combinada a la resistividad, se mide la temperatura del fluido con la misma sonda para observar dos aspectos: por un lado, comprobar que las posibles variaciones de conductividad son debidas a variaciones en la concentración de sales y no a variaciones de temperatura y, por otro lado, para corregir en el registro de la conductividad el efecto que produce la temperatura.

Entre las ventajas de este registro destaca la posibilidad de ver de forma continua el valor y la variación en la vertical de este parámetro, continuidad que no pueden ofrecer ni el conductímetro ni la sonda tomamuestras. Es esta continuidad la que permite identificar los aportes de agua de las diferentes capas, la posición de interfases de agua e, incluso, inferir la existencia de flujos dentro del sondeo.

2.1.5.- Flowmeter

Con la sonda medidora de flujo lo que se pretende es realizar una medición de un registro continuo que señala la velocidad de flujo vertical en el interior del sondeo. Se trata, en definitiva, de localizar las capas productivas atravesadas y calcular su porcentaje de aporte al sondeo.

Hay dos tipos de herramientas medidoras de flujo: la sonda Heat Pulse Flowmeter y la sonda Flowmeter. La sonda Heat Pulse se emplea para determinar flujos pequeños. Su mecanismo está diseñado para descender por el pozo y detenerse en diferentes cotas y realizar la medición. Dispone de una resistencia eléctrica que calienta el agua en la cota donde se detiene y mide el tiempo que la onda de calor recorre la distancia entre ésta y los termistores localizados por encima y por debajo de ésta. El sentido del flujo se determina por el orden de calentamiento de los sensores: si el flujo es descendente, se calentará primero el termistor inferior y si es ascendente, el superior.

En la sonda Flowmeter el principio de medida es similar al de los molinetes empleados en los ríos. Es una sonda dotada de "una hélice muy sensible que gira a una velocidad variable en función de la velocidad del flujo y de la velocidad de ascenso y descenso de la sonda por el sondeo" (Aracil, 1998).

2.1.6.- Verticalidad y Desviación

La sonda que mide la verticalidad del sondeo proporciona, con dos inclinómetros que definen los ejes menores de la sonda (Plata et al., 1986), un registro continuo de la desviación del pozo con respecto a la vertical. Así, si el sondeo es vertical, su desviación será de 0° y los grados que mida serán aquellos que se desvíe de la vertical. Del mismo modo, con una brújula, registra de forma continua la orientación de cada profundidad del pozo con respecto al Norte Geográfico.

Estos registros, fundamentalmente el de verticalidad, son muy importantes para definir la calidad constructiva del sondeo lo cual está muy relacionado con la fase inmediatamente siguiente a la perforación y testificación geofísica del sondeo que es la entubación del mismo. Considerado un sondeo hidrogeológico, si está vertical ni la entubación ni el engravillado van a acarrear, en principio, problemas. Pero si tiene una cierta desviación pueden surgir problemas a la hora de entubar y, sobre todo, a la hora de engravillar el sondeo ya que, en determinados puntos apoyará la tubería en la formación y, si en esos puntos de apoyo la litología es arcillosa o limosa, puede entrar material fino por los filtros al pozo.

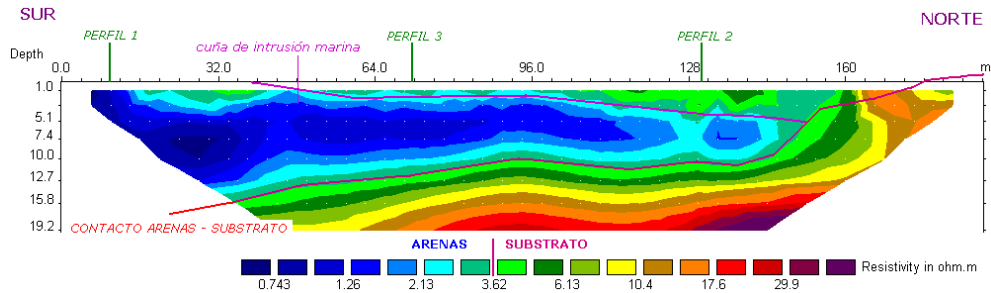
En definitiva, se trata de un registro geofísico de calidad de la perforación que debe registrarse con el sondeo desnudo o entubado con PVC ya que la tubería de hierro impide la determinación de la orientación del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

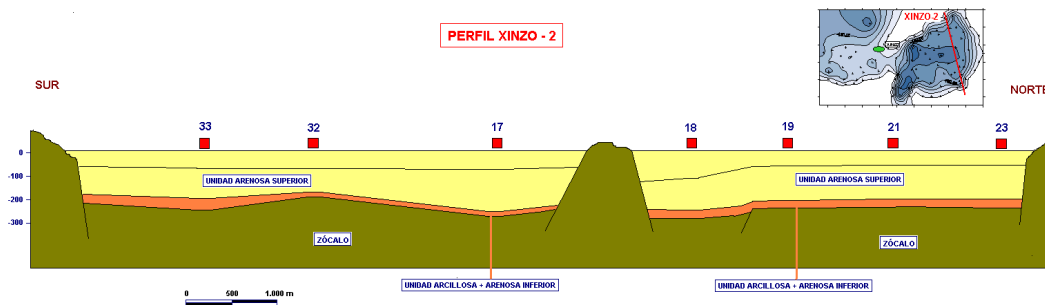
- Aracil, E. (1998). Inspección, control de calidad, envejecimiento y regeneración de pozos. Libro de Comunicaciones de las Jornadas Técnicas de Agua Subterránea y Abastecimiento Urbano. CYII. Madrid
- Aracil, E.; Maruri, U.; Porres, J.A.; Espinosa, A.B. (2002): La tomografía eléctrica: una herramienta al servicio de la obra pública. Rock Máquina.
- Dahlin, T., Loke, M.H. (1998): Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. Journal of Applied Geophysics, 38. 237-249 pp.

- *Loke, M.H.* (2000): Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. University of Birmingham web site, Downloads: www.bham.ac.uk/EarthSciences/people/staff/loke_m.html.
- *Plata, J.L.; Alonso, T.; Alberdi, R.; Aracil, E.* (1996). Testificación geofísica de sondeos mecánicos: divulgación y desarrollo metodológico de esta técnica. INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA..Gráficas Baraza, s.l. Oviedo
- *Rider, M.H.* (1986): The geological interpretation of well logs. Blackie & Son Ltd. Londres. 175 pp.

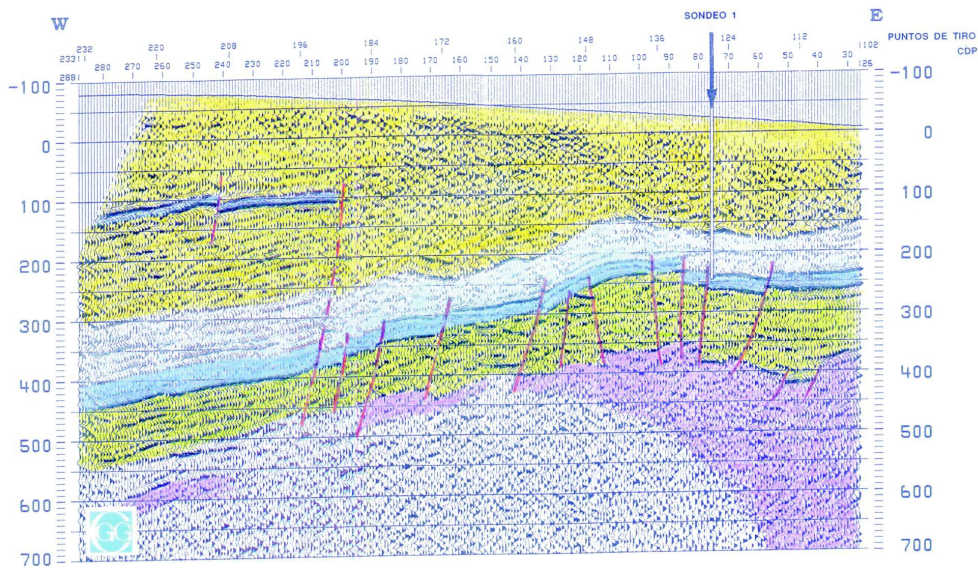
FIGURAS



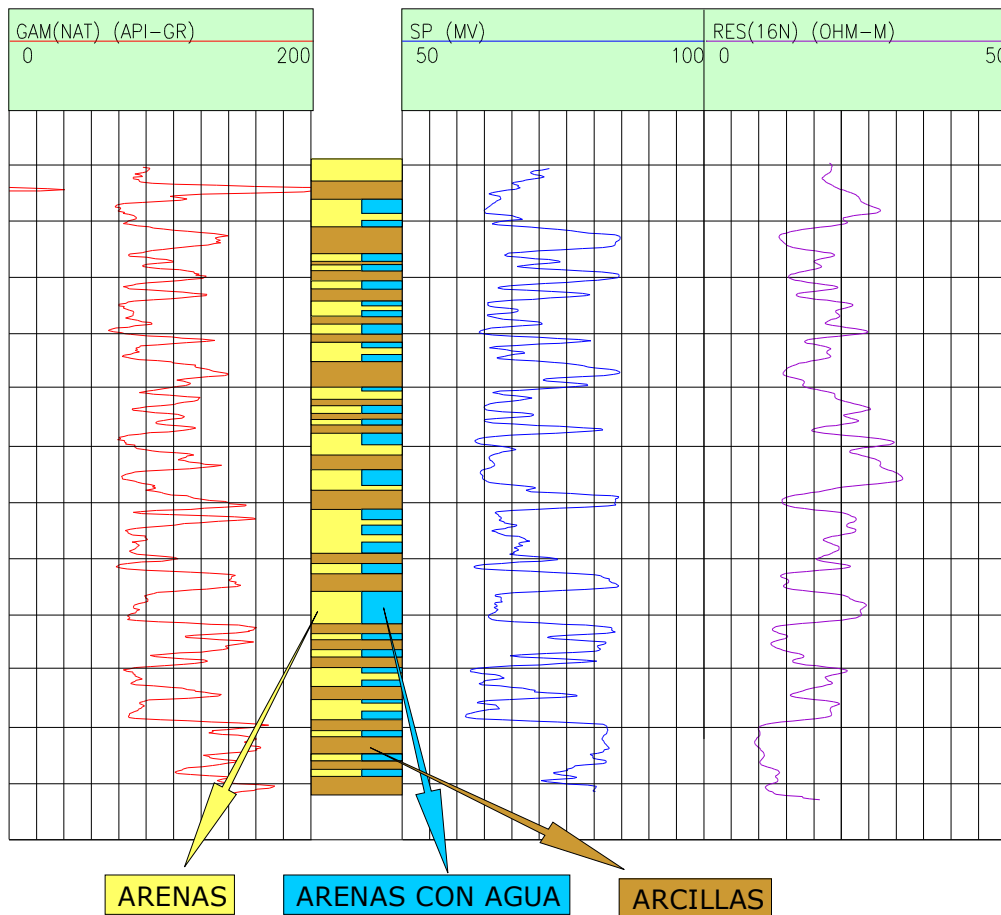
Cuña de intrusión marina en un perfil de Tomografía Eléctrica.



Perfil y mapa de isopacas de una unidad detrítica mediante SEDT



Sección sísmica con un sondeo para calar una unidad de carbonatos



Registros geofísicos de Radiactividad Gamma Natural (izquierda), Potencial Espontáneo (centro) y Resistividad Normal 16" (derecha) obtenidos en un sondeo perforado en la Cuenca Detrítica de Madrid para identificación de niveles arenosos y determinación de su contenido en agua.