

# MÉTODOS GEOFÍSICOS NO DESTRUCTIVOS PARA PREDECIR EL TERRENO POR DELANTE DE LAS TUNELADORAS

---

**J.M. Galera**           **(Geocontrol, S.A.)**  
**S. Pescador**       **(In Situ Testing, S.L.)**

---

## 1.- INTRODUCCIÓN

El Túnel del Estrecho de Gibraltar se excavará mayoritariamente en flysches arcillosos y, en menor medida dependiendo de la rasante finalmente adoptada, en formaciones cuaternarias post-tectónicas compuestas por brechas arcillosas.

Desde un punto de vista simplificado las principales formaciones son:

- ✚ **Fm Almarchal**, de carácter margoso y/o arcilloso con presencia de olistolitos de composición más carbonatada.
- ✚ **Fm Aljibe**, de carácter más arenoso y arcilloso.
- ✚ **Fm Bolonia**, de carácter calcáreo y arcilloso.
- ✚ **Fm Algeciras**, en la que pueden encontrarse diversos tramos margo-arenosos, pelíticos, y carbonatados.
- ✚ **Brechas cuaternarias**, formada por unas brechas con matriz arcillosa.

La geofísica es una de las técnicas de investigación que de forma habitual se utiliza en estudios geotécnicos o proyectos de infraestructuras que permite obtener información acerca del estado de las formaciones geológicas en estudio, contactos entre las mismas, zonas de fractura o fallas, etc. Existen gran cantidad de métodos geofísicos que emplean distintos fundamentos físicos en su desarrollo (sísmicos, sónicos, eléctricos, electromagnéticos, frecuencias de radio, densidad del medio, campo magnético,..) por lo que resulta relativamente sencillo seleccionar la técnica y el equipo que ofrezca mejores resultados en un medio determinado.

Previamente a la selección de la técnica y equipo a emplear es necesario conocer cual son los parámetros físicos de los materiales sobre los que se desarrollará la infraestructura proyectada. Conocer si existe un contraste de resistividad, variaciones de impedancia acústica, variaciones de densidad, etc., es fundamental, ya que va a ser el elemento que permita seleccionar la técnica y el equipo que mayor información va a proporcionar del área de estudio. Evidentemente, si el contraste entre las propiedades físicas de las formaciones es mínimo o nulo, resultará prácticamente imposible obtener información útil sobre el estado del macizo rocoso, tanto en superficie como en el frente de excavación.

Desde el punto de vista de sus parámetros físicos, la presencia en todas las formaciones, de material arcilloso, homogeniza su respuesta, sin que se pueda esperar grandes contrastes ni en la impedancia acústica ni en sus parámetros conductivos.

Por último la selección de uno u otro método geofísico dependerá de:

- ✚ las condiciones de medida,
- ✚ la precisión exigida, y
- ✚ el alcance requerido.

## **2.- ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS**

Dadas las características de la aplicación que se requiere en este caso de los métodos geofísicos, en esta ponencia se analiza la posible predicción por delante del frente de una tuneladora en un rango de profundidades variable entre 30 y 150 m.

A priori los elementos a detectar pueden ser obstáculos, bloques olistolíticos, cambios litológicos, etc.

Para la selección de uno u otro método, en el caso del túnel de Gibraltar hay que considerar los siguientes factores:

- ✚ escaso contraste entre los parámetros físicos de las formaciones involucradas (flysches y brechas arcillosas).
- ✚ balimetría máxima de 300 m (que invalida o hace muy difícil las aplicaciones túnel-superficie).
- ✚ elevadas condiciones de ruido durante la operación de la TBM.
- ✚ dificultad de acceso al macizo rocoso.

Una de las condiciones fundamentales que debe cumplir el método y equipo geofísico seleccionado es la de proporcionar la mínima interferencia con el avance de la tuneladora; por lo que debe estar implementado de tal forma que no afecte de forma alguna el proceso de excavación y no genere retrasos por su utilización. El empleo de cualquier técnica que requiera la parada expresa para su realización sería descartable.

Partiendo de ésta premisa se pueden utilizar distintos métodos que se pueden clasificar, según el fundamento físico que utilizan, en:

- ✚ Eléctricos/electromagnéticos

- ✚ Sísmicos

- ✚ Acústicos

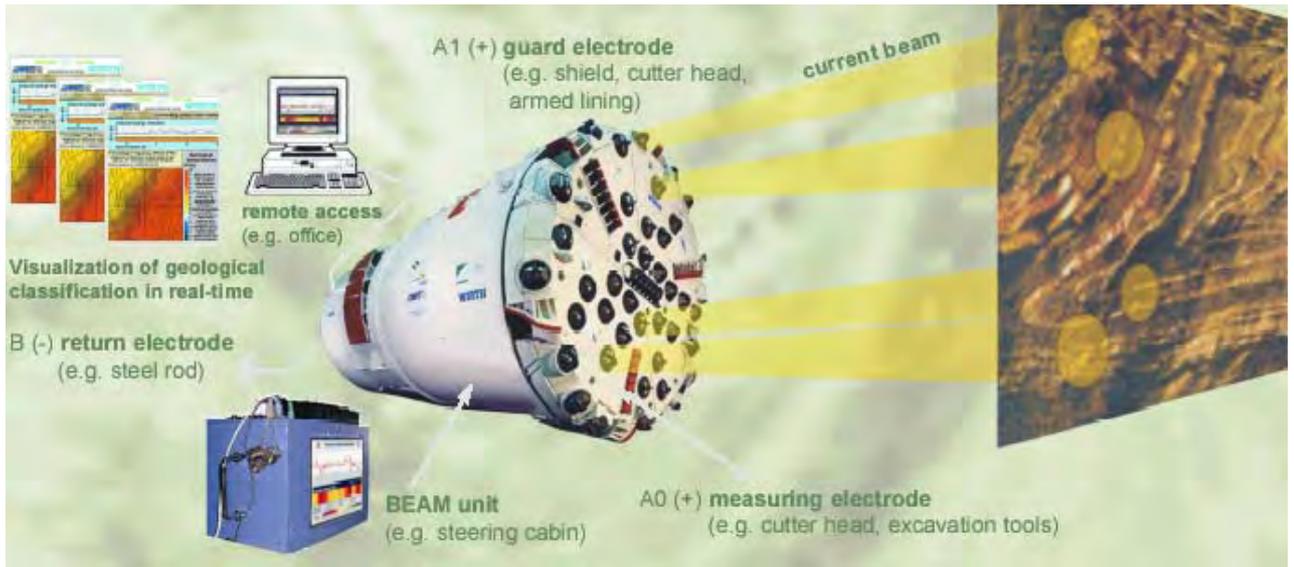
## **2.1.- ELÉCTRICOS/ELECTROMAGNÉTICOS (BORE-TUNNELLING ELECTRICAL AHEAD MONITORING)**

El sistema BEAM se desarrolló por la empresa GEOHYDRAULIK DATA en 1998, comenzando con ensayos de laboratorio y test a pequeña escala y realizando modelado según elementos finitos en 3 dimensiones. Su empleo en una WIRTH TBM (Túnel de Ginori-Italia) y estudio de karstificación (túnel Irlahül-Alemania) ha hecho que se implante en diversos túneles de gran longitud como sistema de monitorización permanente.

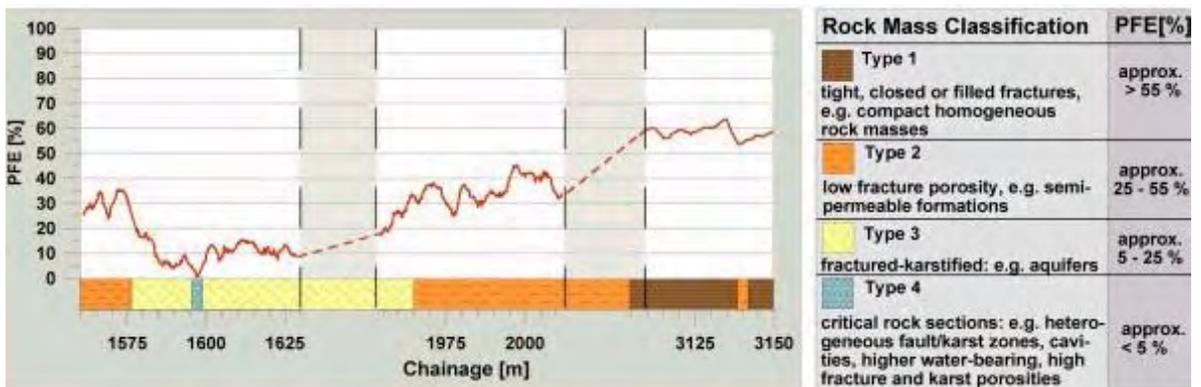
Es un sistema basado en la medida de la polarización inducida; así, se inducen corrientes de frecuencia definida que generan una zona de alta densidad de corriente en el frente de excavación. La TBM es utilizada como electrodo de medida (A0), situado tan lejos como sea posible el electrodo de guarda (A1) y finalmente, situado a una distancia adecuada estaría el electrodo de retorno (B). En la **Figura 1** se muestra un esquema general de los distintos elementos que componen el sistema BEAM-TBM.

La unidad BEAM situada en la TBM registra datos permanentemente y está controlada por un ordenador en el exterior del túnel. Los datos enviados son procesados inmediatamente y son enviados en tiempo real en la pantalla del operador de la TBM.

El parámetro que va a definir el estado del macizo rocoso ó el tipo de material que vamos a encontrar es el “porcentaje de frecuencia efectiva (PFE)”, que es un parámetro petrofísico que caracteriza el terreno en cuanto a la propiedad de almacenar energía eléctrica en él mismo. En la **Figura 2** se muestra la escala de clasificación atendiendo a los valores de PFE.



**Figura 1.- Elementos del Sistema BEAM.**



**Figura 2.- Clasificación del terreno, en función de su PFE.**

Finalmente, la distancia de predicción es de unas 2,5-4 veces el diámetro del túnel.

Recientemente este sistema ha sido empleado con resultados limitados en los túneles de Guadarrama para la detección de la Falla de La Umbría.

## 2.2.- SÍSMICOS

En este apartado se analizan los métodos sísmicos aplicables.

### **2.2.1.- TSP 203. (Túnel Seismic Prediction)**

Al igual que el sistema BEAM, mediante el TSP es posible detectar cambios en el macizo rocoso, cuerpos irregulares, discontinuidades, fallas y zonas de fracturas en el frente del túnel.

Mediante éste sistema no se requiere acceso al frente de excavación, pero es necesario un periodo de 1h-1h30' para realizar la toma de datos. El sistema se basa en la generación de un tren de ondas producido por la detonación de 24 cartuchos de entre 25 y 100 gramos de cordón detonante. Estos cartuchos se sitúan en un lateral del túnel tras realizar una pequeña perforación. Como sistema de registro del tren de ondas completo (ondas compresionales y de cizalla) se emplean dos geófonos triaxiales de gran sensibilidad que se sitúan uno a cada lado del túnel, en unas perforaciones de 43mm de diámetro que se entuban y se adhieren firmemente al terreno natural.

Los sensores triaxiales registrarán las señales sísmicas que se reflejan desde cualquier tipo de discontinuidad existente en el macizo rocoso situado en el frente de la excavación. En la figura siguiente se muestra una imagen de los frentes de onda generados y recibidos tras ser reflejados en un plano de discontinuidad.

Mediante un software apropiado se realiza un procesado semi o completamente automático de forma relativamente sencilla. La capacidad del sistema para registrar el tren de ondas completo (ondas compresionales y de cizalla) junto con el software de análisis inteligente posibilita la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas dentro del área predictiva (100m-200m). Mediante un sistema de software 3D se presentan todas las discontinuidades, fallas, zonas de fractura y todos los elementos detectados con su orientación sobre el eje del túnel.

A pesar de que no es necesario acceder al frente para realizar la toma de datos y el tiempo de registro es de 1h-2h, se requiere un proceso de perforación tanto para las cargas como para los geófonos y un tiempo de procesado y análisis que alarga el periodo de tiempo existente desde la toma de datos hasta la entrega de los resultados.

### **2.2.2.- Tunnel Reflection Tomography (TRT)**

A mediados de los 90 el Departamento de Minas de los Estados Unidos desarrolló un prototipo para monitorizar los esfuerzos existentes en las paredes de minas de carbón. Este sistema constituyó la base sobre la que las empresas 3D Tomographics y NSA Geotechnical Services han desarrollado el sistema TRT para aplicaciones tanto en minería como en ingeniería civil. Un elemento fundamental en ésta metodología es el software RockVision, que se basa en la teoría de la tomografía sísmica para investigar bloques tridimensionales de terreno a partir de complejos algoritmos de inversión. Así,

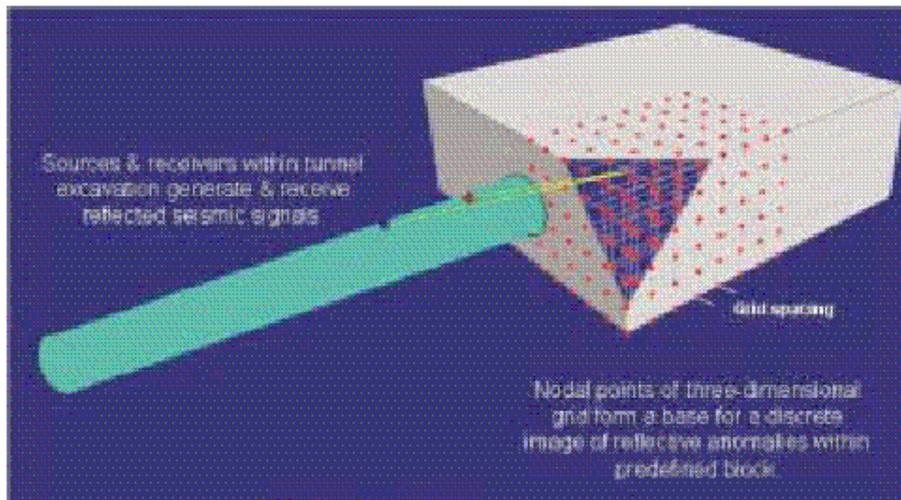
es posible reconstruir figuras tridimensionales en función de varios parámetros, como velocidad sísmica, reflectividad relativa o atenuación sísmica.

Como en cualquier método geofísico, contar con datos provenientes de otro tipo de técnicas mejorará la interpretación final de los datos obtenidos, pudiendo ofrecer datos de tipos de roca, grado de fracturación y alteración.

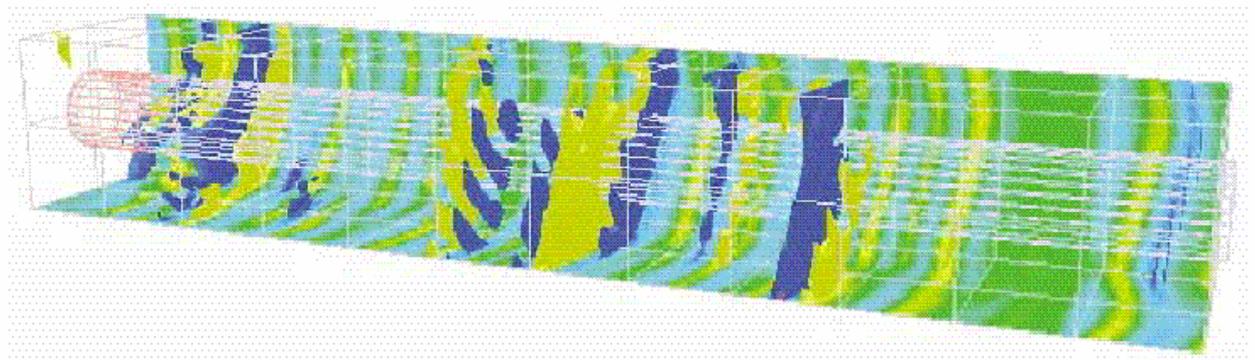
El sistema TRT permite reconocer la totalidad del frente de excavación hasta una profundidad de 50m a 150m, dependiendo de las condiciones del terreno. Utiliza las reflexiones sísmicas generadas por una fuente determinada al ser reflejadas en las distintas discontinuidades del terreno existente en el frente de excavación, siendo recogidas por los receptores situados en la clave del túnel. Habitualmente la fuente utilizada es el tradicional martillo o pequeñas cargas explosivas. El uso de explosivos proporciona una gran fuente de energía, ampliando así el rango de investigación, pero, como contrapartida, es una fuente que genera señales de baja frecuencia, empobreciendo la resolución de la sección obtenida. Además, el uso de explosivos requiere la perforación previa de los puntos en los que se situarán las cargas hasta una profundidad que asegure el buen contacto entre éstos y la roca, y se elimine ó minimice el daño sobre el equipo de perforación. El uso del martillo tiene una gran ventaja en cuanto a la logística, daños que puede generar y permisos necesarios; además, genera un tren de ondas con mayor contenido frecuencial que los explosivos. Por el contrario, es difícil asegurarse de que la energía del golpe del martillo se transmite de forma eficiente al macizo rocoso.

Por ello, se ha desarrollado una nueva fuente denominada “magnetostrictive”, que genera gran energía a la vez que señales de alta frecuencia que permiten obtener imágenes de mayor resolución. La fuente permite inducir, mediante un amplificador, frecuencias de entre 300Hz y 3000Hz, y su contenido puede variarse en función de las condiciones particulares del medio. Esta fuente es ligera y manejable, y se puede situar bien contra la roca misma, sobre el gunitado o en perforaciones realizadas en las dovelas hasta llegar a la roca natural. Los sensores o acelerómetros sobre la clave del túnel de la misma forma que la fuente, dependiendo del tipo de excavación por el que se haya optado. En la **Figura 3** se muestra un detalle de éste dispositivo.

El proceso de toma de datos requiere unos 20 minutos de parada, por lo que se puede realizar en cualquier momento de mantenimiento de la TBM o montaje de un anillo. El procesado de los datos registrados requiere entre 10 y 18 horas, tras las cuales, es posible generar la imagen tomográfica que contiene toda la información referente a los planos de discontinuidad detectados (diques, fallas, fracturas, contactos litológicos,...) Mediante el TRT se identifican la orientación y posición de todas las estructuras en el frente pero no es posible conocer su naturaleza. En la **Figura 4** se muestra una imagen del tomograma obtenido tras el procesado, mostrando los accidentes detectados.



**Figura 3.- Detalle del dispositivo TRT.**



**Figura 4.- Interpretación con el sistema TRT.**

El uso de distintos puntos de tiro y posición de acelerómetros genera una densa red de pares fuente-receptor. Posteriormente se píxela el bloque de terreno en estudio y se calcula la “reflectancia relativa” para cada píxel de terreno a partir del análisis de cambios relativos en la impedancia acústica. Se genera una escala de valores para la reflectancia y se genera el tomograma que aparece en la figura anterior.

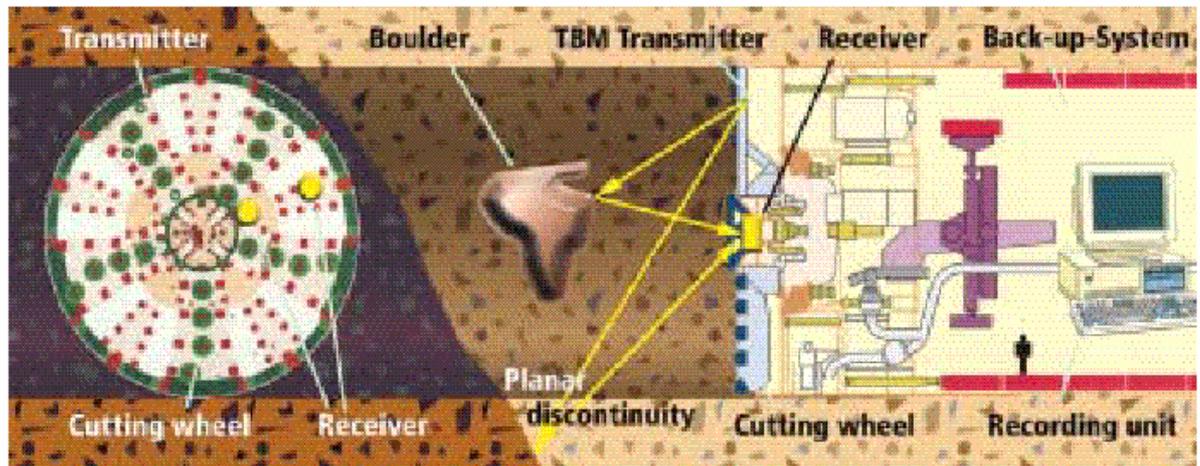
Así, los planos de falla generan anomalías de alta reflectancia, generan por si mismos más energía reflejada que el macizo rocoso circundante, por lo que, anomalías de éste tipo se podrían asociar a planos de falla o fisuras, que aparecerían coloradas en verde en el tomograma. Zonas con mayor absorción de energía que el entorno serían por ejemplo arcillas ó niveles saturados en agua, que aparecerían coloreados de azul en el tomograma.

Al igual que el sistema TSP, la logística necesaria para llevar a cabo la toma de datos y procesado es más compleja que en el sistema electromagnético BEAM, pero la información obtenida es de bastante calidad.

### **2.2.3.- SSP (Sonic Softground Probing or Seismic softground Probing)**

Mediante éste sistema se detectan cambios en la densidad del medio a partir de ondas acústicas generadas por micrófonos instalados en la rueda de corte, que tras reflejarse en las distintas irregularidades existentes en el macizo rocoso en el frente de excavación (hasta 40m ) son registrados por altavoces receptores instalados en la TBM. La velocidad de onda de una señal output/input depende de la densidad del medio en el que se propaga, por lo que es posible detectar variaciones de densidad debidas a fallas, cavidades, bolos, etc. Mediante un paquete informático se evalúan los datos recibidos, y analizando estadísticamente todos los parámetros medidos se obtienen datos de los cambios significativos existentes en el macizo rocoso.

El sistema se instala en la cabeza de corte y no interfiere para nada con los trabajos de excavación ni instalación de anillos, dando una información constante en el frente. En la **Figura 5** se ilustra el principio de medida de este sistema.



**Figura 5.- Principio de medida del sistema SSP.**

Este sistema se ha utilizado durante la construcción del túnel bajo el río Elba (Hamburgo).

### **3.- COMPARATIVA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS APLICABLES**

El contraste de propiedades físicas en los materiales a estudiar es fundamental para que cualquiera de los dispositivos a emplear durante el proceso constructivo genere unos resultados positivos que permitan caracterizar de forma precisa y veraz el macizo rocoso situado en el frente de excavación. Por tanto, es necesario conocer las propiedades físicas de los materiales sobre los que se realizara el proyecto para elegir de forma apropiada la técnica a emplear como método predictivo.

En el **Cuadro I** se muestra un análisis comparativo de los cuatro métodos a priori aplicables en el Túnel de Gibraltar.

En general, los métodos sísmicos requieren una logística más compleja y unos tiempos de procesado y análisis mayores, pero, estarían dentro del tiempo razonable para obtener información del frente (aproximadamente 24-48 h); la calidad de los datos obtenidos es bastante buena y únicamente es necesaria la existencia de variaciones en la impedancia acústica originando buenos tomogramas interpretativos. El rango de investigación para éstos sistemas se sitúan entre 100 y 200 m desde el frente de excavación. Los métodos electromagnéticos y acústicos son más sencillos de instalar y proporcionan información del frente de forma constante, hasta una profundidad de unos 30-40 m desde el frente. La información que se obtiene es más sencilla pero puede resultar satisfactoria si los contrastes en las propiedades físicas de los materiales estudiados son importantes.

<b>Método</b>	<b>Principio</b>	<b>Penetración</b>	<b>Interferencia en avance</b>	<b>Interpretación</b>	<b>Aplicabilidad en Gibraltar</b>
BEM	Electromagnético	2,5 – 4 $\phi$	Nulo	Media	Elevada
TSP-203	Sísmico	10 – 20 $\phi$	Elevada	Complicada	Baja
TRT	Sísmico	5 – 15 $\phi$	Media	Complicada	elevada
SSP	Acústico	30 $\phi$	Nulo	Complicada	Media

**Tabla I.- Comparativa entre los cuatro métodos analizados.**

#### **4.- CONCLUSIONES**

Con el conocimiento actual de los parámetros petrofísicos del terreno es prematuro anticipar cuál es el sistema que ofrece mayores garantías de funcionamiento en las condiciones en las que trabajará una TBM en la excavación del Túnel del estrecho de Gibraltar.

Para ello es necesario conocer con mayor detalle los parámetros eléctricos y acústicos de las formaciones geológicas involucradas.

A falta de pruebas específicas se podría recurrir a ensayos específicos de laboratorio o incluso, aún mejor, al análisis de la respuesta del terreno a la testificación geofísica en especial a las sondas sónicas de onda completa y de resistividad – potencial espontáneo.