



INGENIERÍA DEL TERRENO

IngeoTer 6



Título:

GEOFÍSICA APLICADA A LA OBRA CIVIL. MÉTODO GEOELÉCTRICO Y SÍSMICA DE REFRACCIÓN. CASOS PRÁCTICOS.

Autor:

Manuel Arlandi Rodríguez

Publicación:

Ingeniería del Terreno. IGETER Nº6. CAPITULO 2. Madrid 2005. Entorno Gráfico.

Contenido:

Descripción del método geoelectrico y sísmico de refracción para su empleo en obra civil. Se presentan diversos casos prácticos de aplicación e interpretación de esta técnica geofísica.

1. INTRODUCCIÓN	3
2. PROBLEMAS GEOTÉCNICOS.....	3
2.1 EL MEDIO GEOTÉCNICO	3
2.2 ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL DE TERRENO ALTERADO	4
2.3 EXCAVABILIDAD-RIPABILIDAD	5
2.4 DETECCIÓN DE FALLAS	7
2.5 DETECCIÓN DE CAVIDADES	8
2.6 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO	11
2.6.1 PARÁMETROS DINÁMICOS DEL TERRENO.....	11
2.6.2 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL TERRENO	12
2.6.3 OTROS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.....	13
2.7 EMBOQUILLES DE TÚNELES.....	15
2.8 HIDROGEOLOGÍA y MEDIOAMBIENTE	16
2.9 ARQUEOLOGÍA.....	17
3. MÉTODO GEOELÉCTRICO.....	18
3.1 FUNDAMENTO DEL MÉTODO	18
3.2 DISPOSITIVOS GEOELÉCTRICOS	22
3.3 MODELIZACIÓN GEOELÉCTRICA DEL SUBSUELO	24
3.4 PSEUDOPERFILES	25
3.5 METODOLOGÍA PARA EL RECONOCIMIENTO DE CAMPO	27
3.5.1 RECONOCIMIENTOS EN MODELOS 1-D	27
3.5.2 RECONOCIMIENTOS EN MODELOS 2-D	28
3.5.3 RECONOCIMIENTOS EN MODELOS 3-D	28
3.6 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.....	29

3.7	PROFUNDIDAD MEDIA DE INVESTIGACIÓN	30
4.	MÉTODO SÍSMICO DE REFRACCIÓN	34
4.1	FUNDAMENTO DEL MÉTODO	34
4.2	METODOLOGÍA OPERATIVA	40
4.3	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN Y RESOLUCIÓN.....	41
5.	CASOS PRÁCTICOS	42
5.1	DETECCIÓN DE FALLAS	42
5.1.1	TÚNEL DE LA CABRERA.....	42
5.1.2	TÚNEL DE LOS PONTONES	44
5.1.3	TÚNEL DE BREGUA	47
5.2	DETECCIÓN DE CAVIDADES	50
5.2.1	CUEVA DE LEZETXIKI	50
5.2.2	TÚNEL DE ARRAIZ.....	51
5.3	EMBOQUILLES DE TÚNELES.....	53
5.4	ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS.....	54
5.5	YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS.....	56
5.5.1	CASTRO DE LLAGU.....	56
5.5.2	MINADOS ROMANOS DE LAPIS SPECULARIS	65
6.	BIBLIOGRAFÍA	67
	BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA SOBRE APLICACIONES GEOTÉCNICAS	67
	BIBLIOGRAFÍA GENERAL	67

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se va a abordar la geofísica aplicada a los problemas geotécnicos de las obras civiles. El enfoque que se va a dar difiere al que tradicionalmente se incluye en los manuales al uso, que hacen hincapié fundamentalmente en sus fundamentos teóricos. Se va a considerar el tema no desde el lado del especialista en geofísica, si no desde el del usuario de la misma, del geólogo o ingeniero que se plantea la necesidad de resolver problemas geológicos y geotécnicos mediante las técnicas geofísicas. Los “usuarios” de la geofísica necesitan conocer qué métodos son los más apropiados para resolver los problemas a los que se enfrentan, así como su profundidad de investigación y resolución.

De acuerdo a este enfoque, se van a exponer los aspectos fundamentales de los métodos más habituales en los trabajos de geología y geotecnia: los métodos geoelectricos, especialmente la **tomografía eléctrica**, y la **sísmica de refracción**. Ambos constituyen casi el 90 % de los trabajos geofísicos que se desarrollan en el ámbito de los estudios geotécnicos para la redacción de proyectos de obras lineales (carreteras y ferrocarriles).

2. PROBLEMAS GEOTÉCNICOS

2.1 EL MEDIO GEOTÉCNICO

La mayor proporción de las obras de construcción tiene lugar en los primeros cien metros del subsuelo. Esta zona del terreno, se caracteriza por presentar un alto nivel de heterogeneidad, tanto en dirección vertical, como lateralmente. De acuerdo a Mari et al. (1999), en este ámbito geológico somero, los técnicos geofísicos que investigan los problemas geotécnicos, desarrollan su labor sabiendo que:

- La topografía tiene un impacto muy significativo.
- Se producen una serie de perturbaciones no despreciables, tales como el viento, el ruido y vibraciones del tráfico, y las corrientes inducidas por las líneas de transporte de electricidad.

- Los contrastes de las propiedades físicas son frecuentemente menores. Las variaciones laterales de estas propiedades son mayores que las variaciones verticales.
- Las formaciones geológicas no tienen un espesor constante.
- Las interfases o contactos geológicos no son siempre netos, y raramente son verticales.

Sin embargo, a pesar de estas dificultades, el geotécnico de obras civiles tiene la gran ventaja de poder contrastar los registros geofísicos con sondeos. A las profundidades someras a las que se desarrollan estos trabajos, las perforaciones con extracción de testigo son rápidas de realizar, y de bajo coste relativo, por lo que pueden realizarse un gran número de ellos.

En los apartados que se incluyen a continuación, se realiza una revisión de los problemas geotécnicos que pueden investigarse mediante los métodos geoelectricos y la sísmica de refracción.

2.2 ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL DE TERRENO ALTERADO

El problema de estimar el espesor de la capa superficial de terreno alterado, o lo que es igual, la determinación de la profundidad a la que se ubica el terreno sano, es uno de los problemas más comunes en la práctica geotécnica. Su determinación es muy importante en los siguientes casos:

- Los deslizamientos de laderas suelen producirse a favor del contacto entre la roca sana y la roca alterada o depósitos sueltos que se asientan sobre ella (coluviales, eluviales, etc.). Por ello es fundamental determinar la posición de este contacto, ya que se trata de un dato imprescindible para abordar estudios de estabilidad y riesgos geológicos.
- En los estudios de cimentaciones, la determinación de la profundidad a la que se encuentra el terreno sano es de gran importancia para definir el tipo de cimentación a emplear. Cuando el terreno sano se sitúa a poca profundidad, la cimentación podrá ser de tipo superficial (zapatas, etc.). Cuando se encuentre más profundo, la

cimentación será pilotada, en cuyo caso el conocimiento de la profundidad a la que se ubica el terreno sano servirá para determinar la profundidad del pilotaje.

- El terreno superficial alterado puede ser excavado empleando medios mecánicos (bull-dozer, retroexcavadora, etc.). Por ello, la determinación de su espesor indicará si las excavaciones a realizar en las obras podrán abordarse con dicho método o mediante explosivos. De este problema expondremos más detalles en apartados sucesivos.

Para la detección del contacto entre el terreno sano y el alterado, se recurre habitualmente al Método Sísmico de Refracción, cuyos aspectos fundamentales abordaremos en sucesivos apartados.

2.3 EXCAVABILIDAD-RIPABILIDAD

Bajo el término de ripabilidad nos referimos a un criterio cualitativo que mide la aptitud de un macizo rocoso para ser quebrantado por medio de un ripper arrastrado por un bull-dozer. Lógicamente, la eficacia del ripado dependerá de la naturaleza de la roca sana y de la distribución de sus discontinuidades.

Son varios los criterios que se han venido utilizando para juzgar a priori la ripabilidad de un terreno. El más extendido consiste en determinar la velocidad sísmica de propagación de las ondas de compresión (Ondas P) a través del macizo rocoso, mediante una prospección geofísica de sísmica de refracción.

La compañía Caterpillar regularmente publica tablas de ripabilidad para sus distintos modelos de tractores. Las posibilidades de ripado se definen, para diversos tipos de rocas, por medio de su velocidad sísmica V_p . Para cada roca se definen los márgenes de velocidad sísmica para los que la roca es ripable o no ripable. De acuerdo al fabricante de bulldozers Caterpillar, para un modelo D-9, la facilidad de ripado se determinaría de acuerdo al siguiente criterio, en función de V_p , velocidad de las ondas sísmicas primarias:

▪ $V_p < 600$ m/s	Materiales sueltos
▪ $V_p = 600-1300$ m/s	Ripado fácil
▪ $V_p = 1300-1700$ m/s	Ripado normal
▪ $V_p = 1700-1850$ m/s	Ripado duro
▪ $V_p > 1850$ m/s	No son ripables (voladura)

Lógicamente, los datos de ripabilidad suministrados por las compañías fabricantes de maquinaria sobrevaloran las posibilidades de sus productos. Es habitual encontrar tablas de ripabilidad donde se recomienda ripar macizos rocosos con velocidades sísmicas mayores de 2500 m/s. Parece lógico, por tanto, reducir los límites superiores. En este sentido, es muy aconsejable seguir el criterio del Colegio de Geólogos de Gran Bretaña, que marca 1850 m/s como límite de ripabilidad.

Para estudiar la ripabilidad del terreno, se suelen representar los datos proporcionados por la sísmica de refracción en forma de cortes del terreno, en los que se indican las velocidades sísmicas de las capas de terreno más superficial.

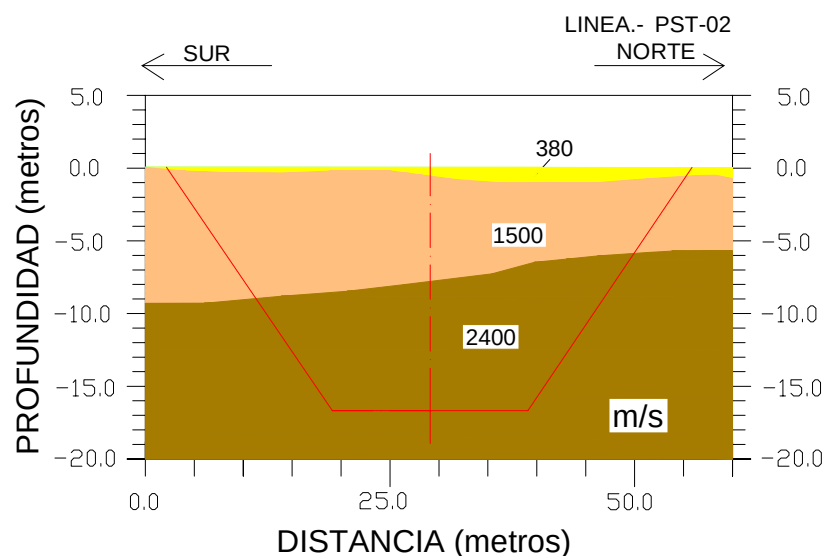


FIGURA 1: Representación de velocidades sísmicas en corte transversal para estudiar la ripabilidad del terreno (GEOCONSULT)

2.4 DETECCIÓN DE FALLAS

La cobertura vegetal con frecuencia oculta las fallas, impidiendo su localización con geología de superficie. Los sondeos realizados para la investigación de trazados de obras lineales, aun siendo una herramienta muy eficaz para la detección de fallas, se encuentran generalmente espaciados con una frecuencia media de aproximadamente 1 sondeo cada 100 - 500 m de trazado, dejando zonas muy amplias sin investigar entre sondeos consecutivos.



FIGURA 2: Falla enmascarada por la cobertura vegetal (GEOCONSULT)

Por ello, en la detección de fallas suelen emplearse perfiles geofísicos, especialmente los basados en métodos geoelectricos. El problema físico consistiría en detectar un cuerpo de morfología tabular y disposición subvertical, de carácter más conductor (menos resistividad eléctrica) que el medio rocoso donde se encaja. La efectividad de las medidas de resistividad dependerá en todo caso de que exista suficiente contraste entre los valores característicos de la formación rocosa y de la supuesta zona de fractura, así como que la zona de influencia de la misma tenga suficientes dimensiones.

La resistividad del terreno depende, en términos simplificados, de dos factores principales: contenido en humedad y contenido arcilloso. Asumiendo que exista cierta homogeneidad en la naturaleza litológica de la caja de falla, el mayor contenido en arcilla y agua de ésta hará que su resistividad eléctrica sea más baja que la de la roca encajante, permitiendo así su fácil detección.

Para ello se realizan medidas de resistividad del subsuelo mediante técnicas de medición geoelectrica en corriente continua. Estos métodos operan con un dispositivo de medida que requiere electrodos que han de clavarse en el terreno, a través de los cuales se inyecta y recibe una corriente eléctrica continua en el subsuelo. De acuerdo a esta técnica, para la investigación de fallas suelen emplearse los perfiles de **Tomografía Eléctrica**, cuyas principales características abordaremos en sucesivos apartados.

2.5 DETECCIÓN DE CAVIDADES

La detección de cavidades es de gran importancia en el trazado de obras lineales. La presencia de estos huecos generalmente está asociada al fenómeno cárstico. Se trata de un proceso de disolución en rocas solubles. El mayor desarrollo del carst se produce en las rocas carbonatadas y dentro de estas son las calizas las que mejor se prestan a estos procesos de disolución, estas rocas presentan una baja solubilidad relativa por lo que el proceso de carstificación es lento, pero tienen una gran resistencia, y por ello las simas y cuevas pueden alcanzar grandes dimensiones, tanto en extensión como en profundidad. La intensidad de esta disolución depende de muchos factores entre ellas la climatología y la hidrología, así como de la sedimentología (planos de estratificación, discordancias, contactos...) y la tectónica (diaclasas, fallas). También son susceptibles de sufrir fenómenos cársticos las rocas o sedimentos yesíferos, aunque generalmente desarrollen cavidades de menor tamaño.

Otro tipo de cavidades que puede plantear problemas geotécnicos son los minados antiguos, que también pueden afectar a las obras lineales, aunque con menor frecuencia que en el caso de las cavidades naturales de origen cárstico.

Para detectar cavidades, lo más adecuado es aplicar metodologías basadas en la geofísica, que prospectan amplias zonas y volúmenes de roca. Los sondeos mecánicos sólo investigan un punto, por lo que su uso debe aplicarse tan solo para verificar cavidades previamente detectadas mediante geofísica.

En función de la profundidad a la que se encuentren las cavidades, pueden emplearse distintos métodos geofísicos. Algunos métodos sólo son capaces detectar cavidades a poca profundidad (máximo 20 m), mientras que otros son capaces de penetrar a grandes profundidades (hasta 250 m). En la tabla que se incluye a continuación se resumen estos métodos.

DETECCIÓN GEOFÍSICA DEL KARST		
MÉTODO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
GEORRADAR	Emisión de ondas de radar contra el terreno, mediante antenas. Detecta muy bien los huecos vacíos.	Sólo funciona bien a profundidades someras. Alta resolución. Genera planos en planta o perfiles
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	Inyección de corriente continua en el terreno mediante electrodos. Se mide la resistencia eléctrica del terreno, pudiendo detectar cuevas vacías (alta resistencia) o llenas de agua o arcillas (baja resistencia).	Funciona adecuadamente tanto a poca como a gran profundidad. Genera perfiles longitudinales y es capaz de distinguir el tipo de relleno de la cueva
MICROGRAVIMETRÍA	Medición del campo gravitatorio local. En las zonas con cuevas la gravedad es menor.	Funciona bien tanto en zonas profundas como someras, pero la topografía de la zona debe ser suave. Sólo detecta cuevas vacías.
POTENCIAL ESPONTÁNEO	Medición del potencial eléctrico del terreno. La circulación de agua subterránea genera potenciales eléctricos detectables	Funciona tanto para grandes profundidades como someras, pero sólo detecta el carst que está absorbiendo agua.
RESONANCIA ACÚSTICA	Se introducen altavoces dentro de la cueva y se detecta en superficie el sonido con la ayuda de geófonos.	Funciona a profundidades someras. Requiere que la cueva tenga acceso para introducir los altavoces. Alta resolución. Proporciona planos en planta.
DIAGRAFÍA CROSS-HOLE	Se emiten ondas sísmicas en un sondeo, y son recogidas en otro cercano. Si aparece una cueva se detecta una disminución de la velocidad sísmica medida.	Funciona muy bien a cualquier profundidad, pero requiere que los sondeos estén muy próximos el uno al otro. Alta resolución. Proporciona perfiles verticales.

Cuando se investiga geotécnicamente estructuras o explanadas, el carst que debe investigarse es el poco profundo. Debe definirse perfectamente su ubicación en planta y perfil, por lo que es necesario aplicar métodos de gran resolución. Tal como puede deducirse de la anterior tabla, para estos casos lo más adecuado es el Georradar, la Tomografía Eléctrica, la Microgravedad y la Resonancia Acústica.

Sin embargo, para la investigación de túneles, es necesario aplicar métodos que detecten cuevas en profundidad. Además, al ser el túnel una obra de tipo lineal, será más interesante y práctico aplicar métodos que generen perfiles longitudinales a lo largo de los túneles. De acuerdo a estas ideas, el método más adecuado es el de la Tomografía Eléctrica.

De acuerdo a las ideas expuestas, puede afirmarse que la **Tomografía Eléctrica es el método más versátil para la detección de cavidades**, ya que puede investigar tanto zonas profundas en túneles, como zonas someras en estructuras, desmontes o terraplenes, proporcionando tanta resolución como sea necesario.

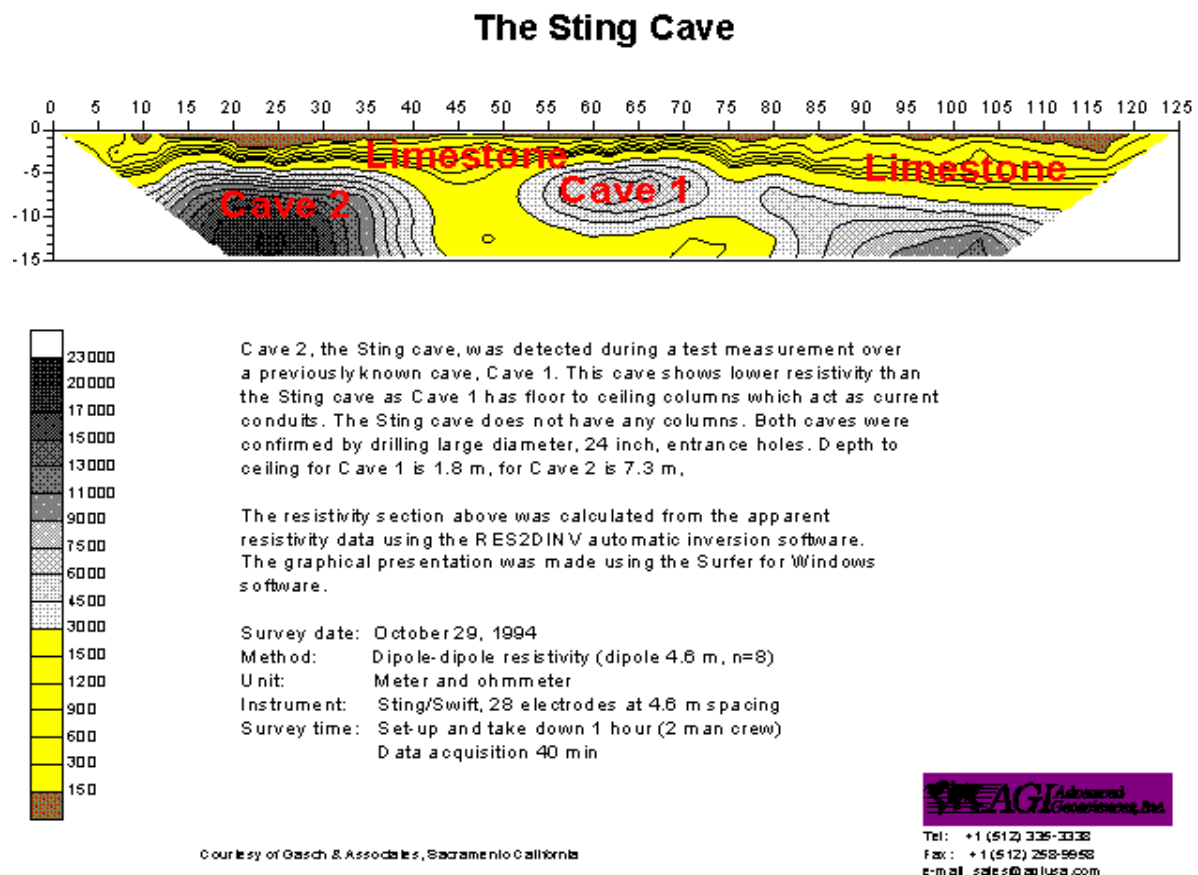


FIGURA 3: Técnica de detección de cavidades mediante tomografía eléctrica

Este método consiste en inducir corriente continua en el terreno para determinar la resistividad eléctrica de los materiales interceptados al paso de dicha corriente y así poder establecer diferencias litológicas y estructurales. De acuerdo a esta técnica incluso puede averiguarse si presentan relleno, y de que tipo es el mismo:

- Cuando la cueva está vacía, la Tomografía Eléctrica señala una resistencia eléctrica muy alta, debido a que el aire que rellena la cavidad es dieléctrico. En este caso la Tomografía Eléctrica mostrará una anomalía de fuerte gradiente y alto valor de resistencia.
- Cuando la cueva está llena de arcilla (relleno blando) o agua, la resistencia eléctrica es menor, ya que tanto el agua como la arcilla, son buenos conductores de la corriente eléctrica. En esta situación, la Tomografía Eléctrica mostrará una anomalía de fuerte gradiente y bajo valor de resistencia.

2.6 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO

2.6.1 PARÁMETROS DINÁMICOS DEL TERRENO

Las técnicas sísmicas, permiten obtener la velocidad de propagación de las ondas sísmicas P (primarias) y de las ondas secundarias S (secundarias). Con estos valores de velocidad de propagación de las ondas P y S (V_p y V_s) a través del terreno, es posible calcular el Coeficiente de Poisson Dinámico, el Módulo de Elasticidad Dinámico E_{din} , el Módulo de Corte Dinámico G_{din} , y el Módulo Volumétrico Dinámico K_{din} de los macizos rocosos. A partir de estos parámetros resulta sencillo:

- Reconocer los contactos entre las distintas unidades litológicas
- Evaluar las características geotécnicas de cada unidad geológica e identificar zonas de falla
- Realizar cálculos de comportamiento sísmico de túneles y estructuras.

Para obtener los parámetros citados, a partir de las velocidades V_P y V_S , se emplean las siguientes expresiones, derivadas de la teoría de la elasticidad:

- Coeficiente de Poisson: $\nu = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}$
- Módulo de Corte: $G_{din} = \gamma \cdot V_S^2$ (γ : densidad del terreno)
- Módulo de Young: $E_{din} = 2 \cdot G_{din} (1 + \nu)$
- Módulo volumétrico: $K_{din} = \frac{E_{din}}{3(1 - 2\nu)}$

Los valores de módulo presentados, son valores dinámicos, diferentes a los estáticos obtenidos mediante ensayos de laboratorio o dilatométricos. Los valores dinámicos, suelen ser de 10 a 15 veces superiores a los estáticos. Los valores de densidad de la roca se han obtenido a partir de los ensayos de laboratorio sobre muestras de testigo de sondeos.

2.6.2 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL TERRENO

En un estudio geotécnico para la investigación de túneles es fundamental obtener las clasificaciones geomecánicas del terreno para, posteriormente, aplicarlas a la obtención del módulo de deformación y la resistencia a compresión del macizo. En este sentido, se emplea con gran frecuencia el Índice Q de Barton.

Las Clasificaciones Geomecánicas son algoritmos aritméticos que permiten asignar a cada tipo de terreno un número que expresa su calidad geotécnica. Las clasificación geomecánica de los distintos materiales resultan muy útiles en los proyectos de obras subterráneas, fundamentalmente para valorar y seleccionar los sostenimientos más adecuados.

El índice Q o índice de Barton, fue desarrollado en Noruega (1974) por Barton, Lien y Lunde, del NGI (Instituto Geotécnico Noruego). Su desarrollo se basó en el análisis de cientos de túneles construidos principalmente en Escandinavia.

La clasificación geomecánica de Barton asigna a cada terreno un valor numérico, tanto mayor cuanto mejor es la calidad geotécnica de la roca. Su variación oscila entre 0.001 para terrenos muy malos y 1000 para terrenos muy buenos.

El valor de Q se puede obtener a través de la siguiente expresión exponencial, debida a Barton (1991), a partir del valor de la velocidad de las ondas P:

$$Q = 10^{[(V_p - 3500) / 1000]}$$

donde:

Q = Índice Q de Barton.

V_p = Velocidad de las Ondas P, en m/s

Para granitos y neises de buena calidad, puede aplicarse una expresión que presenta mejor factor de correlación, debida también a Barton (1991):

$$Q = (V_p - 3600) / 50$$

donde V_p se introduce en m/s.

2.6.3 OTROS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Además de los ya comentados, las velocidades de propagación sísmica permiten obtener otros parámetros geotécnicos.

La relación entre la velocidad de las Ondas P y la densidad de los terrenos que atraviesa, ha sido investigada por numerosos autores. Según Gardner (1974), para rocas sedimentarias se verifica la siguiente relación empírica:

$$\rho = a V_p^{0,25}$$

donde:

a = constante igual a 1670

ρ = densidad de la roca en (kg/m³)

V_p = velocidad de propagación de las ondas P, en (km/s)

De acuerdo a Wyllie (1958), la porosidad de una arenisca puede estimarse a partir de la siguiente relación:

$$(1 / V_{p \text{ sat}}) = (\phi / V_{p \text{ flu}}) + [(1 - \phi)] / V_p$$

donde:

ϕ = porosidad de la arenisca

$V_{p \text{ sat}}$ = velocidad de las ondas P en las areniscas saturadas

$V_{p \text{ flu}}$ = velocidad de las ondas P en el fluido que llena los poros (agua)

V_p = velocidad de las ondas P en la matriz areniscosa

La velocidad de las ondas P, permite determinar con bastante precisión el grado de fracturación de la roca. De acuerdo con Helfrich (1971), existe una relación entre la velocidad de las ondas P y el índice de fracturación RQD (Rock Quality Designation), válida para rocas ígneas:

Nivel de fracturación	V_p (m/s)	RQD
Roca sin fracturas	> 4.500	> 95 %
Roca con pocas fracturas	4.000 – 4.500	95 – 75 %
Roca fracturada en grado medio	3.500 – 4.000	75 – 50 %
Roca con numerosas fracturas	3.000 – 3.500	50 – 25 %
Roca fuertemente fracturada	< 3.000	< 25 %

No obstante, para el RQD existe una expresión más general, debida a Merkler (1970):

$$RQD = 100 (V_p / V_{p \text{ laboratorio}})^2$$

donde:

V_p = velocidad de las ondas P medidas mediante geofísica en campo

$V_{p \text{ laboratorio}}$ = velocidad de las ondas P medidas mediante ensayos de laboratorio en testigos de sondeo.

2.7 EMBOQUILLES DE TÚNELES

Los primeros metros de los túneles presentan unos condicionantes especiales que complican su ejecución. Al ser zonas más cercanas a la superficie, la roca está más fracturada y meteorizada, lo que generalmente obliga a emplear en estos tramos un sostenimiento más potente, pues cualquier tipo de inestabilidad puede alcanzar la superficie del terreno, y es en esta zona donde se pueden enlazar las inestabilidades del túnel con las del talud frontal, al tener la cobertera escaso espesor.

En los emboquilles demasiado someros no se suele desarrollar bien el “efecto bóveda” en los materiales que quedan por encima de la clave del túnel, lo que puede provocar inestabilidades. Por esta razón, hoy en día se considera que, desde un punto de vista geotécnico, ***un emboquilla óptimo es aquel en el que sobre la clave del túnel hay, al menos, un espesor de terreno sano igual al diámetro del túnel.***

Para establecer los puntos más adecuados para emboquillar el túnel, en primer lugar, se ejecutan perfiles sísmicos de refracción en las zonas de emboquilla, para estimar el espesor de terreno alterado. A continuación se estima la inclinación del talud frontal que minimiza la inestabilidad del mismo, realizando para ello cálculos en proyección estereográfica o con software especializado (Swedge, etc.). El procedimiento para ubicar los puntos de emboquilla, se esquematiza en el croquis que se muestra a continuación:

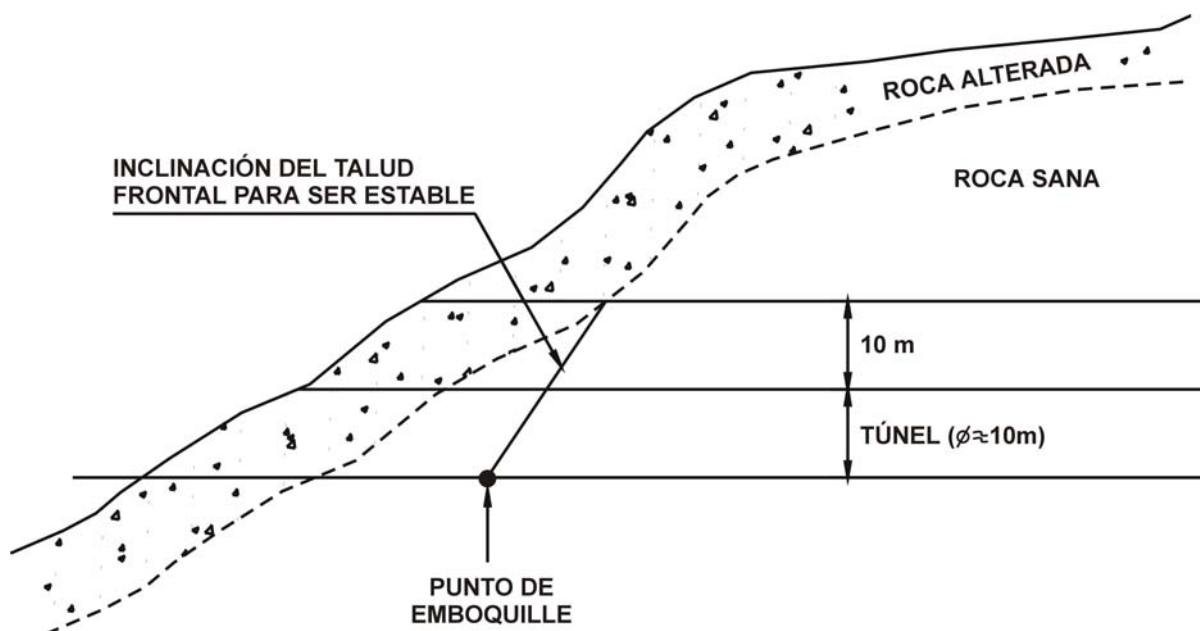


FIGURA 4: Criterio de determinación del punto de emboquille de un túnel (GEOCONSULT)

2.8 HIDROGEOLOGÍA Y MEDIOAMBIENTE

En muchas ocasiones, la construcción de obras de infraestructura afecta a los acuíferos locales. La geofísica es una herramienta valiosa para verificar el estado de los mismos, antes y después de la ejecución de las obras.

Los métodos geoeléctricos tienen una amplia gama de aplicaciones en el campo de las aguas subterráneas y ciencias medioambientales. Entre las principales utilidades de esta técnica cabe destacar:

- **Detección de aguas subterráneas y acuíferos:** el agua presente en los acuíferos de terrenos granulares (arenas, depósitos aluviales, etc.), o rocas fisuradas, muestra una resistividad mucho menor que la correspondiente al terreno seco. Esta circunstancia permite, mediante la Tomografía Eléctrica, detectar los niveles freáticos de los acuíferos.
- **Detección de intrusiones salinas en acuíferos costeros:** como consecuencia de la sobre-extracción de agua en los acuíferos costeros, puede generarse un fenómeno de intrusión salina, en la que las aguas marinas, más densas que las dulces, intruyen los

acuíferos por su zona más profunda. Este fenómeno puede provocar la disminución de la calidad del agua del acuífero. Su detección mediante métodos geoelectricos es sencilla, pues el agua marina intruida presenta una resistividad inferior al agua dulce del acuífero. De este modo, el reconocimiento geofísico mostrará una clara interfase agua dulce/salada, marcada por una reducción brusca de la resistividad en zonas profundas.

- **Determinación de zonas contaminadas en acuíferos:** la contaminación de acuíferos con sustancias químicas inorgánicas suele producir una reducción de la resistividad del agua. Por el contrario, la contaminación causada por sustancias orgánicas, incrementan la resistividad del agua del acuífero.
- **Detección de zonas saturadas de agua en terrenos sueltos susceptibles de sufrir roturas de ladera:** la tomografía eléctrica se emplea para detectar zonas saturadas de agua en depósitos de ladera (coluviones). Las zonas saturadas constituyen los puntos de máximo riesgo para la rotura de la ladera. Su detección y delimitación con ayuda de la Tomografía Eléctrica, permite adoptar medidas para limitar riesgos geológicos.

2.9 ARQUEOLOGÍA

Durante la fase de redacción de los proyectos de infraestructura, y en la fase de ejecución de las obras, es necesario realizar un estudio arqueológico, con el fin de detectar, investigar y evaluar las eventuales afecciones a los mismos. La geofísica aporta buenas soluciones técnicas en este campo.

Los restos arqueológicos de murallas, pavimentos y edificaciones, muestran valores de resistividad eléctrica superiores al terreno que les rodea. Por ello, para la detección de estos cuerpos suele emplearse el método geoelectrico, trazando perfiles a una o dos profundidades de penetración, tal como muestra el gráfico adjunto.

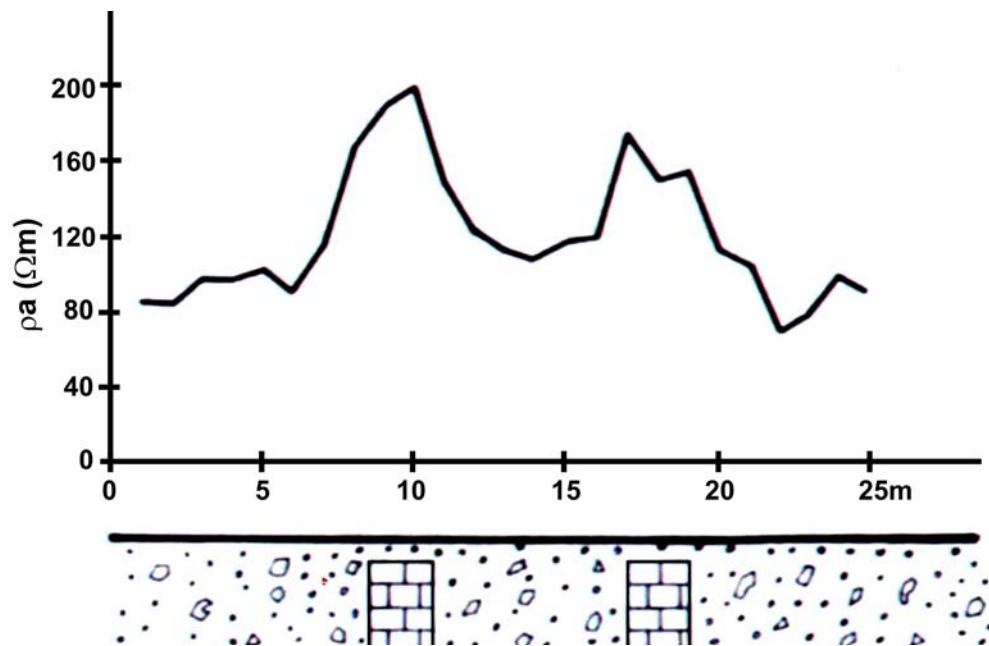


FIGURA 5: Detección de muros enterrados mediante perfiles geoelectricos (Sharma, 1997)

3. MÉTODO GEOELÉCTRICO

3.1 FUNDAMENTO DEL MÉTODO

La exploración del subsuelo a partir de las mediciones de resistividad eléctrica del mismo (Métodos Geoeléctricos), constituye una técnica bien conocida durante los últimos 50 años. Se trata de una metodología habitualmente empleada en ingeniería geológica, minería, obras públicas, arqueología y medioambiente.

A grandes rasgos, los métodos geoeléctricos consisten en introducir corriente en el terreno y medir el voltaje producido por la misma en puntos determinados de la superficie. A partir del valor de la corriente inyectada y del voltaje medido, puede obtenerse la resistividad de objetos o zonas del subsuelo. Cada tipo de material o estructura enterrada presenta un rango de resistividad característico, cuyo valor sirve de base para la interpretación de resultados.

El método geoeléctrico fue propuesto por primera vez por el ingeniero francés Schlumberger, en el año 1912. En esencia, consiste en hacer pasar por el subsuelo una corriente eléctrica y determinar el potencial que produce entre dos puntos de la superficie del terreno.

Si se hace circular una corriente eléctrica de intensidad I a través de un objeto, y la diferencia de potencial medida entre sus extremos es ΔV , la resistencia eléctrica del objeto será igual a (Ley de Ohm):

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

Por otro lado, la resistencia eléctrica R también verifica la expresión:

$$R = \frac{\rho}{K}$$

Donde K es una constante que depende de la geometría del circuito y del objeto conductor, y ρ la resistividad eléctrica de dicho objeto. Igualando ambas expresiones se obtiene:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Esta ecuación es la base fundamental del método geoeléctrico, y permite obtener de forma sencilla la resistividad eléctrica ρ del subsuelo.

Si efectuamos las mediciones pertinentes para obtener la intensidad de corriente inyectada por los electrodos A y B de la figura, y medimos los potenciales inducidos entre los electrodos M y N, aplicando la fórmula anterior, resultará una resistividad ficticia, que denominaremos resistividad aparente ρ_a , que no será igual exactamente igual a la resistividad ρ_1 verdadera de la zona del electrodo A, ni a la ρ_2 bajo los electrodos M, N y B, sino que dependerá de ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 . Esta resistividad no puede considerarse ni como promedio ni como media ponderada de las tres resistividades, pudiendo ocurrir que fuese mayor o menor que cualquiera de ellas. ***Esta resistividad ficticia ρ_a , que se obtiene aplicando a los datos obtenidos sobre un medio heterogéneo la expresión correspondiente a un medio homogéneo, se conoce como resistividad aparente.***

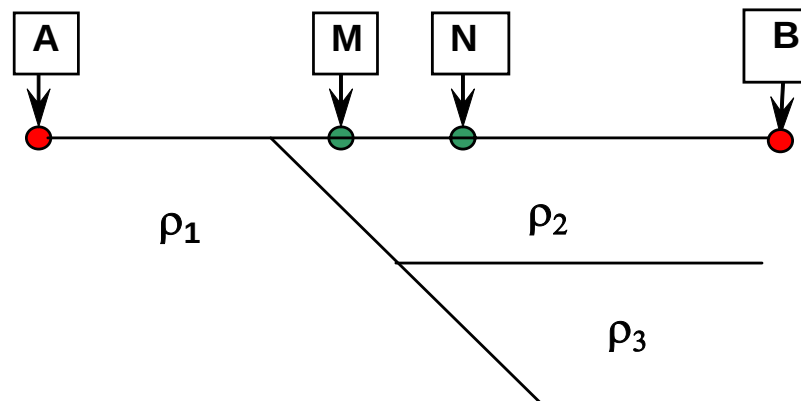


FIGURA 6: Heterogeneidades en el subsuelo. (GEOCONSULT)

La **resistividad aparente es la variable experimental básica en todos los estudios geoelectricos**. De este modo, la expresión general de la resistividad aparente de subsuelo, tendrá la forma:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

donde:

ρ_a = Resistividad aparente del subsuelo.

K= constante del dispositivo geoelectrico, que depende de la geometría del mismo.

ΔV = Voltaje medido

I = Intensidad medida.

En los estudios geoelectricos, cuando se mencione la resistividad, será importante aclarar si se trata de resistividad aparente, o de la resistividad verdadera del medio donde circula la corriente. La resistividad aparente y la resistividad verdadera sólo coinciden cuando el subsuelo es absolutamente homogéneo, sin heterogeneidades.

En el cuadro que se incluye a continuación se reflejan valores de resistividad verdadera de algunos materiales de interés geológico:

EJEMPLOS DE RESISTIVIDAD VERDADERA DE ROCAS, SUELOS Y MINERALES (Loke, 2004)			
MATERIAL	RESISTIVIDAD VERDADERA	MATERIAL	RESISTIVIDAD VERDADERA
Granito	$6 \cdot 10^3 - 10^6 \Omega.m$	Arcilla	$1 - 100 \Omega.m$
Esquisto	$30 - 10^4 \Omega.m$	Marga	$4 - 90 \Omega.m$
Mármol	$100 - 4 \cdot 10^8 \Omega.m$	Depósitos aluviales	$10 - 900 \Omega.m$
Cuarcita	$100 - 3 \cdot 10^8 \Omega.m$	Agua dulce	$10 - 100 \Omega.m$
Pizarra	$800 - 5 \cdot 10^7 \Omega.m$	Agua marina	$0.3 \Omega.m$
Caliza	$70 - 7 \cdot 10^3 \Omega.m$	Esquisto grafitico	$10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3} \Omega.m$
Arenisca	$10 - 6 \cdot 10^3 \Omega.m$	Carbón antracítico	$10^{-3} - 2 \cdot 10^5 \Omega.m$

La figura que se incluye a continuación ilustra uno de los principios básicos de las prospecciones geoeléctricas: ***a mayor longitud de dispositivo mayor penetración en el subsuelo.*** El caso (a) de la figura muestra como para pequeñas separaciones de electrodos, la corriente está virtualmente confinada a la zona (ρ_1) más superficial. En el caso (b), cuando los electrodos se abren más, alargándose así la longitud del dispositivo, la penetración en el subsuelo se incrementa, proporcionando más información sobre (ρ_2).

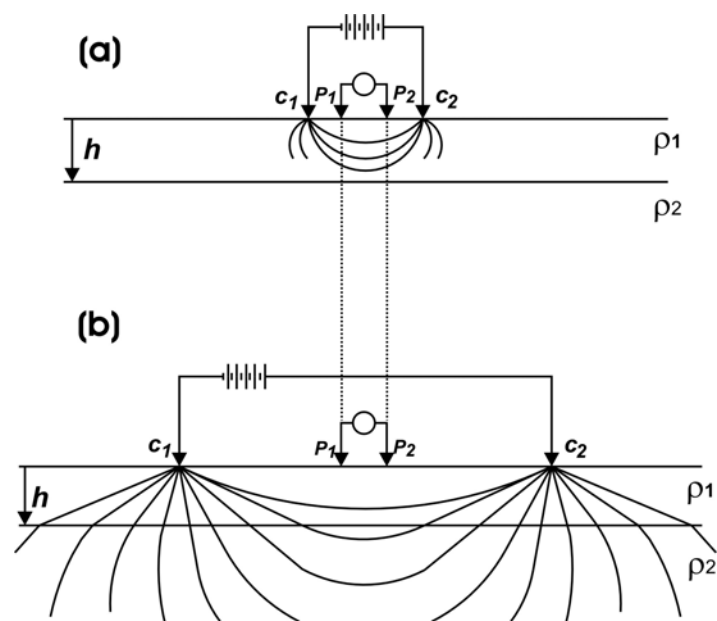
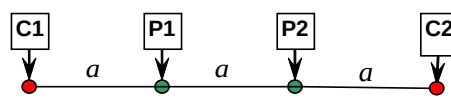


FIGURA 7: Principio de penetración de corriente en sondeos eléctricos (Sharma, 1997)

3.2 DISPOSITIVOS GEOELÉCTRICOS

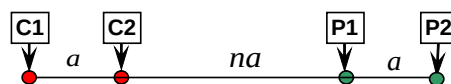
Se conoce como “Dispositivo Geoelectrico” al conjunto de electrodos que inyecta corriente en el subsuelo y registra el potencial generado en el mismo. Generalmente los dispositivos suelen disponer de cuatro electrodos, aunque también suelen emplearse los dispositivos de tres electrodos o de sólo dos. Una pareja de electrodos se denomina “de corriente”, y son los responsables de inyectar la electricidad en el subsuelo, y otros dos electrodos son “de potencial”, empleándose para medir el voltaje generado en el subsuelo por la corriente inyectada.

Los diferentes tipos de dispositivos empleados en el método geoelectrico se diferencian entre sí por la distancia relativa entre electrodos, y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial. En el gráfico que se incluye a continuación se muestran los dispositivos empleados con mayor frecuencia: Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo.



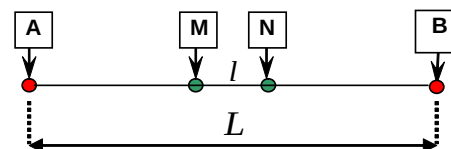
$$\rho_a = 2a\pi \frac{\Delta V}{I}$$

DISPOSITIVO WENNER



$$\rho_a = a\pi \cdot n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I}$$

DISPOSITIVO DIPOLO-DIPOLO



$$\rho_a = \pi \frac{L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I}$$

DISPOSITIVO SCHLUMBERGER

FIGURA 8: Diferentes tipos de dispositivos geoelectricos. Para denotar los electrodos, se ha empleado la notación internacional empleada con mayor frecuencia (GEOCONSULT)

Para cada uno de estos dispositivos, la ecuación que proporciona el valor de la resistividad aparente es:

DISPOSITIVO	ECUACIÓN
Wenner	$\rho_a = 2 a \pi \frac{\Delta V}{I}$
Schlumberger	$\rho_a = \pi \frac{L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I}$
Dipolo-Dipolo	$\rho_a = a \pi \cdot n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I}$

A la hora de seleccionar dispositivos geoelectricos para reconocimientos concretos, son muchos los factores que hay que tener en consideración. De acuerdo con Ward (1990), hay que considerar:

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS				
DISPOSITIVO	Intensidad de la Señal de Respuesta	Resolución	Sensibilidad frente Heterogeneidades del Terreno	Ruido de Acoplamiento Electromagnético
Wenner	A	A	C	C
Schlumberger	B	A	C	B
Dipolo-Dipolo	C	B	A	A

Nota: A corresponde a la opción más favorable, mientras que C corresponde a la peor. La letra B corresponde a un valor intermedio, en orden de preferencia.

En el estudio de túneles se suelen emplear generalmente los dispositivos dipolo-dipolo, por varias razones:

- Son los dispositivos menos sensibles al acoplamiento electromagnético, presentando además una buena resolución.
- El dispositivo dipolo-dipolo es el más sensible para detectar estructuras verticales, tales como fallas, que constituyen uno de los mayores riesgos geotécnicos en la construcción de túneles.

Para el caso de prospecciones arqueológicas, es fundamental una excelente resolución, ya que los objetos a detectar son de pequeño tamaño. Por ello, suelen emplearse fundamentalmente los dispositivos Wenner o Schlumberger.

3.3 MODELIZACIÓN GEOELÉCTRICA DEL SUBSUELO

Para el estudio del subsuelo mediante métodos geoeléctricos, se recurre habitualmente a modelizar el terreno mediante modelos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales:

- **Modelos unidimensionales 1-D:** este tipo de modelos suponen que la resistividad del subsuelo varía sólo con la profundidad (coordenada z). Equivale a un modelo bidimensional de capas horizontales. Mediante este modelo se estudian los terrenos estratificados horizontalmente, aplicando sondeos eléctricos verticales, generalmente en dispositivo Schlumberger.
- **Modelos bidimensionales 2-D:** en estos modelos la resistividad varía lateralmente (coordenada x) y en profundidad (coordenada z). Es el modelo más aplicado en la práctica geoeléctrica, por ejemplo para el estudio de túneles, cimentaciones, detección de cuevas, etc. Se suelen emplear con dispositivos tipo Dipolo-Dipolo o Wenner.
- **Modelos tridimensionales 3-D:** la resistividad varía en las tres dimensiones del espacio. Son modelos complejos, que se emplean para problemas muy específicos en los que no es suficiente una modelización 2-D.

La realización de registros geoeléctricos 1-D (SEV, etc.), conlleva la realización de 10 a 20 lecturas. A medida que se incrementa la dimensión del modelo, se incrementa el número de lecturas necesarias. De este modo, para un reconocimiento 2-D, suelen realizarse entre 100 y 1.000 lecturas, cifra que se ve incrementada a varios millares para el caso de los reconocimientos 3-D.

El perfil 2-D es, a día de hoy, la mejor solución de compromiso entre el bajo coste (pocas lecturas), y el valor y cantidad de información aportada. Los datos de resistividad aparente

proporcionados, son procesados e invertidos para obtener una tomografía eléctrica 2-D, que constituye el tipo de registro geoeléctrico más empleado hoy en día.

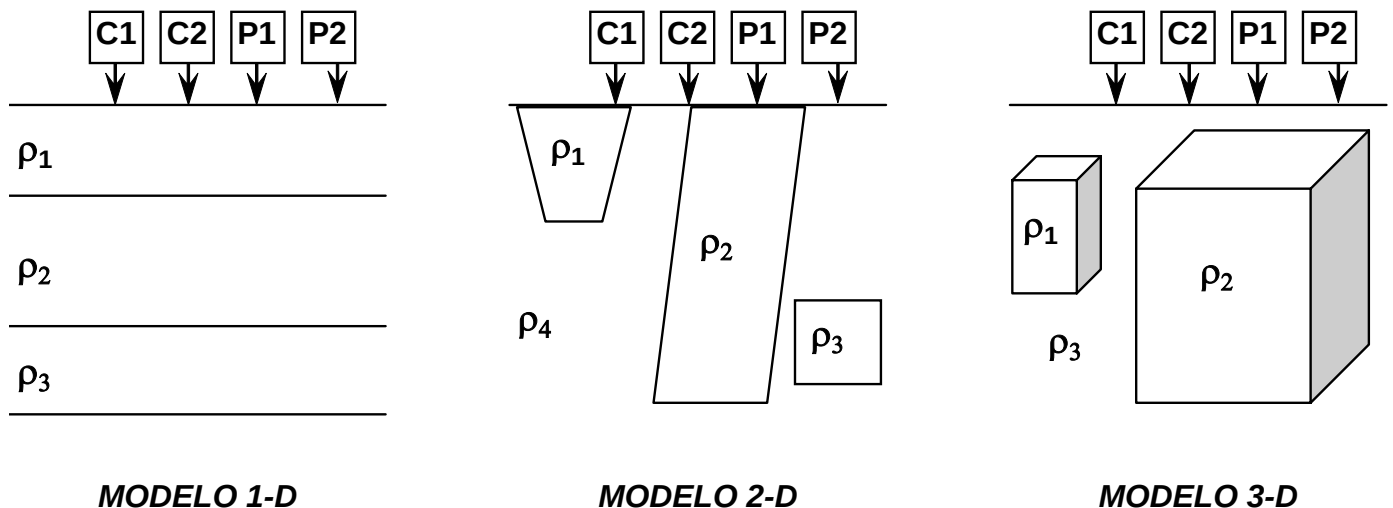


FIGURA 9: Modelos de resistividad del subsuelo (GEOCONSULT)

3.4 PSEUDOPERFILES

Cuando se desea registrar la resistividad aparente del subsuelo, a partir de datos procedentes de un dispositivo geoeléctrico, de manera que queden registradas las variaciones laterales y verticales de dicho parámetro (modelo 2-D), se suele construir gráficamente lo que se denomina una “Pseudosección”.

Tradicionalmente, las pseudosecciones se construyen tal como se ilustran en el gráfico que se incluye a continuación.

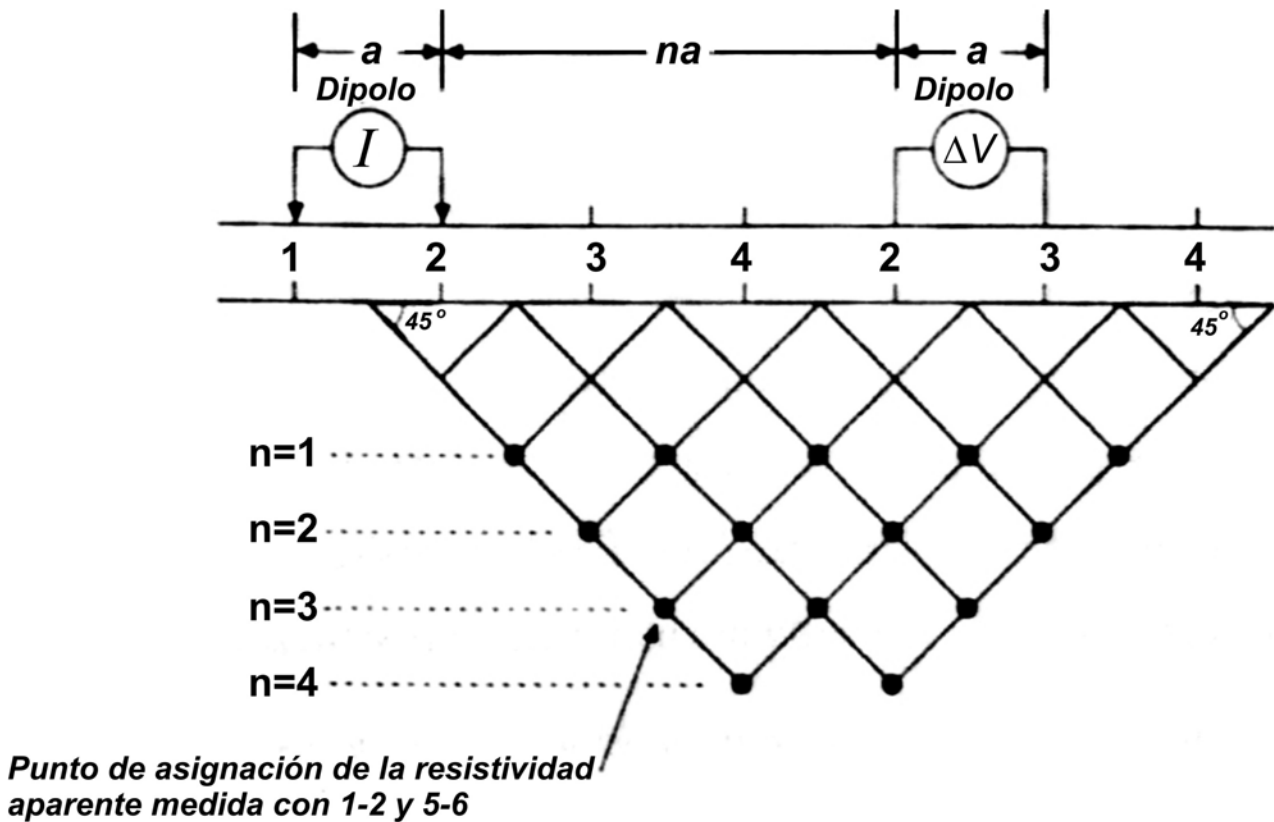


FIGURA 10: Representación de pseudoperfiles con dispositivo Dipolo-Dipolo (Sharma, 1997)

Para realizar la primera medición los electrodos de corriente se posicionan en primer lugar en las posiciones 1-2 del esquema, mientras que los de potencial ocupan las posiciones 3-4, de manera que el factor de separación de los dipolos del dispositivo será $n=1$. Se realiza la medición la intensidad I y el potencial ΔV , y se introduce en la expresión:

$$\rho_a = a\pi \cdot n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I}$$

De este modo se obtiene el valor de ρ_a correspondiente a la pareja de posiciones 1-2 y 3-4. Desde el centro de estas posiciones se trazan sendas líneas a 45° , de manera que en el punto en el que se corten, se asigna el valor de la resistividad aparente medida. A continuación se realiza la

medición para la pareja de posiciones 1-2 y 4-5, trazando el punto correspondiente. Cuando se registre el valor de la pareja de posiciones 1-2 y 6-7, se pasará a medir la pareja 2-3 (corriente) y a la 4-5 (potencial). Siguiendo este proceso se traza una pseudosección de resistividad de todo el subsuelo, cuya representación tiene generalmente la forma de un trapecio.

Es muy importante enfatizar que ***este procedimiento de trazado de pseudosecciones es tan sólo una convención gráfica, y en ningún caso implica que la profundidad de investigación del dispositivo sea la dada por la intersección de las dos líneas a 45°.***

Otro método para el trazado de pseudosecciones es el que tiene en consideración la “Profundidad Media de Investigación”, definida por Edwards (1977), que se definirá en posteriores apartados. La asignación de profundidad, se basa en el cálculo de los valores de sensibilidad definidos según la Función de Sensibilidad de Frechet. Este método de asignación de profundidades, se emplea en gran parte del software comercial más aplicado en la actualidad.

Las pseudosecciones dan una imagen muy aproximada de la distribución de resistividades en el subsuelo. Sin embargo, la imagen que proporcionan está distorsionada. ***Uno de los errores que de modo más común se cometen en la interpretación, es considerar la pseudosección como una imagen real del subsuelo.***

3.5 METODOLOGÍA PARA EL RECONOCIMIENTO DE CAMPO

3.5.1 RECONOCIMIENTOS EN MODELOS 1-D

Los reconocimientos 1-D en la práctica geoelectrica reciben el nombre de “Sondeos Eléctricos Verticales” (SEV), cuando se investiga el terreno en dirección vertical, o “Calicatas Eléctricas”, cuando se alinean sucesivos SEV cortos para generar perfiles. En este tipo de reconocimientos se suelen emplear dispositivos Schlumberger (SEV) y Wenner (Calicatas).

El procedimiento de ejecución de un SEV consiste en mantener fija la posición de los electrodos de potencial (M y N), e ir incrementando progresivamente la distancia que separa a los electrodos de potencial (A y B), con lo que se consigue progresivamente mayor profundidad de investigación.

Para el caso de una calicata eléctrica, se suelen realizar dos mediciones en cada punto, la primera de ellas con los electrodos equiespaciados (configuración Wenner), y la segunda separando más los electrodos de corriente A-B, para conseguir una lectura correspondiente a una mayor profundidad.

Este tipo de reconocimientos suele emplearse para estudiar terrenos estratificados horizontalmente (SEV), o en la investigación de yacimientos arqueológicos (Calicatas).

3.5.2 RECONOCIMIENTOS EN MODELOS 2-D

Los dispositivos que más se emplean en los reconocimientos 2D son el dipolo-dipolo y el Wenner. Para realizar el reconocimiento, se clavan en el subsuelo a la vez un gran número de electrodos de acero, con un espaciado constante, conectados mediante un cable multiconector. Esta alineación de electrodos sigue el perfil geoelectrico 2-D que se quiere realizar. El amperímetro y voltímetro van montados en un mismo aparato, al que a su vez se conectan a los electrodos y un ordenador portátil.

El ordenador es programado para que realice una secuencia de medidas, y es unido a una caja de conmutación electrónica, que selecciona automáticamente los electrodos utilizados para la inyección de corriente y medida de potencial.

Con estas lecturas se generarán los pseudoperfiles de resistividad aparente, que luego serán procesados mediante software (RES2DINV u otros), para obtener tomografías eléctricas.

3.5.3 RECONOCIMIENTOS EN MODELOS 3-D

Se realizan de un modo similar a los reconocimientos 2-D, pero colocando los electrodos en disposición de malla bidimensional. Sólo se emplean en casos muy específicos, pues implican un gran número de mediciones.

3.6 TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

En la práctica de los métodos geoeléctricos, la técnica de estudio del subsuelo más aplicada es la que se conoce como “Tomografía Eléctrica”.

La tomografía es una técnica empleada para obtener una sección de un sólido. El término deriva de la palabra griega “τομος” que significa “sección” o “rebanada”. El uso de la palabra tomografía en la literatura geofísica es relativamente reciente. Aunque durante décadas se han empleado técnicas para crear representaciones del subsuelo (pseudosecciones de resistividad, etc.), estas representaciones se denominan “tomogramas”. La tomografía es un término habitualmente reservado para ***representar mediante imágenes los valores internos de un objeto a partir de sus proyecciones medidas desde el exterior del objeto***. Probablemente la aplicación más conocida de la tomografía sea en medicina, donde la técnica del scanner tomográfico computerizado (TAC), se aplica habitualmente para obtener imágenes en sección del cuerpo humano (Sharma, 1997).

La técnica de la tomografía eléctrica emplea los valores de resistividad aparente medidos con los dispositivos geoeléctricos sobre la superficie del terreno, para generar imágenes del subsuelo donde se representan los valores de la resistividad verdadera de las diferentes zonas del subsuelo. La relación entre la resistividad aparente y la resistividad verdadera, es una relación compleja. Para determinar la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de la resistividad aparente, se aplica la técnica de la “inversión” (Loke, 2004).

El objetivo de la inversión geofísica eléctrica es, como se acaba de indicar, encontrar un modelo de distribución de resistividades verdaderas en el subsuelo, que genere una respuesta similar a los valores de resistividad aparente medidos. Las relaciones matemáticas entre los valores de resistividad aparente medidos y la resistividad verdadera del subsuelo se obtienen a partir de métodos de elementos finitos o diferencias finitas.

El procedimiento de generación de una tomografía eléctrica mediante inversión, parte de los datos de resistividad aparente medidos, representados en forma de pseudoperfil. A continuación se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo, y resolviendo lo que se define como “cálculo del problema directo”, se llega al modelo de resistividades aparentes que se derivaría del mismo. Estas resistividades aparentes se comparan con las realmente medidas, y se calcula el error cometido. A través de este error se modifica el modelo hipotético real de

resistividades verdaderas, y se repite el proceso anterior. De este modo, tras una serie de iteraciones, se consigue un modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que da explicación a las resistividades aparentes medidas.

En el esquema de pseudosecciones que se incluye a continuación se detalla el procedimiento de inversión seguido para la obtención de una Tomografía Eléctrica.

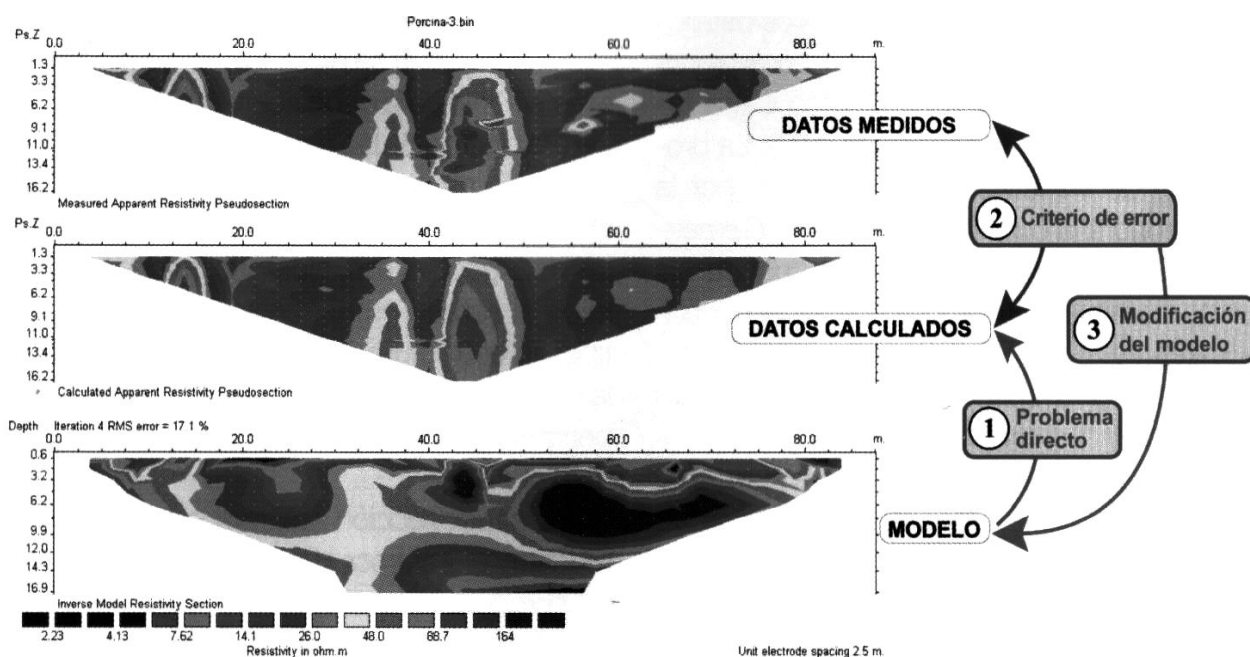


FIGURA 11: Etapas seguidas en el proceso de inversión geoeléctrico (Marescot, 2003)

3.7 PROFUNDIDAD MEDIA DE INVESTIGACIÓN

Se han definido distintos procedimientos matemáticos para determinar la ***“Profundidad de Investigación”*** de los dispositivos geoeléctricos, basados generalmente en la ***Función de Sensibilidad de Frechet***. Esta función valora el grado en el cual un cambio de resistividad del terreno del subsuelo provoca una variación en el potencial medido en los electrodos del dispositivo geoeléctrico.

Para ilustrar el concepto de Profundidad de Investigación de un dispositivo geoeléctrico, vamos a exponer los resultados que se derivan de la Función de Sensibilidad de Frechet en el caso

matemáticamente más sencillo, esto es, un dispositivo polo-polo, en un modelo 1-D unidimensional. Las conclusiones del estudio de este caso sencillo, son generalizables a medios bidimensionales o tridimensionales, y con otros dispositivos geoelectricos.

Para el caso de un medio continuo, de disposición horizontal, la Función de Sensibilidad de Frechet unidimensional (1-D) tiene la forma:

$$F_{1D}(z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1,5} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1,5}} dx dz$$

donde “a” es la distancia de separación entre los electrodos de corriente y de potencial, en un dispositivo polo-polo.

La expresión fue integrada por Roy y Apparao (1971), obteniendo la fórmula que se incluye a continuación, denominada ***Función Característica de Investigación, o de Sensibilidad:***

$$F_{1D}(z) = \frac{2}{\pi} \frac{z}{(a^2 + 4z^2)^{1,5}}$$

Se ha representado gráficamente la función característica de investigación, para a=10. La gráfica recoge en ordenadas los valores de la función de sensibilidad, y en abcisas la relación Z/a entre la profundidad “Z” y la separación “a” entre el electrodo de corriente y el de potencial. La sensibilidad empieza de cero, hasta alcanzar un máximo a una profundidad $Z = 0,35a$. A partir de dicho punto, su valor desciende asintóticamente hasta hacerse nulo. Algunos autores han considerado dicho máximo como la ***profundidad de investigación*** del dispositivo. Sin embargo Edwards (1977) ha demostrado que es más útil considerar el valor de la ***profundidad media de investigación (Z_e)***, que es la profundidad que en la gráfica anterior divide el área bajo la curva en dos mitades iguales. El significado físico de la esta profundidad Z_e es muy importante. Se trata del valor de la profundidad en el cual el tramo de subsuelo comprendido entre la superficie y dicha

profundidad tiene la misma influencia en el potencial medido (y por tanto en la resistividad), que el tramo de subsuelo que está por debajo de ella. Este valor Z_e , nos indica aproximadamente la profundidad hasta la que podemos observar el subsuelo con un determinado dispositivo geoeléctrico. Esta profundidad no depende de la resistividad aparente medida (Loke, 2004).

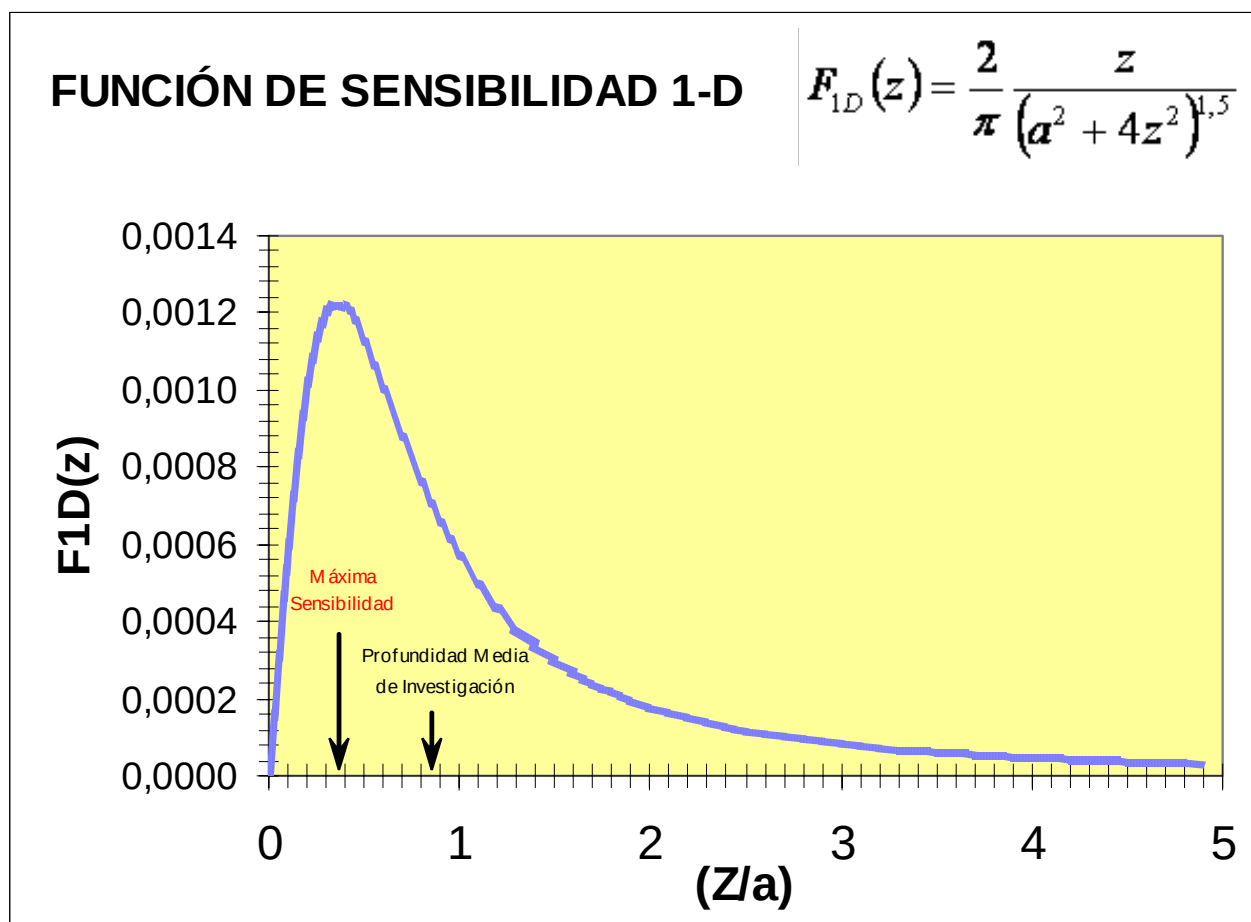


FIGURA 12: Función de sensibilidad

Diversos autores han empleado la función de sensibilidad, para determinar las propiedades penetrativas de los distintos tipos de dispositivos geoeléctricos en problemas bidimensionales. Edwards (1977) ha publicado unas tablas en las que se estima la profundidad media de investigación Z_e , en función de los parámetros geométricos del dispositivo:

Tipo de Dispositivo	n	Z_e / L	Z_e / a
Wenner	-	0,173	0,519
Dipolo-Dipolo	1	0,139	0,416
	2	0,174	0,697
	3	0,192	0,962
	4	0,203	1,220
	5	0,211	1,476
	6	0,216	1,730
	7	0,220	1,983
	8	0,224	2,236
Polo-Polo	-	-	0,867

Donde Z_e es la profundidad media de investigación, L la longitud del dispositivo geoeléctrico, n es el factor de separación del dispositivo dipolo-dipolo. El valor de “a” corresponde al espaciado entre electrodos, en el dispositivo dipolo-dipolo o el Wenner, y la distancia entre el electrodo de corriente y el de potencial en el dispositivo polo-polo.

Por ejemplo, en un dispositivo Wenner de 300 m, la profundidad de investigación será aproximadamente $Z_e = 0,173 L = 0,173 \cdot 300 = 52$ m. Para un dispositivo dipolo-dipolo, con un espaciamiento de electrodos $a = 10$ m, y un factor $n = 6$, se obtiene una longitud de dispositivo $L = a(n+2) = 80$ m, lo que supone una profundidad media de investigación de $Z_e = 80 \cdot 0,216 = 17$ m.

En la práctica de la realización de perfiles dipolo-dipolo, no suele sobrepasarse el valor $n = 12$, ya que a partir de dicha cifra la señal es prácticamente imperceptible. De este modo, si se quisiera realizar un perfil de la mayor profundidad de penetración posible, habría que recurrir a incrementar la longitud de dispositivo “ L ” sobre la base de incrementar el espaciado “a” entre electrodos. Así por ejemplo, si $a = 50$ y $n = 8$, se obtendría un dispositivo de longitud $L = a(n+2) = 500$ m, lo que proporcionaría una profundidad media de investigación de $Z_e = 0,224 \cdot 500 = 112$ m. Se concluye que, incrementando el valor del espaciado entre electrodos se incrementa la profundidad de investigación, pero se pierde resolución, ya que al haber mayor separación entre electrodos, los puntos de la pseudosección estarán más separados.

Es importante señalar, que lo expuesto es estrictamente válido solamente para subsuelos homogéneos, pero constituye una buena aproximación en la planificación de campañas de reconocimientos geoeléctricos (Loke, 2004).

4. MÉTODO SÍSMICO DE REFRACCIÓN

4.1 FUNDAMENTO DEL MÉTODO

El estudio de los terremotos, permitió conocer en el siglo XIX, que consistían en la propagación en todas direcciones de ondas elásticas. Pronto se conoció que el foco del sismo generaba ondas de compresión longitudinales o primarias (Ondas P) y ondas de cizalla transversales o secundarias (Ondas S). Así mismo, se comprobó que cuando las Ondas P y S alcanzaban la superficie del terreno, se generaban ondas superficiales de interfase, de tipo Rayleigh (Ondas R) y tipo Love (Ondas L).

Las Ondas P son las más rápidas, pues son las primeras que se observan. A continuación se registran las Ondas S, y finalmente llegan las Ondas Rayleigh y la Ondas Love. De este modo, se verifica que $V_P > V_S > V_R > V_L$.

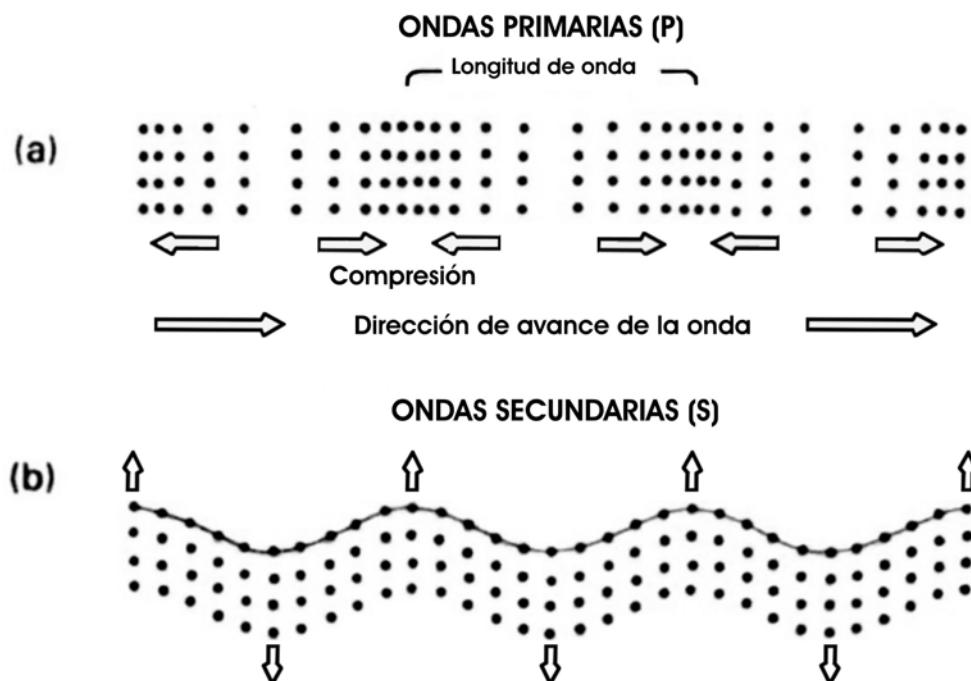


FIGURA 13: (a): Propagación de las ondas P. (b): Propagación de las ondas S

La **sísmica de refracción es un método geofísico de prospección, que estudia la respuesta del terreno cuando se propaga a través de él una onda de compresión (Onda P) producida por medios mecánicos en la superficie**. El parámetro físico que se analiza es la velocidad de propagación de la onda V_p a través de los materiales del subsuelo en función de la compacidad de los mismos. Tal parámetro nos aportará información de las características geomecánicas de la zona en que se apliquen.

Al incidir una Onda P sobre una superficie de separación entre dos medios se generan seis ondas diferentes: Onda P refractada, Onda P reflejada, Onda S refractada, Onda S reflejada, Onda Rayleigh y Onda Love. Lo mismo sucede cuando llega la Onda S, por lo que en total se generan doce ondas diferentes.

En el método sísmico de refracción se emplean sólo las ondas refractadas, pero sólo se observan las primeras llegadas de las ondas, que son Ondas P, ya que son las más rápidas. Se prescinde de las sucesivas ondas.

La liberación de la energía necesaria se realiza con golpes de mazas o explosiones en taladros de poca profundidad. A lo largo de la superficie se instalan geófonos, que captarán las oscilaciones provocadas por las sucesivas ondas que vayan arribando. El tiempo que las ondas tardan en alcanzar el geófono desde que son emitidas, es registrado.

La representación gráfica de los tiempos que tardan las ondas en alcanzar los geófonos, en función de las distancias al origen de la fuente, se denomina “Dromocrona”. Esta gráfica está compuesta a su vez de varias gráficas (al menos dos rectas y una parábola), que representa cada una a una onda distinta:

- La primera recta, que parte del origen de coordenadas, representa la **onda directa**, que viaja por la capa más superficial desde el origen de la fuente de energía hacia los geófonos. Su ecuación es $t = x / v_1$, donde v_1 es la velocidad de la primera capa.
- La segunda recta representa la **onda refractada** en la interfase entre la primera y la segunda capa. Su ecuación es $t = T_1 + x / v_2$, donde v_2 es la velocidad de la segunda capa y T_1 es el tiempo en el origen de la primera capa. Así mismo, según la Ley de Snell, se verifica que $\text{sen } i_c = v_1 / v_2$, donde i_c es el ángulo de incidencia.

- La parábola representa la **onda reflejada**, que es la última en llegar. Su ecuación es tiene la forma $t'^2 = t_0^2 + x^2 / v_I^2$, donde t_0 es la ordenada de la curva reflejada en el origen.

Las velocidades de las distintas capas, se obtienen como la inversa de las pendientes de las rectas de la onda directa y la refractada. El espesor de la primera capa se obtiene a partir de la siguiente ecuación, derivada de sencillas relaciones geométricas:

$$H = \frac{X_B}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

donde:

H = Espesor de la primera capa

X_B = Abcisa del primer codo de la dromocrónica (Cross-Over Point).

V_1 y V_2 = Velocidades respectivas de la primera y segunda capa.

Para determinar el tipo de terreno presente en las capas del subsuelo, es muy útil valorar la velocidad de las mismas. A continuación se incluye una tabla con los valores característicos de las litologías más importantes:

VELOCIDAD DE LAS ONDAS P EN LAS LITOLOGÍAS MÁS COMUNES (García, 2003)			
Tierra suelta	250 – 400 m/s	Pizarras	2.500 – 4.500 m/s
Limos y arenas flojas	350 – 500 m/s	Margas	2.500 – 4.500 m/s
Arenas y gravas sueltas	400 – 900 m/s	Calizas	3.000 – 5.500 m/s
Arenas y gravas sueltas saturadas	1.500 – 1.800 m/s	Areniscas	2.000 – 4.500 m/s
Agua	1.450 – 1.600 m/s	Granitos	3.500 – 5.500 m/s
Arcillas	900 – 2.500 m/s	Sal	4.000 – 5.000 m/s

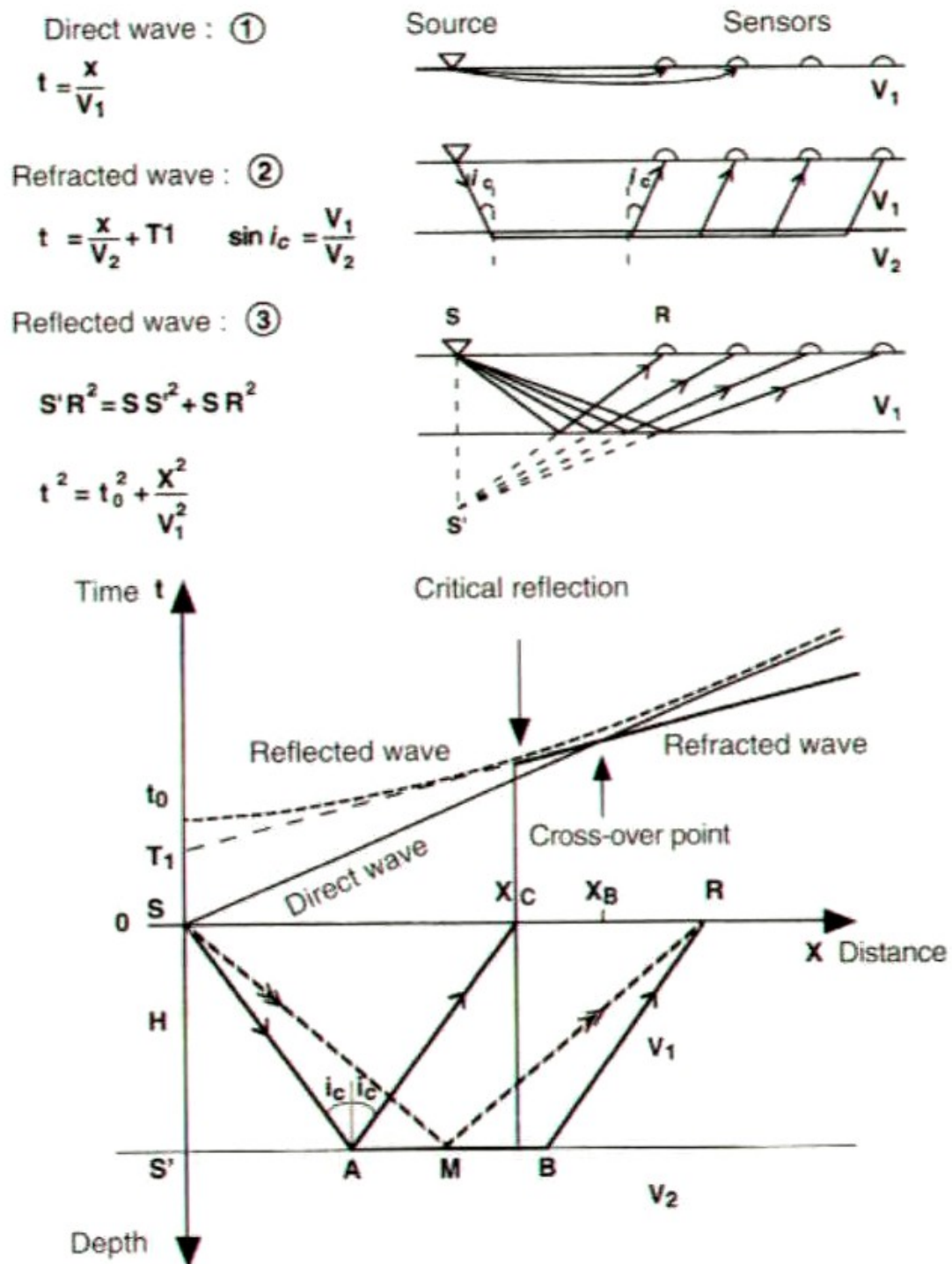


FIGURA 14: Dromocronas (curvas tiempo-distancia) de las ondas sísmicas (Mari, 1999)

La forma de las dromocronas aporta importante información respecto a la estructura geológica del subsuelo. A continuación se indican los ejemplos más característicos:

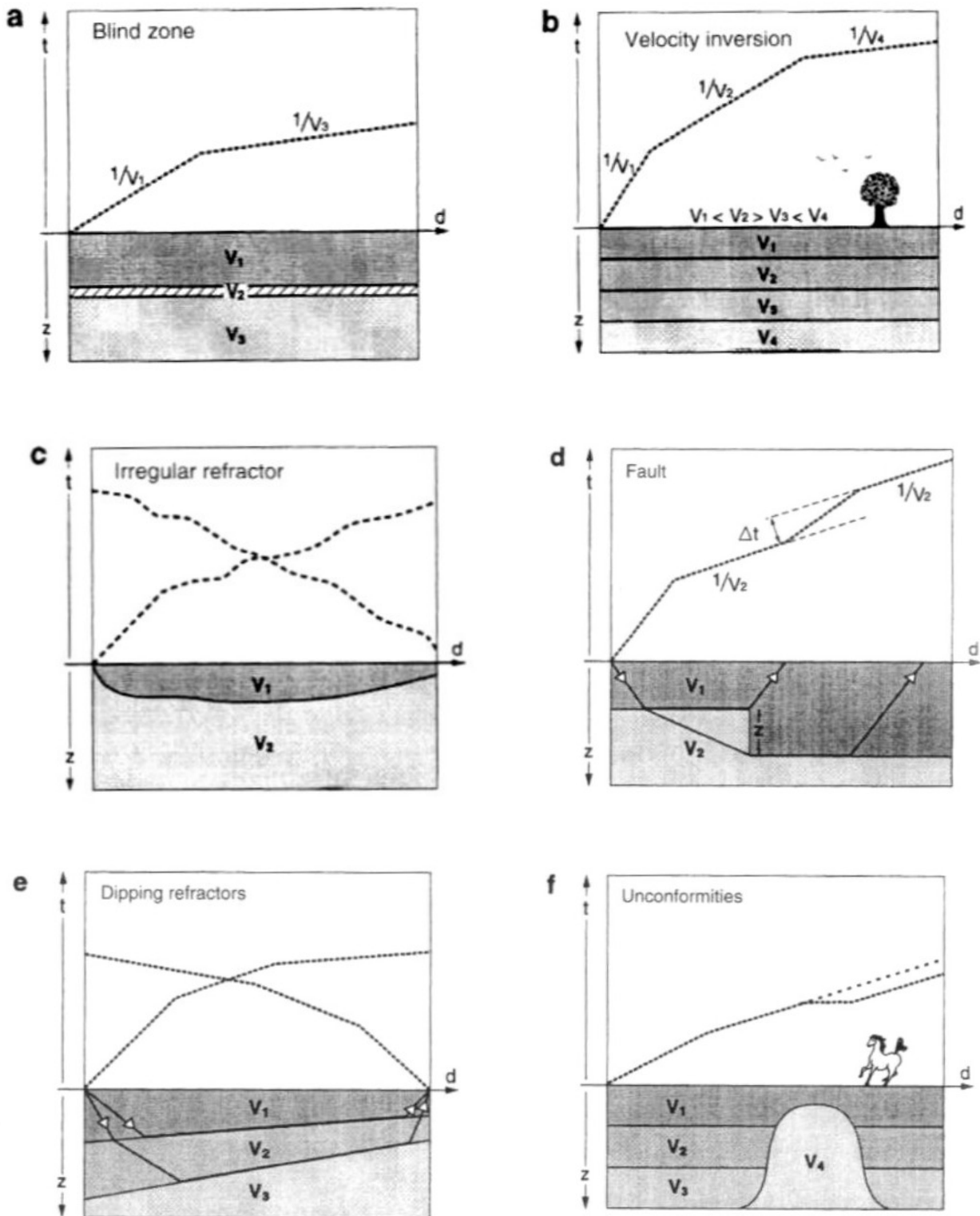


FIGURA 15: Diversos modelos geológicos del subsuelo con sus dromocronas (Mari, 1999)

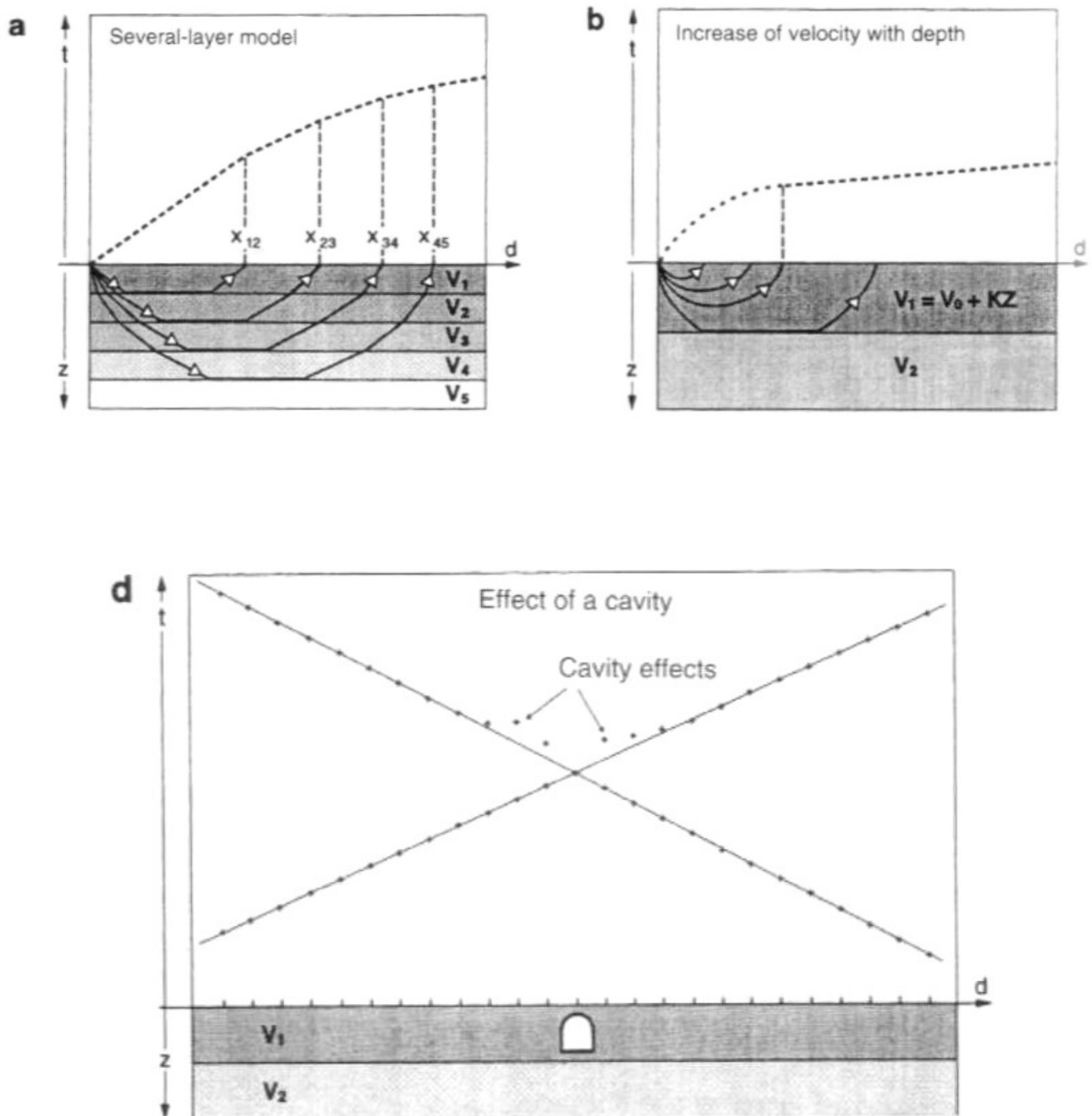


FIGURA 16: Diversos modelos geológicos del subsuelo con sus dromocronas (Mari, 1999)

4.2 METODOLOGÍA OPERATIVA

Para realizar el reconocimiento, en primer lugar se instalan alineados en la superficie del área en estudio una serie de sensores (geófonos). A continuación se golpea con el martillo sobre la placa metálica en uno de los puntos de disparo. La perturbación provocada por el impacto genera ondas que se transmiten por el subsuelo y son recogidas por cada geófono. Este impulso mecánico que recibe el geófono lo convierte en impulso eléctrico, que después de amplificado, pasa a la pantalla del sismógrafo en forma de señal visible generando los diferentes frentes de ondas y dando lugar a un registro.

La operación anteriormente descrita, es repetida para cada punto de disparo de la línea sin variar la posición de los sensores, obteniéndose así la máxima información posible.

Una vez concluida la campaña de campo se aplicará un programa de tratamiento de datos, que generará las dromocronas y dibujará un perfil con los espesores de las capas refractoras.

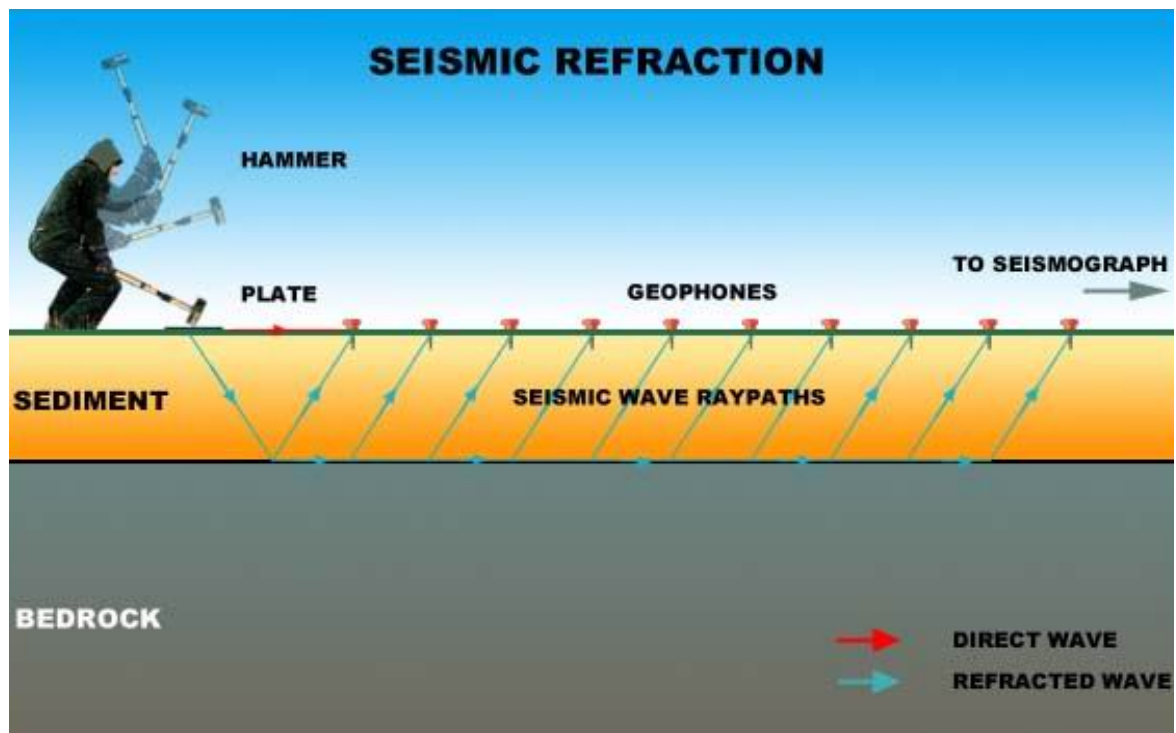


FIGURA 17: Metodología operativa de la sísmica de refracción

4.3 PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN Y RESOLUCIÓN

La profundidad de penetración y la resolución de la técnica sísmica de refracción viene condicionada por los siguientes parámetros operativos:

- **Número de geófonos:** determina la profundidad de investigación que se puede alcanzar. A mayor número de geófonos, se alcanza mayor profundidad de penetración.
- **Espaciado entre geófonos:** determina la resolución del registro, de modo que cuanto menor sea el espaciado, mayor será la resolución.
- **Número de puntos de tiro:** condiciona el detalle con el que se determina el espesor y la velocidad de las capas. A mayor número de puntos de tiro, mayor detalle.

- **Fuente de energía:** en las prospecciones someras la energía es generada por el golpeo de un martillo sobre una placa metálica. Con fuentes de energía más intensas (explosivo, aire comprimido, etc.) pueden alcanzarse mayores penetraciones y mayor alcance.

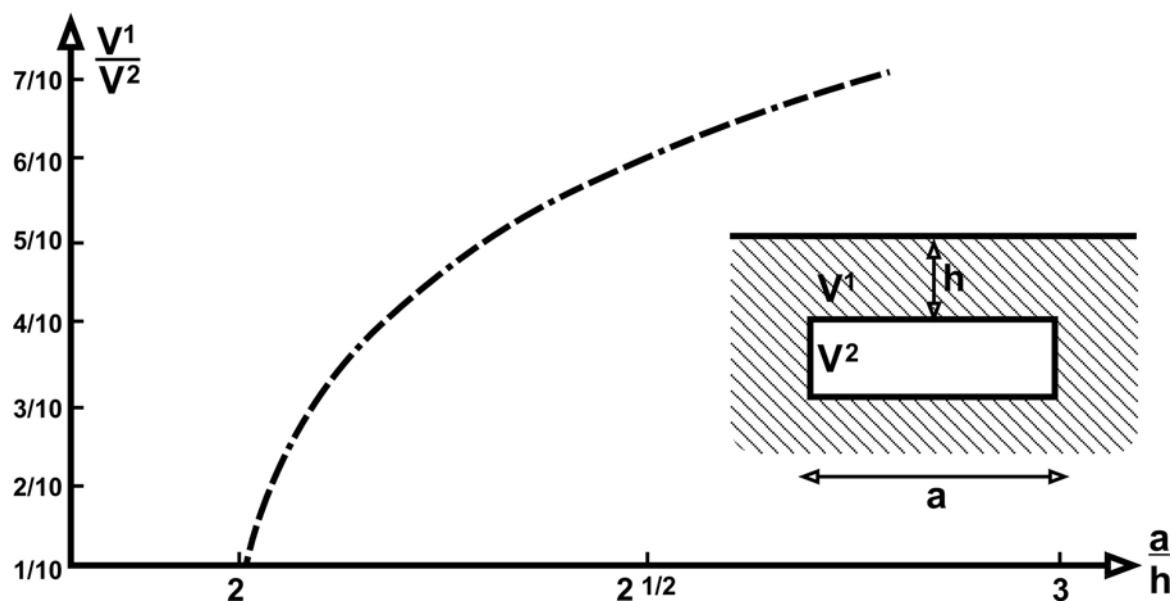


FIGURA 18: Tamaño mínimo de los cuerpos detectables en el subsuelo mediante sísmica de refracción (Chapelier, 1975)

5. CASOS PRÁCTICOS

5.1 DETECCIÓN DE FALLAS

5.1.1 TÚNEL DE LA CABRERA

El perfil TE-6, se realizó en el marco de los trabajos de redacción del Proyecto de Construcción de la Línea de Alta Velocidad a Levante, en la localidad de Buñol (Valencia).

En esta zona se localiza el Túnel de La Cabrera, de unos 7 km de longitud y 180 m de cobertera. La gran longitud de este túnel aconseja su ejecución con tuneladora. Esta máquina de excavación es muy sensible a la presencia de fallas, que pueden retrasar y dificultar en gran medida su avance.

Por ello, durante la redacción del Proyecto, se consideró importante la detección y ubicación de las fallas presentes en el trazado del túnel, para lo cual se aplicó la técnica de la tomografía eléctrica.

El perfil representado se encuentra situado en el P.K.807+910, y posee una longitud total de 400 m, una distancia entre electrodos de 10 m y una profundidad media de investigación de 60 m.

El terreno está constituido por dolomías jurásicas, en las cuales las fallas se muestran carstificadas y rellenas de arcillas “terra rossa”.



FIGURA 19: Dolomías del Túnel de la Cabrera

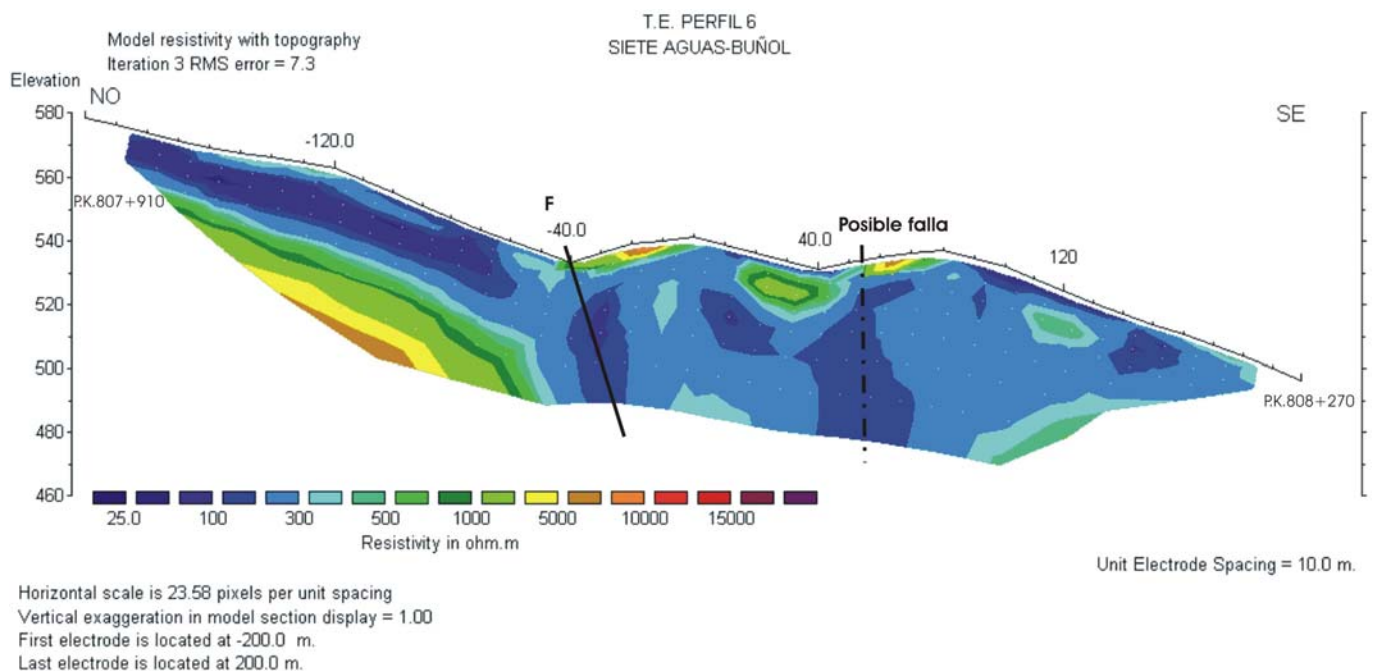


FIGURA 20: Detección de Fallas en el Túnel de la Cabrera (GEOCONSULT)

En este tramo de perfil se detectan dos fallas, coincidentes con el fondo de sendas vaguadas. Las zonas de falla muestran resistividades en el entorno de 25 Ω .m. Entre ellas aparecen materiales dolomíticos sanos, con resistividades superiores a los 500 Ω .m.

5.1.2 TÚNEL DE LOS PONTONES

El Túnel de Los Pontones se enmarca dentro del futuro Proyecto de Construcción de la Línea de Alta Velocidad León-Gijón. Se ubicará en el margen oeste del Valle del Huerna, en el Concejo de Pola de Lena (Asturias). El futuro túnel tendrá una longitud de unos 4 km, y unos 230 m de cobertera máxima. Se excavará en terrenos pizarrosos de la Formación Subhullero, de edad carbonífera.

Los estudios geológicos realizados revelaban la posible existencia de una zona de falla, pero la densa cobertera vegetal de la zona dificultaba su localización mediante reconocimientos de superficie o fotografías aéreas. El área de trabajo está incluida dentro de una zona de especial protección medioambiental (zona de hábitat del oso asturiano), lo que impidió realizar sondeos y accesos a los mismos.

Esta circunstancia aconsejó la realización de perfiles profundos de Tomografía Eléctrica. Se realizaron tres perfiles de 800 m, que se fusionaron para representar un único perfil de 2.000 m. Se alcanzó una profundidad media de investigación en torno a los 112 m.

El perfil realizado, denominado (TE-8), muestra una zona de baja resistividad, de unos 350 m de longitud, ubicada entre los P.K 590 y 240. La resistividad de esta zona varía entre 10 y 130 Ω .m, que corresponde a valores propios de terrenos arcillosos o terrenos saturados de agua dulce.

La zona detectada presenta una estructura verticalizada, lo que sugiere que se trata de un corredor de fallas. Esta hipótesis se ve reforzada por la coincidencia de esta zona con un área de topografía más deprimida, que flanquea el punto de mayor cota topográfica del trazado del futuro túnel.

El resto del trazado muestra un subsuelo constituido por zonas de altas resistividades, superiores a 700 Ω .m, que correspondería a tramos de pizarras sanas.



FIGURA 21: Pizarras de la Formación Subhullero (GEOCONSULT)

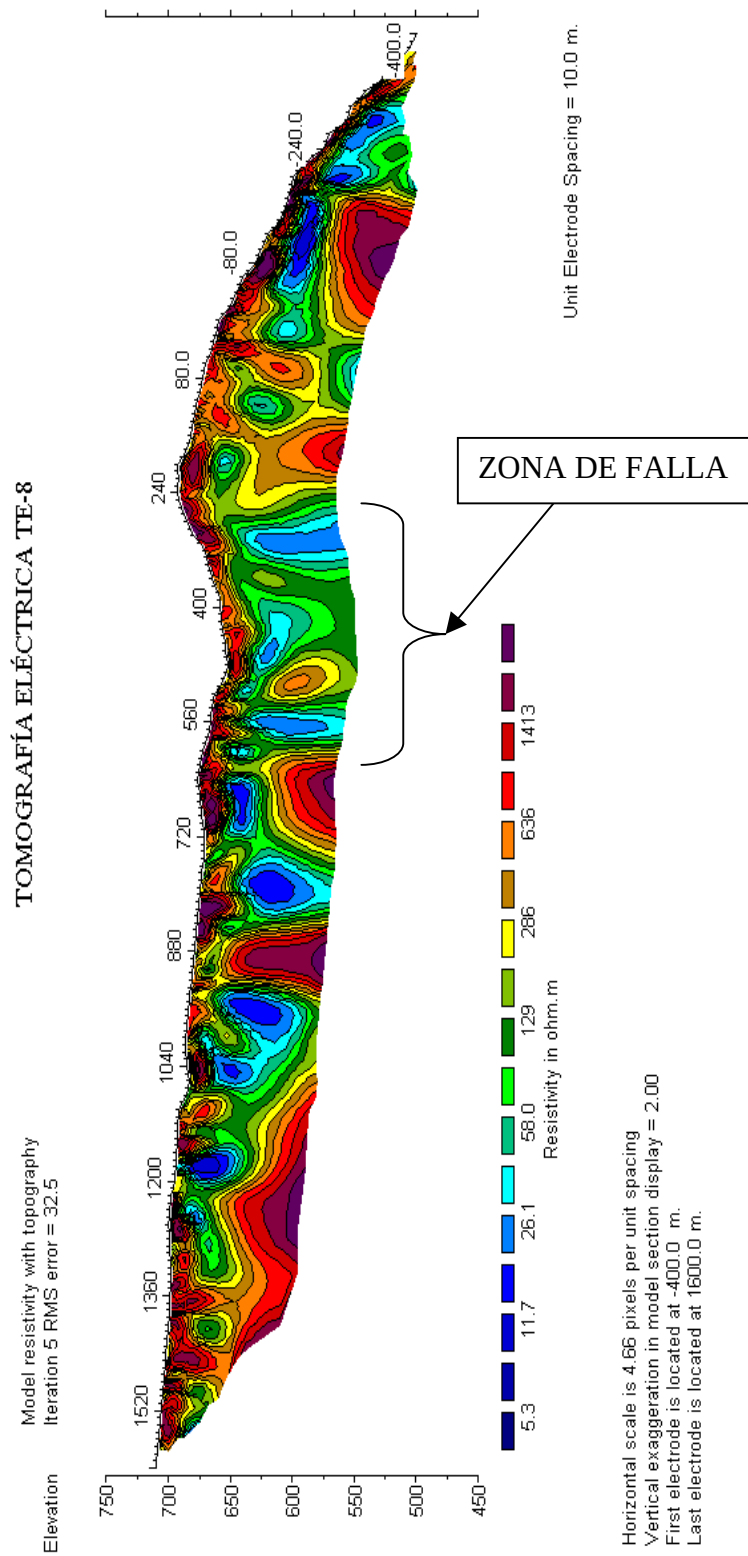


FIGURA 22: Detección de una zona de falla en el Túnel de los Pontones (GEOCONSULT)

5.1.3 TÚNEL DE BREGUA

En el Eje Atlántico Ferroviario (Galicia), se está excavando el Túnel de Bregua, caracterizado por excavarse en roca granodiorítica. Las coberteras del trazado de este túnel son muy bajas, lo que con frecuencia provoca que la alteración superficial del terreno alcance la cota del túnel.

El trazado atraviesa una vaguada, de unos 700 m de longitud, en la que se sospechaba que pudieran interceptarse numerosas fallas, zonas alteradas y flujos de agua, que complicarían la ejecución del túnel. La zona donde discurre la vaguada tiene aspecto de cubeta tectónica, flanqueada por zonas de ruptura de pendiente. En ella se esperaba localizar las siguientes litologías:

- Granodioritas con distintos grados de alteración.
- Suelo residual con cierta cantidad de arcilla (jabre).
- Fondo de vaguada con arcilla y limo marrón oscuro con algo de arena y grava y abundante materia orgánica.

En estas circunstancias, se consideró realizar una tomografía eléctrica, en el tramo del trazado que interceptaba la citada vaguada. El perfil realizado tiene unos 800 m de longitud, con una profundidad de investigación estimada de unos de 40 m. Se ha utilizado un dispositivo que emplea la técnica dipolo-dipolo, con electrodos espaciados cada 10 m, midiéndose a 10 niveles de profundidad.

En este perfil de tomografía eléctrica pueden distinguirse tres niveles geotécnicos:

- Una primer nivel, con alto índice de humedad, constituido por suelos residuales de arenas graníticas con arcillas, jabres o rellenos de falla. El rango de colores es azul, y corresponde a valores de la resistividad aparente inferiores a 400 Ω m.

- Un segundo nivel, con un rango de colores de verde a azul (400 a 1000 Ωm) donde encontramos unas granodioritas con una alteración entre moderada y alta distribuidas irregularmente.
- Un tercer nivel con un rango de colores de rojo a morado (1.000 a 20.000 Ωm) con altos valores de resistividad, que se corresponden a unas granodioritas sanas o débilmente alteradas; estas granodioritas sanas se encuentran en superficie entre el PK 1+600 y 1+700.

Los valores de resistividad de la roca granodiorítica, oscilan entre 400 y 20.000 Ωm , que se encuentra dentro del intervalo habitual de las granodioritas húmedas (valores más bajos) y secas (valores más altos).

A lo largo del perfil pueden distinguirse varios sectores:

- **El primer sector situado entre los PK 1+100 y 1+320:** Se localizan una serie de fallas verticalizadas, que se sitúan en la zona de ruptura de pendiente las cuales afectan a las granodioritas fracturándolas, alterándolas y disgregándolas. Estas fallas hacen que circule en agua del nivel freático muy superficial hacia esta zona situada aproximadamente a 30 m de profundidad, aumentando el contenido en agua de esta zona más alterada (dando unas resistividades bajas). En las proximidades de las fallas se observan descensos del nivel freático superficial.
- **El segundo sector situado entre los PK 1+320 y 1+450:** se localiza una granodiorita sana, que aparecerá en estas condiciones tanto en solera como en clave del túnel. No deben descartarse en clave las filtraciones y la presencia de alguna zona alterada, como consecuencia de la presencia de horizontes de descompresión.
- **El tercer sector, situado entre 1+450 y 1+520:** el túnel se desarrollará sobre una solera de granodiorita sana, pero la clave aparecerá seguramente alterada y con presencia de filtraciones.
- **El cuarto sector, entre los PP.KK 1+520 y 1+800:** Se localizarán fallas, zonas alteradas y de jabre. La presencia de agua será habitual.

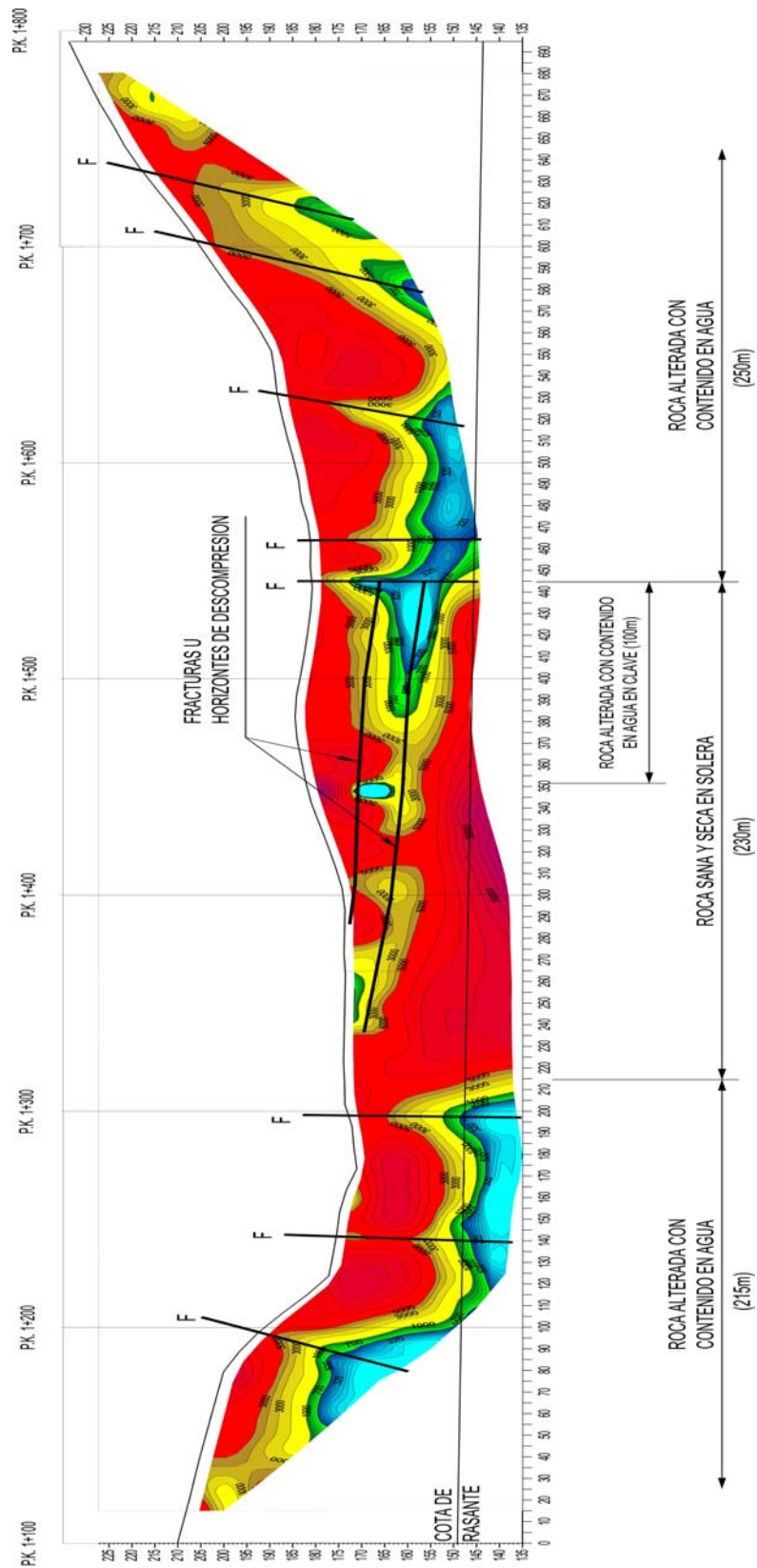


FIGURA 23: Detección de Fallas en el Túnel de Bregua (GEOCONSULT)

5.2 DETECCIÓN DE CAVIDADES

5.2.1 CUEVA DE LEZETXIKI

El trazado de la futura Línea de Alta Velocidad Ferroviaria Vitoria – Bilbao – San Sebastián (Y-vasca), discurre en parte a través del denominado “Sistema Cárstico de Udalaitz”, situado en el SW de Guipúzcoa, en los términos municipales de Mondragón y Vergara. En este macizo cárstico, se encuentra la Cueva de Lezetxiki, la cual posee un yacimiento con algunos de los niveles más antiguos de la Prehistoria vasca. Del nivel VII proviene un húmero humano datado de hace 310.000 años (Paleolítico Inferior), época que corresponde a una fase fría de la glaciación Riss. En los niveles VI y V (situados encima del anterior) aparecieron industrias Musterienses y molares humanos; estos niveles corresponden al Riss final (230.000 años AP) y al interglaciar Riss-Würm (186.000 años AP). Los restos humanos mencionados son del Hombre de Neanderthal.

Por estas razones, la Declaración de Impacto Ambiental (D.I.A) del citado trazado, prescribió la realización de estudios específicos y adopción de las medidas necesarias para proteger el citado yacimiento arqueológico.

De acuerdo a la D.I.A, se realizaron trabajos de reconocimiento, para tratar de determinar si el trazado de la línea ferroviaria proyectada afectaría a la Cueva de Lezetxiki. La cavidad es de trazado horizontal, con abundantes espeleotemas en toda su longitud, y presenta una galería general con numerosas pequeñas ramificaciones, que vuelven a unirse a la principal o se entrelazan formando pequeños laterales laberínticos. Aunque el desarrollo es de 1.65 km, la extensión lateral en planta es de 360m en dirección NNO. El desnivel desde el inicio de la galería inferior es del orden de 10 m. La cueva se desarrolla a favor de los sistemas de fracturación, y fundamentalmente la estratificación, dentro de la Formación de Calizas de Udala, de edad cretácica.

Para investigar la ubicación y desarrollo de la cueva, se seleccionó el método de la Tomografía Eléctrica. Se ejecutó un perfil de tomografía eléctrica de 240 m, denominado TE-5, con un espaciado de electrodos de 10 m, y una profundidad de investigación estimada de unos 50 m.

Como la Cueva de Lezetxiki se encuentra vacía, la tomografía señala una resistencia eléctrica muy alta, debido a que el aire que rellena la cavidad no conduce la corriente eléctrica. En este caso, la anomalía muestra un fuerte gradiente y alto valor de resistencia, tal como se aprecia en el perfil adjunto.

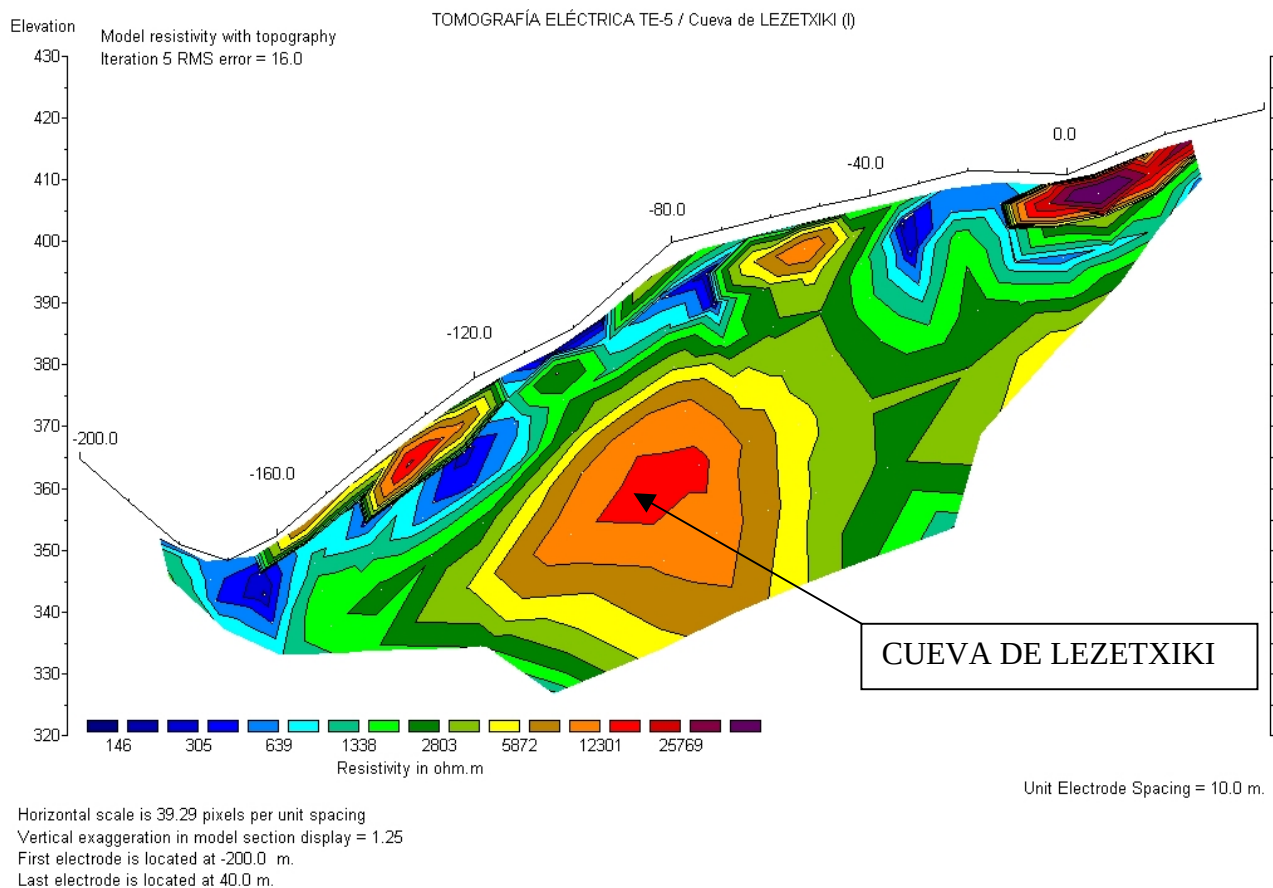


FIGURA 24: Detección de la Cueva de Lezetxiki (GEOCONSULT)

5.2.2 TÚNEL DE ARRAIZ

El trazado de la futura Autopista de Circunvalación “Variante Sur Metropolitana de Bilbao”, se desarrolla fundamentalmente en túnel, atravesando litologías de edad cretácica, en las que frecuentemente se localizan yacimientos minerales de hierro, que han sido objeto de explotación minera, mediante el método de cámaras y pilares.

Uno de los túneles proyectados, denominado Túnel de Arraiz, transcurre a través del entorno de la antigua Mina “Primitiva”. En la zona se localizán diversas cámaras y escombreras mineras, así como fallas y accidentes tectónicos, cuya posición era necesario detectar con precisión.

Para resolver el problema, se realizó un perfil de tomografía eléctrica (perfil 5), ubicado entre los P.K.17+590 y el P.K.18+145, que tiene una longitud de 560 m con una separación entre electrodos de 10 m, que permitió alcanzar una penetración máxima de 62 m. El perfil obtenido se muestra a continuación.

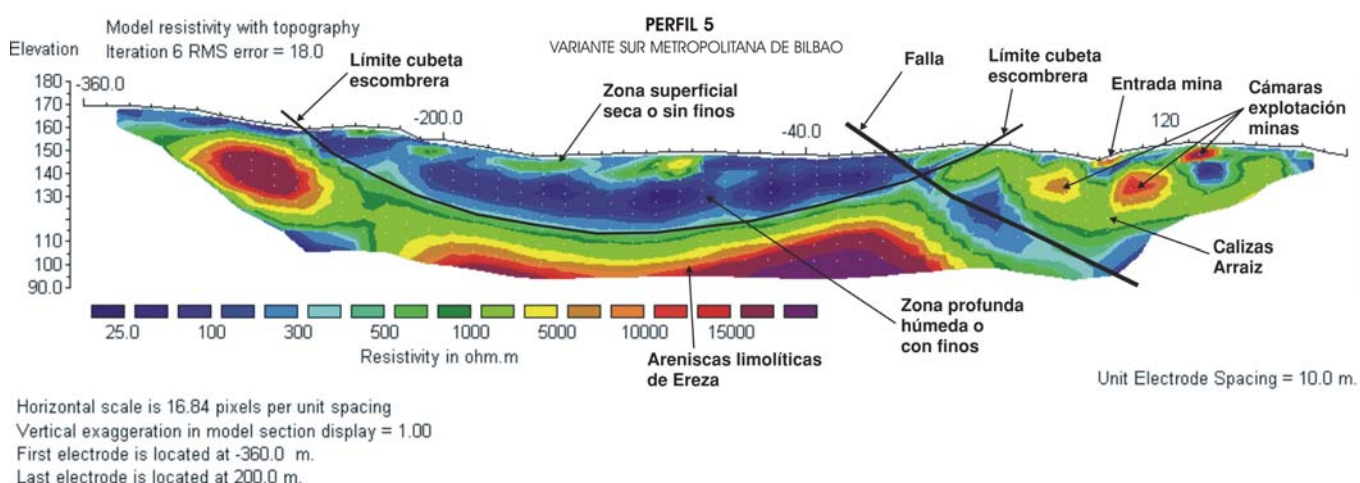


FIGURA 25: Detección de minas, escombreras y fallas en el entorno del Túnel de Arraiz (GEOCONSULT)

El perfil muestra con nitidez la estructura del subsuelo:

- Se aprecian una serie anomalías de alta resistividad (mayor de $5.000 \Omega.m$), que se interpretan como de cámaras subterráneas de explotación minera, rellenas de aire, ubicadas muy someras, cerca de la boca de entrada en superficie. Sus tamaños oscilan entre los 30 y 10 m de diámetro.
- Se observa una cubeta de material que presenta baja resistividad (inferior a $100 \Omega.m$), que corresponde a una escombrera visible en superficie. La baja resistividad se debe a dos factores, que concurren simultaneamente o de forma separada:
 1. El material de la escombrea generalmente se encuentra esponjado, por lo que su permeabilidad es alta, lo que hace que generalmenet se encuentre saturado en agua.

2. En las escombreras secas, el agua de infiltración de la lluvia suele arrastrar finos hacia el fondo de la misma. Estos finos arcillosos son los responsables de la baja resistividad.
- Se observa un contacto mecánico (falla) entre las Areniscas limolíticas de la Formación Ezeiza y la Calizas de la Formación Arraiz. La falla se muestra como un cuerpo tabular de baja resistividad, debido probablemente a la presencia de arcillas y agua en la zona de falla.

5.3 EMBOQUILLES DE TÚNELES

El ejemplo que se ilustra corresponde al Túnel de Ordizia, ubicado en la Línea de Alta Velocidad Ferroviaria Vitoria – San Sebastián (Y-Vasca), en las proximidades de la localidad de Beasain (Guipúzcoa). El túnel se excava en pizarras de edad cretácica.

Para definir los emboquille de la boca de salida del túnel, se realizaron dos perfiles sísmicos de refracción, uno longitudinal a la traza, y otro transversal. En la figura que se incluye a continuación, se ha representado el corte sísmico longitudinal y transversal, así como sus correspondientes dromocronas.

Del análisis de estos gráficos pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

1. En la zona más superficial del emboquille se localiza un material suelto, de baja velocidad (380 m/s), que probablemente corresponda a un depósito coluvial. Bajo este se localiza una capa con una velocidad en el entorno de 1.500 m/s, subparalela a la superficie topográfica del terreno, que probablemente corresponda a un horizonte de alteración de pizarras. Por debajo de éste, afloran las pizarras sanas en las que se excavará el túnel, con una velocidad sísmica de 2.400 m/s.
2. La capa coluvial y la de pizarra alterada, presentan velocidades inferiores a 1.850 m/s, lo que indica que será ripables. Por debajo de estas dos capas se localiza la pizarra sana, que al presentar una velocidad de 2.400 m/s, será necesario volar para poder ser excavada.

3. El punto de emboquille, se ubica a 27 m del inicio del perfil longitudinal. En este punto, el túnel se emboquilla manteniendo sobre su bóveda un espesor de terreno sano igual al tamaño del propio túnel.

BOCA DE SALIDA

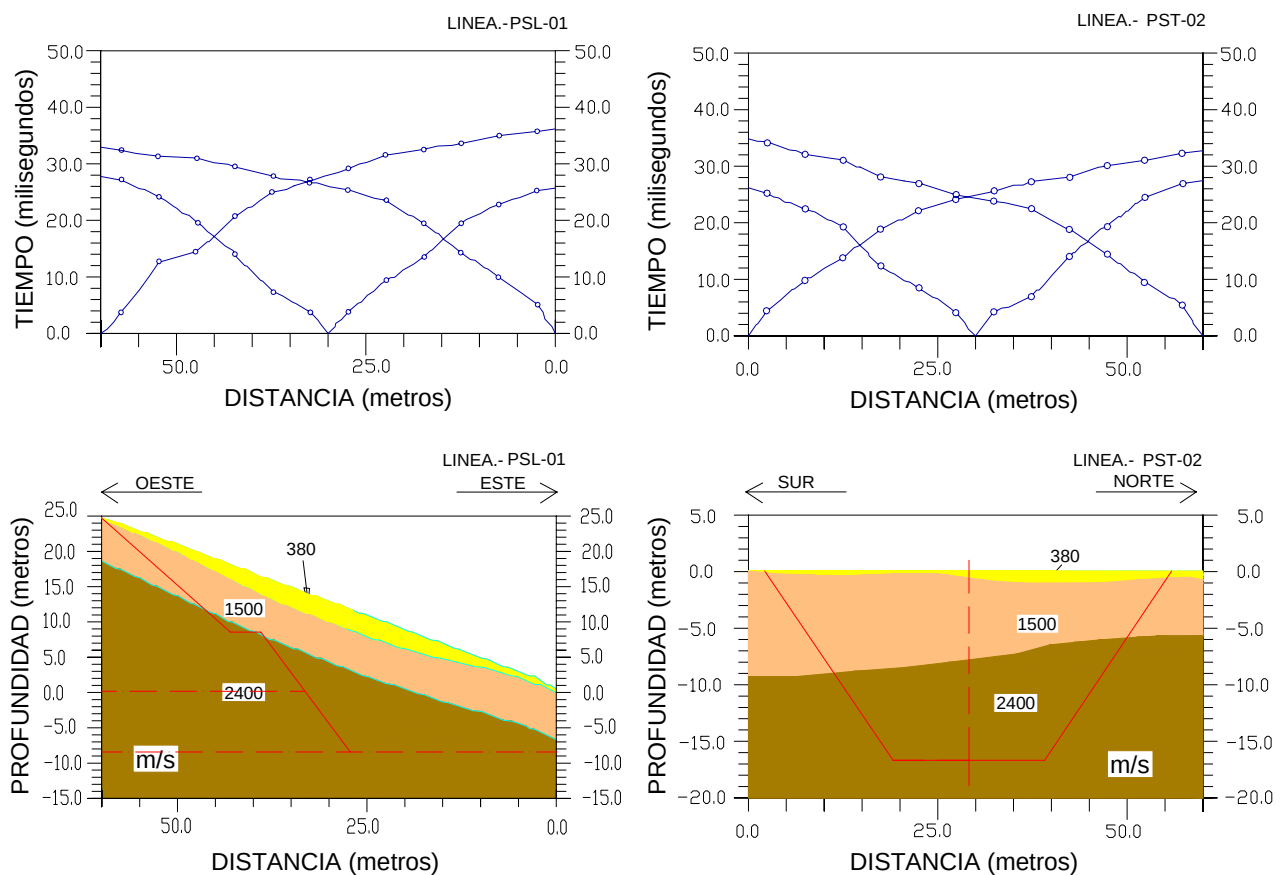


FIGURA 26: Dromocronas y perfiles geológicos del emboquille del túnel (GEOCONSULT)

5.4 ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS

A lo largo del desarrollo de los estudios geológicos preceptivos para la redacción del Proyecto de Construcción de la Línea de Alta Velocidad a Levante, entre los términos municipales

de Seseña y Aranjuez (Toledo y Madrid), se necesitó definir con precisión la profundidad del nivel freático de un acuífero aluvial próximo al Río Tajo.

No era posible la realización de sondeos, pues la zona se encontraba cultivada, no siendo posible abrir accesos a través de los cultivos. Por ello, se consideró que el mejor método para comprobar la profundidad del acuífero sin dañar los cultivos, sería el de la tomografía eléctrica, ya que con esta técnica solo es necesario clavar un pequeño número de varillas metálicas en el terreno (electrodos).

Para ello se realizó un perfil de 330 m, denominado TE-06, con un espaciamiento entre electrodos de 10 m, y una profundidad de media de investigación de 48 m.

El perfil de tomografía muestra con claridad la posición en profundidad del nivel freático, caracterizado por presentar valores de resistividad en el entorno de los $10 \Omega.m$, propios del agua dulce. Por encima del freático, la porosidad del aluvial se encuentra rellena de aire, por lo que los valores de resistividad suben hasta $75 - 500 \times 10 \Omega.m$

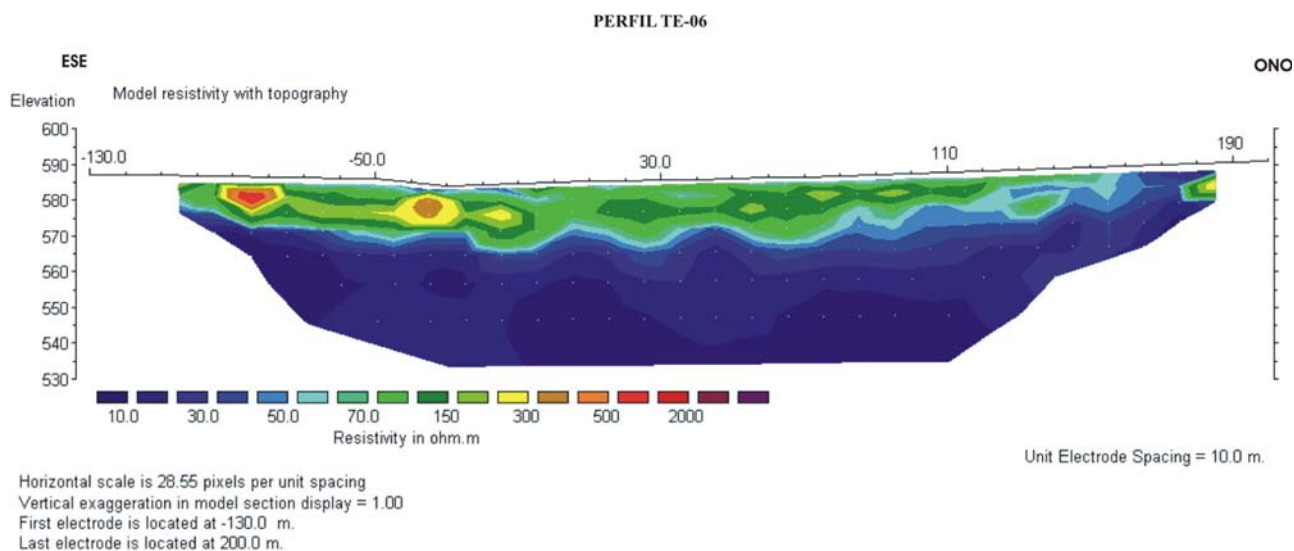


FIGURA 27: Tomografía eléctrica para detección de un nivel freático en el aluvial del Río Tajo (GEOCONSULT)

5.5 YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS

5.5.1 CASTRO DE LLAGU

El Castro de Llagú es un yacimiento pre-romano, situado en la parroquia de Latores, a cinco kilómetros de Oviedo (Asturias). El yacimiento se enmarca en la denominada cultura castreña y ocupa una considerable extensión, superando los 15.000 m², configurando un recinto amurallado en todo su perímetro.

En la zona sur del yacimiento se localiza una cantera de áridos, que explota una caliza de edad carbonífera. La ampliación de la cantera hacia la zona del yacimiento motivó que se desarrollase una intensiva campaña de excavación arqueológica, en cuyo contexto se enmarca la prospección geofísica realizada.

Se realizó un reconocimiento geoeléctrico, cuyo objetivo fundamental era la detección de la muralla perimetral y zonas pavimentadas. La exploración se estaba programada para investigar profundidades someras, menores de 2 m.

Para ello, se preparó un dispositivo geoeléctrico, que investigaría el sedimento superficial a dos profundidades. El dispositivo confeccionado, estaba basado en la configuración Wenner, y podía desplazarse por la superficie del terreno, realizando el reconocimiento, sin necesidad de clavar electrodos en el terreno.

Tal como se ilustra en la foto, el dispositivo disponía de un pareja única de electrodos de potencial (M y N) y dos parejas de electrodos de corriente (A y B).

La profundidad de penetración del dispositivo, depende de la separación entre los electrodos de emisión A y B. A medida que estos electrodos se separan, la corriente penetra más profundamente. El dispositivo preparado permite penetrar en el subsuelo a dos profundidades distintas, según se conecten o desconecten determinados interruptores en el equipo (ver croquis):

- En primer lugar se conectarán los interruptores de manera que se consiga que $(AB/2) = 1 \text{ m}$ y $MN = 0.5 \text{ m}$. De este modo las líneas de corriente penetran poco en el terreno, y se obtiene una lectura superficial, es decir correspondiente a la zona más

próxima a la superficie. De ahora en adelante denominaremos a esta configuración de interruptores “dispositivo superficial”.

- A continuación se conectarán los interruptores de modo que se consiga que $(AB/2) = 2 \text{ m}$ y $MN = 0.5 \text{ m}$. De esta manera, al incrementarse la distancia entre A y B se consigue que la corriente penetre más profundamente en el terreno, y la lectura reflejará la resistividad del material situado más en profundidad. A esta configuración la denominaremos “dispositivo profundo”.

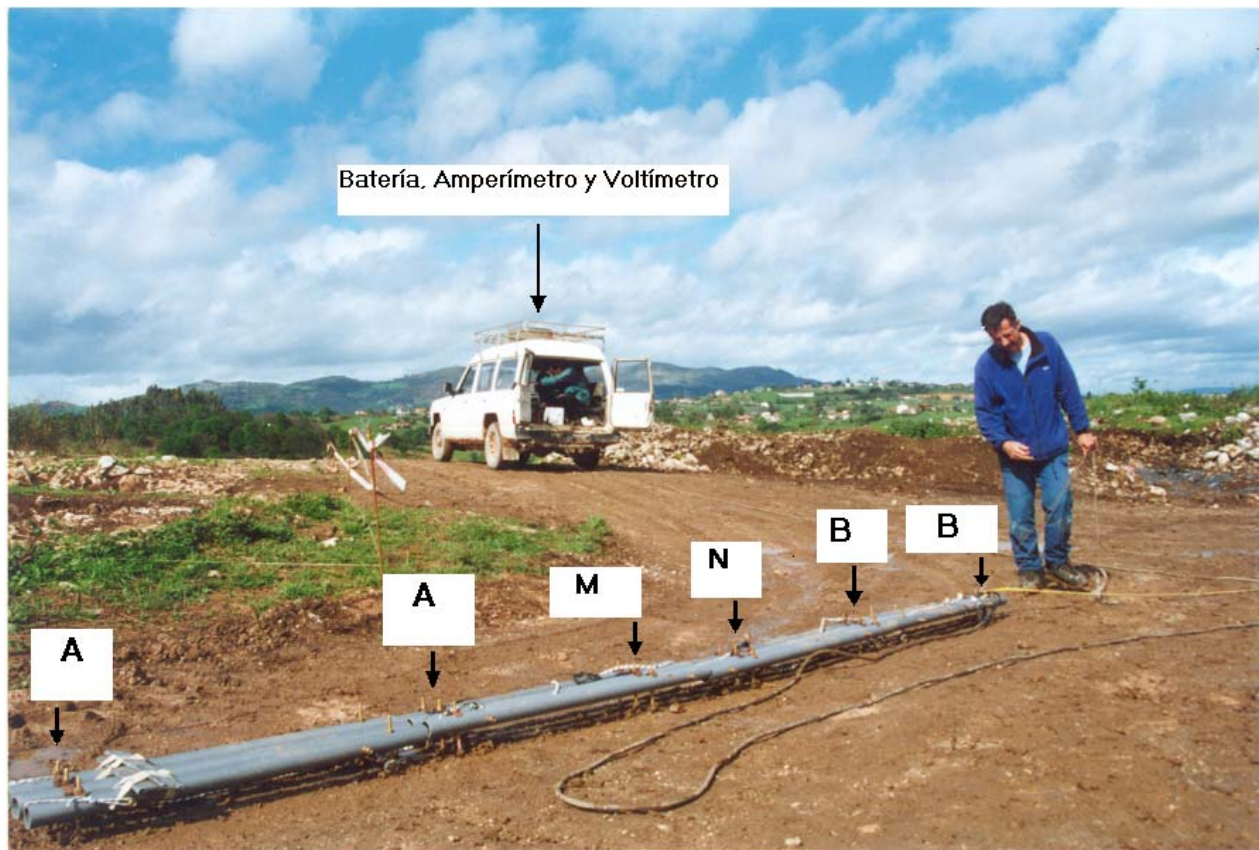


FIGURA 28: Dispositivo para la realización de perfiles geoeléctricos en el Castro de Llagu

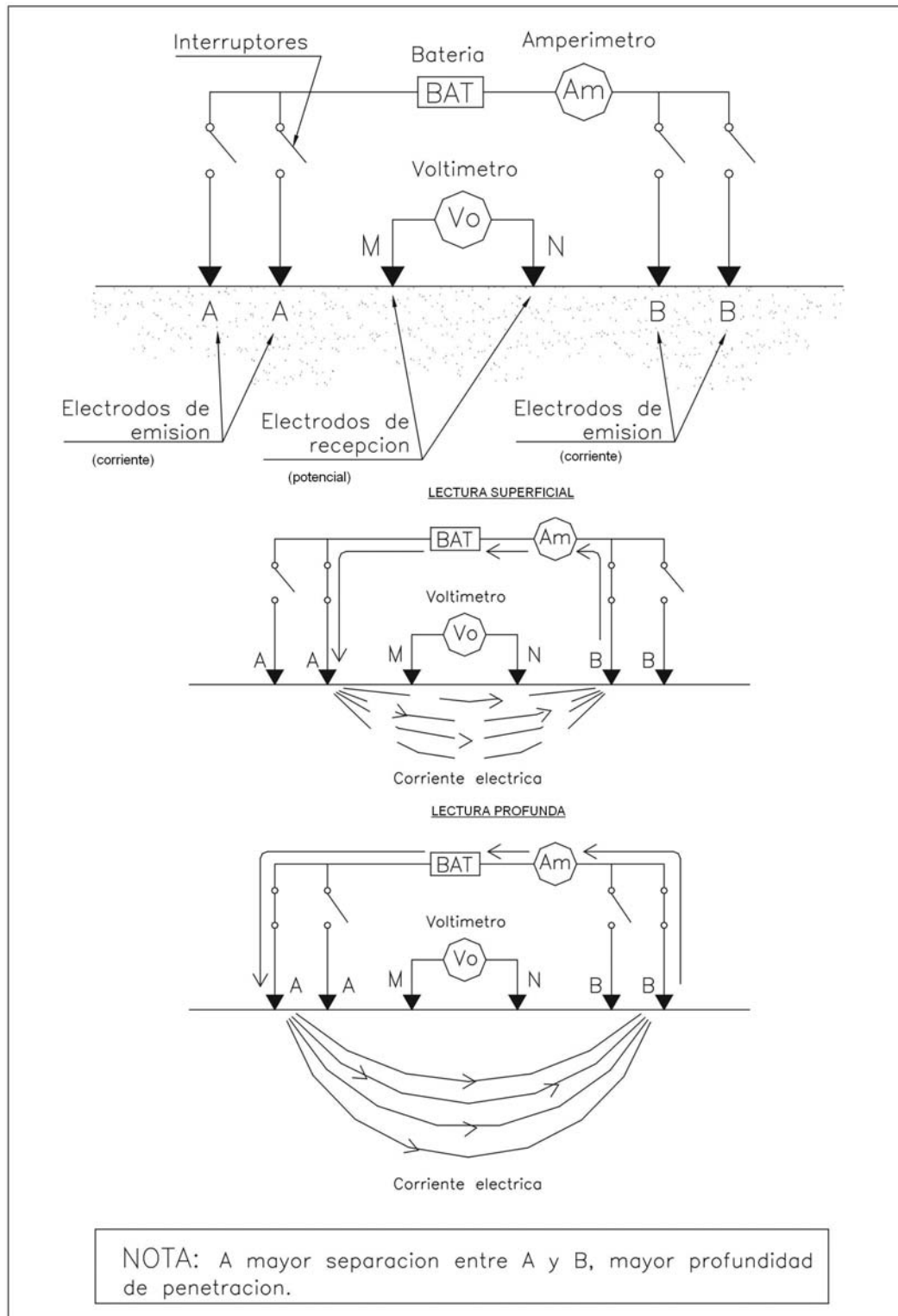


FIGURA 29: Esquema de funcionamiento del dispositivo empleado en Castro de Llagu

De este modo se realizaron dos perfiles (PG-1, y PG-2), que investigaron el subsuelo a dos profundidades distintas (ambas inferiores a 2 m). Los resultados de esta prospección se representaron en forma de perfil.

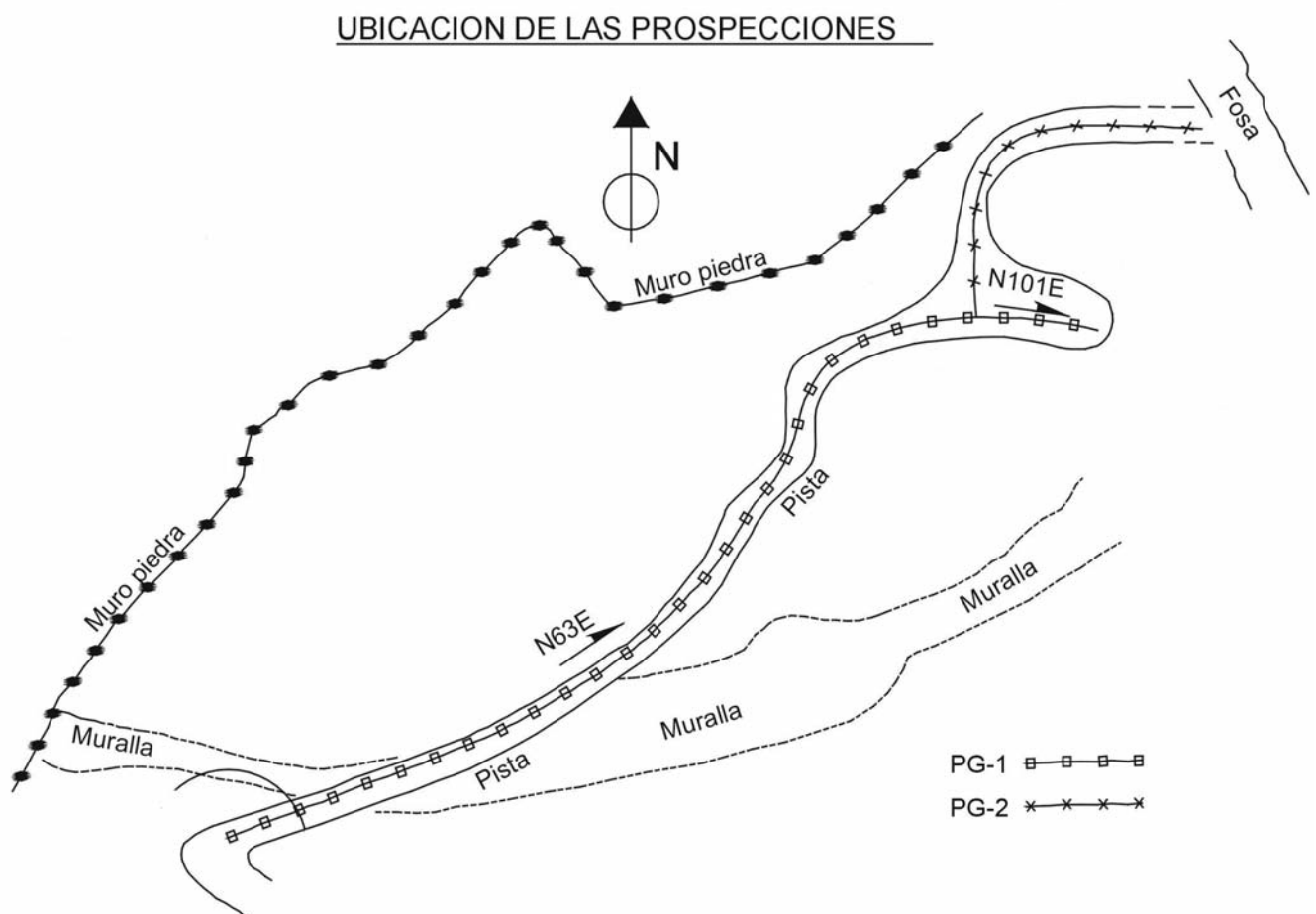


FIGURA 30: Esquema de la zona investigada y los perfiles geoelectricos realizados en el Castro de Llagu

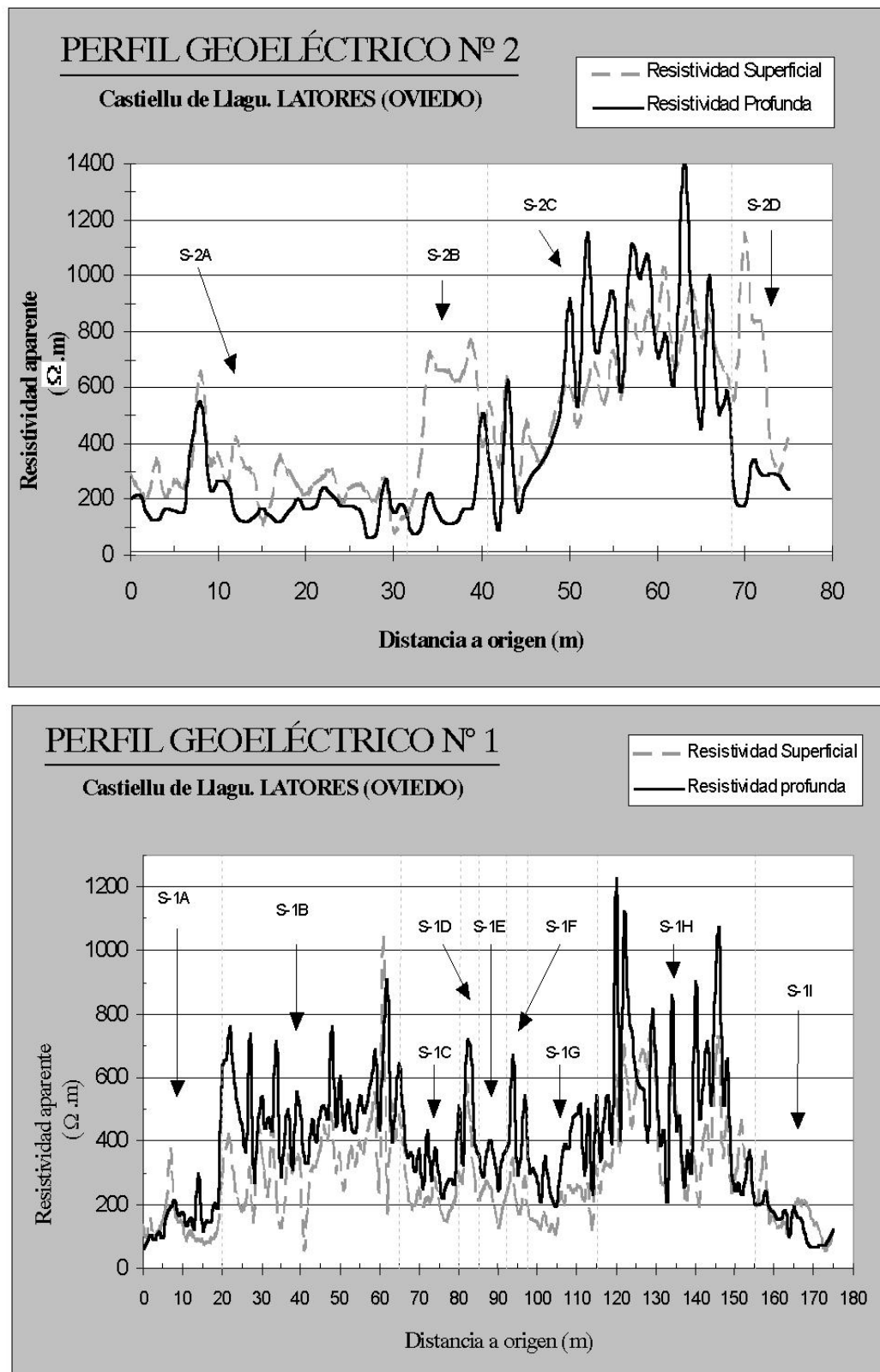
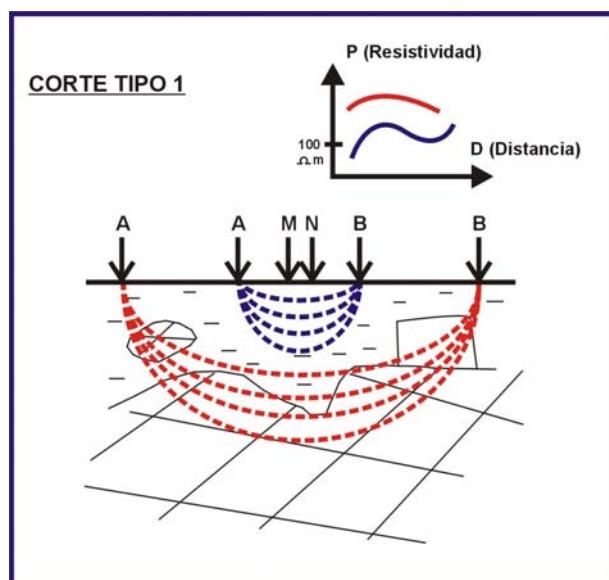


FIGURA 30: Perfiles geoeléctricos en el Castro de Llagu

Para facilitar la labor de interpretación de los resultados, se ha definido un modelo interpretativo. En este modelo se han representado previamente todos los cortes geológico-arqueológicos que se han observado en campo. A partir de ellos, se ha dibujado la curva orientativa de resistividades que cada uno de dichos cortes eventualmente generaría. A partir de dicho modelo, y por comparación con las lecturas obtenidas durante la prospección, se realizará la interpretación de resultados. Se han definido cinco cortes geoeléctricos tipo, denominados respectivamente Tipo 1, 2, 3, 4 y 5. A continuación se representan y describen cada uno de ellos.

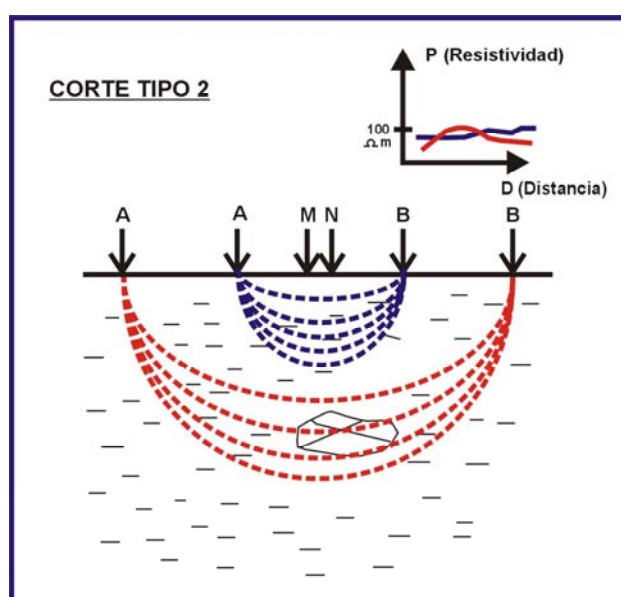
Corte Tipo 1: capa superficial de sedimentos arcillosos, de espesor entre 0.1 y 0.4 m, recubriendo un sustrato de roca caliza.

→

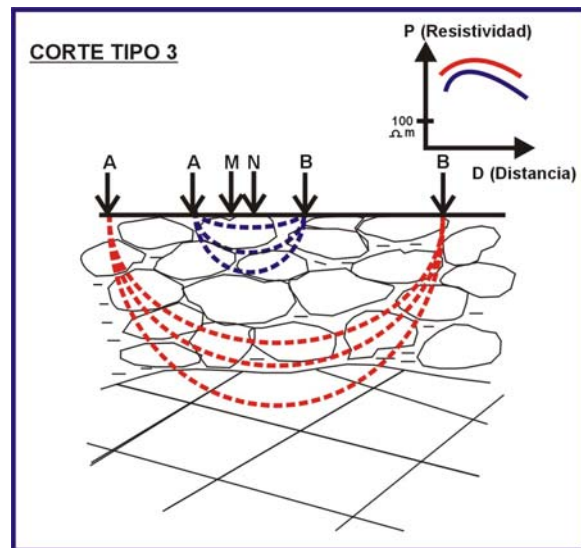


Corte Tipo 2: capa de arcillas o sedimentos arcillosos, en espesores mayores de 2 m.

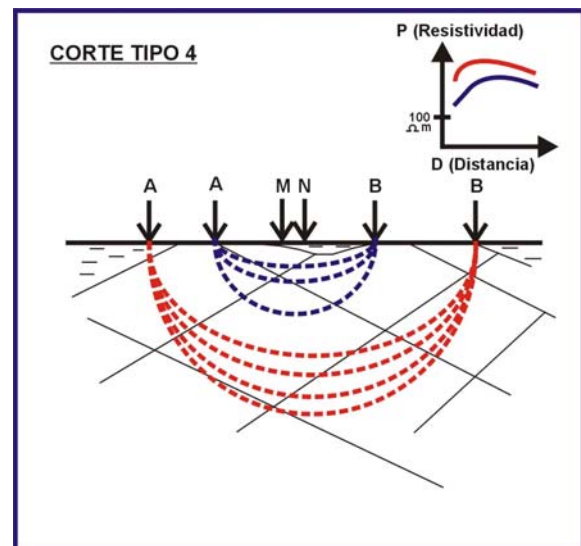
→



Corte Tipo 3: capa superficial de piedras y bolos calizos (tamaño grava o mayor), descansando sobre un sustrato de roca caliza.



Corte Tipo 4: roca caliza aflorante en superficie.



Corte Tipo 5: capa superficial de piedras descansando sobre un sustrato arcilloso.

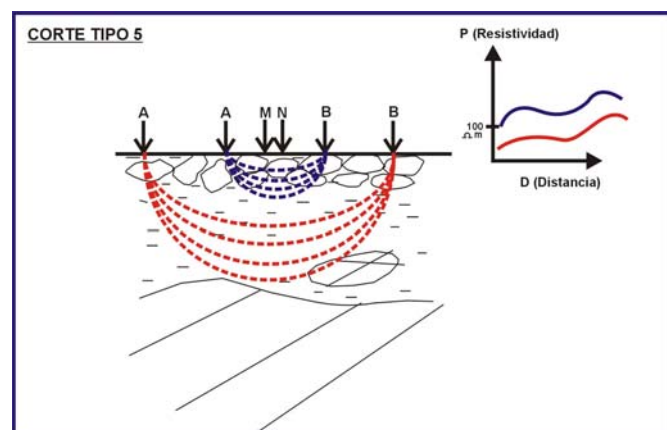


FIGURA 31: Cortes geoeléctricos tipo en Castro de Llagu

De acuerdo al modelo interpretativo establecido, el ***Perfil Geoelectrico N°1*** se tramifica del siguiente modo:

- **Sección S-1:** Se extiende desde el origen del perfil, hasta los 20 m (de 0 a 20 m). La resistividad superficial es algo menor que la profunda, con valores situados en el entorno de 75 a 200 Ω .m, que corresponde a valores propios de sedimentos arcillosos. Se trataría de un corte geoelectrico de los que se ha denominado de Tipo 1, que correspondería a espesores de sedimentos de entre 0.1 y 0.4 m. Según esto, y de acuerdo a la estructura del castro, podría tratarse de sedimentos exteriores al mismo.
- **Sección S-2B:** Esta sección abarca desde los 20 m hasta los 65 m. Corresponde a valores elevados de la resistividad, que oscila de manera general entre 200 y 800 Ω .m, es decir, valores correspondientes a materiales pétreos de naturaleza caliza. La resistividad profunda es algo mayor que la superficial, por lo que el corte puede interpretarse como de Tipo 3. De acuerdo al modelo estructural del castro, se trataría de la muralla que rodea al mismo, de modo que se interceptaría su lienzo exterior en el punto a 20 m del origen y el lienzo interior a 65 m.
- **Sección S-1C:** Este tramo se sitúa entre los 65 y 80 m. Se trata de una zona donde la resistividad oscila entre 175 y 350 Ω .m. Estos valores se sitúan en el máximo de lo que suelen presentar las arcillas y en el mínimo de lo que habitualmente muestra la caliza, por lo que puede interpretarse como una zona de sedimentos arcillosos con una importante fracción de cascotes y bolos calizos. Esta zona puede considerarse que presenta un corte geoelectrico de los que se han denominado de Tipo 1. Se interpretaría como sedimentos de interior del castro, en una zona adosada al interior de la muralla.
- **Sección S-1D:** Este tramo se ubica entre los 80 y 85 m. Se trata de una zona con resistividades similares a la sección S-1B, lo que lleva a pensar que se trata de un fragmento de muralla. Según esta interpretación, y de acuerdo a la estructura del castro observada sobre el terreno, el perfil geoelectrico volvería a penetrar en la muralla por su lienzo interno en el punto a 80 m del origen, recorrería unos 5 m por

el interior de la misma, y volvería al interior del castro, cortando de nuevo el lienzo interior de la muralla a los 85 m.

- **Sección S-1E:** Este tramo se extiende entre los 85 y 92 m. Las resistividades son similares a las de la sección S-1C, por lo que al igual que ésta, se interpreta como sedimentos en el interior del castro.
- **Sección S-1F:** Tramo situado entre 92 y 97 m. Valores altos de la resistividad, entre 300 y 600 Ω .m. Se trata de un crestón de roca caliza que es perfectamente visible sobre el terreno, correspondiendo a un corte geoelectrico de Tipo 4.
- **Sección S-1G:** Zona situada de 97 a 115 m. Su respuesta geoelectrica es similar a la presentada por los sedimentos de interior del castro en las secciones S-1C y S-1E, por lo que se interpreta de la misma manera.
- **Sección S-1H:** Se trata de un importante crestón calizo, observable perfectamente a simple en el camino donde se realizó el perfil geoelectrico. Se ubica entre los 115 y 155 m. Presenta valores altos de la resistividad, que puntualmente llegan a superar incluso los 1000 Ω .m. Se trata de un corte geoelectrico de los que se han denominado Tipo 4.
- **Sección S-1I:** Esta zona, situada más allá de los 155 m, se caracteriza por presenta valores muy bajos de la resistividad, que llegan a descender por debajo de los 100 Ω .m, tanto a nivel profundo como superficial. Esta zona corresponde a un corte geoelectrico Tipo 2, y reflejaría la presencia de considerables espesores de sedimentos arcillosos (mayores de 2 m), en una zona que estaría ubicada en el interior del castro.

De igual manera, el ***Perfil Geoelectrico N° 2*** se interpreta y tramifica del siguiente modo:

- **Sección S-2:** Este tramo se extiende desde el origen del perfil hasta los 32 m del mismo. Su característica más notable es que la resistividad superficial (con valores entre 200 y 300 Ω .m) es mayor que la profunda (valores entre 100 y 200 Ω .m). La única interpretación posible para ello es suponer un empedrado de bolos calizos,

asentados sobre un sustrato arcilloso, tal como se muestra en el corte geoeléctrico Tipo 5.

- **Sección S-2B:** Ubicada entre los 32 y los 41 m. Corresponde a una zona en el que el camino donde se realiza el perfil rompe pendiente en sentido descendente. Muestra una resistividad superficial muy elevada (en el entorno de 700 $\Omega\cdot\text{m}$), propia de materiales pétreos compactos, y una resistividad profunda baja (aproximadamente 100 $\Omega\cdot\text{m}$) que denota la existencia de un sustrato arcilloso. Podría interpretarse como una zona de acumulación de cascotes calizos, descansando sobre sedimentos arcillosos. Por su ubicación, esta zona estaría localizada probablemente en una zona de acceso al castro.
- **Sección S-2C:** Localizada entre los puntos situados a 41 y 68 m del origen. Se trata de un amplio crestón calizo aflorante y visible a simple vista sobre el camino. Su respuesta geoeléctrica es similar a la de la sección S-1F del Perfil N°1, con resistividades que en algunos puntos superen los 1000 $\Omega\cdot\text{m}$. Se trataría de un corte geoeléctrico Tipo 4.
- **Sección S-2D:** Corresponde a una zona donde las resistividades muestran una tendencia de brusco descenso. Se sitúa más allá de los 68 m. El descenso de las resistividades, con valores que descienden por debajo de 200 $\Omega\cdot\text{m}$, puede interpretarse como el inicio de una zona de foso colmatado por sedimentos arcillosos, que explicarían la tendencia bajista de las resistividades.

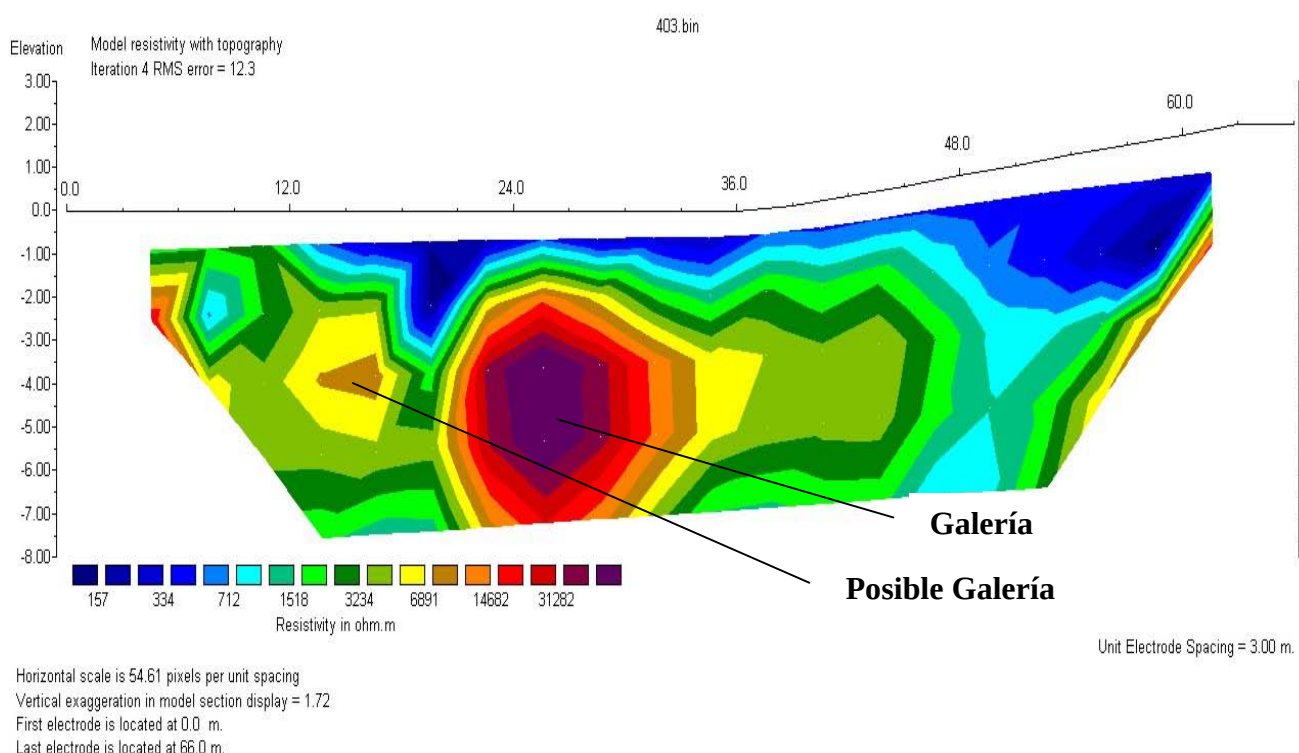
5.5.2 MINADOS ROMANOS DE LAPIS SPECULARIS

A lo largo del futuro trazado de la Línea de Alta Velocidad Madrid-Cuenca-Valencia, se interceptan materiales yesíferos terciarios, que en época romana fueron objeto de explotación minera subterránea para la extracción del “Lapis Specularis”, yeso especular de gran transparencia, que era empleado para la realización de cerramientos de ventanas.

Los minados más frecuentes son galerías, que generalmente se encuentran muy someras (de 2 a 20 m de profundidad). Las galerías suelen tener diámetros entre 1 y 3 m, encontrándose

generalmente vacías, o rellenas de escombros procedentes de desplomes y hundimientos. Están excavadas en yeso compacto microcristalino, que localmente presenta algún fenómeno cárstico.

Las galerías mineras discurren, en algunos tramos, bajo el trazado de la línea ferroviaria. Para su detección se aplicó la tomografía eléctrica. El dispositivo empleado fue del tipo dipolo-dipolo, con separación entre electrodos cada 3 m, para conseguir la máxima resolución posible. En la figura que se incluye a continuación se muestra una de las galerías detectadas.



**FIGURA 32: Detección de minados romanos subterráneos en el Cerro de La Mudarra
(Cortesía de RUDNIK)**

La galería se muestra en el perfil como un círculo de altísima resistividad (superior a los 15.000 Ω .m). Se encuentra rodeada por una roca yesífera compacta de resistividades comprendidas entre 1.000 y 5.000 Ω .m. En superficie se registran resistividades comprendidas entre 150 y 500 Ω .m, que corresponden a la capa superficial de suelos yesíferos.

6. BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA SOBRE APLICACIONES GEOTÉCNICAS

- **Geophysical Characterization of Sites.** Richard Woods Editor. ISSMFE. Ed. Balkema (1994).
- **Geophysique de Gisement et de Génie Civil.** J.L. Mari, G. Arens, D. Chapellier, P.Gaudiani. Éditions Technip (1998).
- **Use of Geophysical Methods in Construction.** Soheil Nazarian and John Diehl Editors. ASCE (2000).
- **Geophysics for Slope Stability.** Robert Hack. Survey in Geophysics. Kluwer Academic Publishers (2001).
- **Temas de Geología Aplicada a las Obras Públicas.** Ángel García Yagüe. Editorial Col. ICCiP (2003).
- **Using the Depth of Investigation Index Method in 2D Resistivity Imaging for Civil Engineering Surveys.** L. Marescot, M.H Loke. SAGEEP 2003. Denver, USA.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- **Environmental and Engineering Geophysics.** Prem V. Sharma. Cambridge University Press (1997).
- **Developments in Geoelectrical Methods.** Ankaraboyina Apparao. Ed. Balkema (1997).
- **Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua.** Ernesto Orellana. Editorial Paraninfo (1982).
- **Exploración Sísmológica.** R.E. Sheriff, L.P. Geldart. Editorial Noriega Limusa (1991).
- **Exploración Eléctrica.** IU. V. Iakubovskii, L.L. Liajov. Editorial Reverté (1980).

- **Looking into the Earth. An Introduction to Geological Geophysics.** Alan E. Mussett, M. Aftab Khan. Cambridge University Press (2000).
- **Bidimensional and Tridimensional Electrical Imaging Surveys.** M.H. Loke. Editado por el propio autor (2004).
- **A Modified Pseudosection for Resistivity and Induced Polarization.** L.S Edwards. Geophysics (1977).
- **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.** J.M. Reynolds. Ed. Wiley (1997).

TÚNELES Y GEOMECÁNICA S.L

C/. ALFONSO GÓMEZ Nº 17, TERCERA PLANTA, LOCAL 11

28037 MADRID

www.tunelesygeomecanica.es

