



**Medidas sísmicas *cross-hole*
en la Central Térmica de Sines (Portugal)**

Mayo 2.006

INDICE

1.	Presentación	1
1.1.	Equipo técnico del estudio	1
1.2.	Instrumentación empleada	2
2.	El método de las medidas sísmicas <i>cross-hole</i>	4
3.	Descripción del trabajo realizado	8
3.1.	Medidas de campo	8
3.2.	Procesado de los registros	10
4.	Resultados del estudio	13

FIGURAS

1. Esquema operativo de las medidas del ensayo sísmico *cross-hole*.
2. Esquema con la información geológica de los sondeos estudiados.
3. Registros característicos de los sondeos 23A - 23B.
4. Registros característicos de los sondeos 25A - 25B.

ANEXOS

1. Gráficos con los valores de V_p , V_s , Coeficiente de *Poisson* y módulos dinámicos E , G y K que resumen los resultados del estudio.
2. Tablas con los resultados del estudio en forma numérica.

1. PRESENTACIÓN

Este informe describe el estudio del terreno realizado mediante el método geofísico de las medidas **sísmicas *cross-hole*** en cuatro parejas de sondeos perforados específicamente para este fin en la **Central Térmica de Sines (Portugal)**.

Las medidas sísmicas *cross-hole* tienen por objeto la caracterización geotécnica del macizo rocoso determinando los valores de sus módulos dinámicos E , G y K así como los del Coeficiente de *Poisson* a partir de los valores de la velocidad de transmisión de las ondas de compresión (V_p) y de cizalla (V_s) a través del mismo. Los valores de V_p y V_s son los parámetros obtenidos directamente de las medidas sísmicas *cross-hole* y dependen básicamente del grado de compacidad e integridad del terreno.

Este estudio ha sido realizado por **International Geophysical Technology, S.L. (IGT)** en calidad de empresa colaboradora de **COBRA** en este proyecto. Damos cuenta seguidamente del trabajo realizado y de los resultados obtenidos, con una breve explicación del método de las medidas sísmicas *cross-hole*.

1.1. *Equipo técnico del estudio*

En la ejecución de este estudio ha participado el personal técnico de la plantilla de **IGT** que a continuación se relaciona, con indicación de la función realizada por cada uno de ellos.

- < Teresa Granda París. Ingeniero de Minas. Procesado de los registros y redacción del informe.
- < Antonio Álvaro Granda. Técnico Geofísico. Ejecución de las medidas.
- < Bozhidar Estefanov Aleksandrov. Ayudante. Trabajos de campo.

1.2. Instrumentación empleada

Para la ejecución de estos estudios **IGT** ha empleado un sistema muy avanzado y preciso para medidas sísmicas entre sondeos, fabricado por **Geotomographie** y compuesto por los siguientes elementos:

- < Generador de impulsos modelo SWG-505.
- < Unidad de Control Remoto modelo FBG.
- < *Sparker* modelo SBS-36 diseñado para generar específicamente ondas de cizalla pudiendo variar a voluntad el sentido del impacto.
- < Geófono multicomponente modelo BGK-7 que incluye un geófono vertical y seis geófonos horizontales con un rango de medida desde 30 hasta 3.000 Hz montadas en pares con polaridad opuesta y desfase de 30° entre sensores. Incluye un sistema neumático de anclaje y medida de la orientación.



Las especificaciones técnicas de estos equipos pueden verse en la página web del fabricante www.geotomographie.com

Para el registro de las ondas sísmicas se ha utilizado un sismógrafo digital modelo **StrataView R-24** con 24 canales fabricado por **Geometrics Inc.** Este

sismógrafo tiene una alta capacidad de muestreo y todas las características adecuadas para la ejecución de estudios sísmicos *cross-hole*.



2. EL MÉTODO DE LAS MEDIDAS SÍSMICAS *CROSS-HOLE*

La técnica clásica de medidas sísmicas *cross-hole* consiste en su versión más sencilla, en provocar una señal sísmica en un sondeo y en registrarla mediante el adecuado receptor localizado en otro sondeo próximo de modo que el punto donde se produce la señal y el receptor se encuentren a la misma cota (Ver **Figura 1**). El proceso se repite desplazando ambos a pequeños intervalos a lo largo de los sondeos hasta recorrerlos en su totalidad. Son aspectos esenciales de este método los siguientes:

- Se asume que la transmisión de la señal sísmica desde el emisor situado en el primer sondeo, hasta el receptor localizado en el segundo sondeo es directa, sin sufrir refracciones o reflexiones.
- La señal sísmica debe generar ondas P y onda S con la particularidad de que estas últimas puedan controlarse cambiando su polaridad a voluntad del operador, para facilitar la identificación de sus primeras llegadas en los sismógrafos.
- La correcta identificación de las primeras llegadas de las ondas S al sensor localizado en el segundo sondeo exige hacer al menos dos registros independientes para cada posición, con diferente polaridad de las ondas S.

Conocida la posición exacta del punto donde se genera la señal y la del receptor con el que se registra ésta, el procesamiento de los datos incluye los siguientes pasos:

- a) Identificación de las primeras llegadas de las ondas P y S en los registros y determinación del tiempo invertido por cada una de estas ondas en recorrer el camino punto de señal-sensor.
- b) Cálculo de V_p y de V_s como cocientes entre la distancia recorrida por las ondas P y S, que es la existente entre emisor y receptor, y los tiempos determinados en el apartado anterior.
- c) El paso final en este tipo de estudio es el cálculo de los módulos dinámicos y

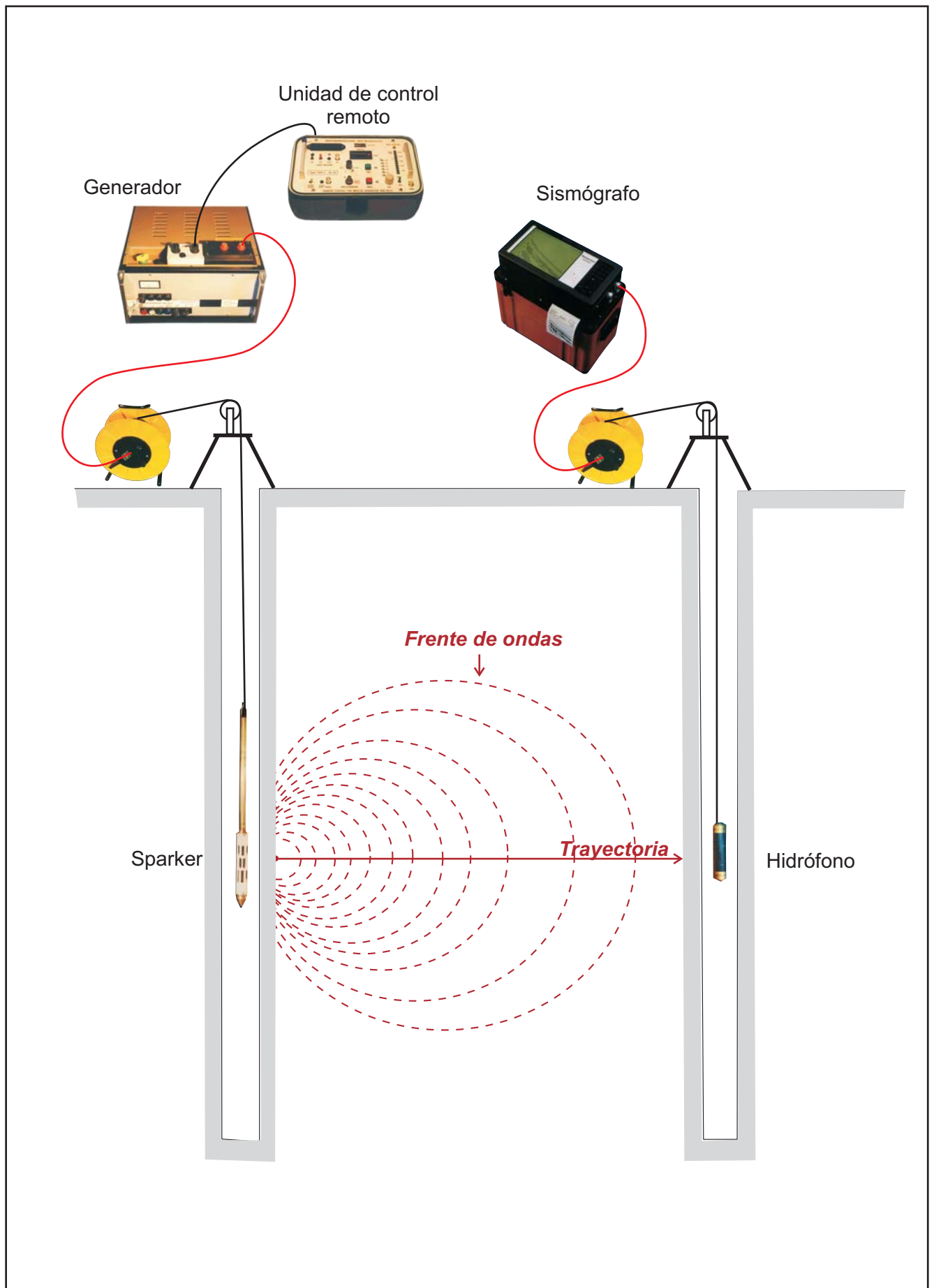


Figura 1.- Esquema operativo de las medidas del ensayo sísmico *cross-hole*.

el coeficiente de *Poisson* del macizo rocoso mediante las expresiones:

$$\text{Coeficiente de Poisson, } h = [(V_p/V_s)^2 - 2] / [2(V_p/V_s)^2 - 2]$$

$$\text{Módulo de rigidez, } G = dV_s^2 ; d \text{ es la densidad}$$

$$\text{Módulo de Young, } E = 2G(1+h)$$

$$\text{Módulo volumétrico, } K = E / [3(1-2h)]$$

La correcta ejecución de este tipo de estudios requiere, en primer lugar, la generación efectiva de ondas P y ondas S en un punto de uno de los sondeos y en segundo término, el registro preciso de unas y otras en otro punto situado a la misma cota en el segundo sondeo, de modo que en los sismogramas puedan identificarse de forma fiable las primeras llegadas de los dos tipos de ondas.

En general no es difícil identificar la primera llegada de las ondas P por ser el primer evento relevante en los sismogramas. Por el contrario es muy complicada la identificación de las ondas S porque normalmente aparecen superpuestas y mezcladas con el tren de ondas P y con otras ondas sísmicas.

Sin embargo, las ondas de cizalla tienen la característica de ser polarizadas, es decir, que el sentido de su rotura en los sismogramas depende del sentido del impacto que las genera. En consecuencia una primera precaución para su estudio es obtener en cada punto al menos dos registros independientes correspondientes a impactos de sentidos contrarios.

Respecto a su registro más efectivo, que es el correspondiente a la mayor amplitud de la señal, hay que tener en cuenta que éste se produce cuando los sensores tienen el máximo acoplamiento con el plano de polarización de la onda S y que la orientación de ésta es variable y desconocida en principio. Por ello el empleo de geófonos convencionales con un sensor vertical y dos sensores horizontales, ortogonales entre sí puede ser insuficiente. El procedimiento más eficaz es emplear un sistema multicomponente con al menos tres pares de sensores horizontales montados diametralmente en sentidos contrarios los de cada par y con desfase de 60° entre los pares contiguos.

El procedimiento combinado de generar las señales sísmicas mediante un *sparker* reversible capaz de producir impactos orientados en sentidos contrarios y registrar con un sistema multicomponente del tipo mencionado ofrece todas las herramientas posibles para la mejor identificación de las primeras llegadas de las

ondas de cizalla.

Pese a ello, no es un problema sencillo porque el desarrollo y transmisión de estas señales está condicionado por las características geotécnicas del terreno, por su saturación, etc., de modo que no siempre se puede garantizar que se llegue a determinar fiablemente los valores de V_p del terreno a partir de las medidas sísmicas *cross-hole*.

Referencia: ***“Handbook of Engineering Geophysics. Volume 1: Seismic”. Harold M. Mooney. 1984.***

3. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

3.1. *Medidas de campo*

Las medidas sísmicas de este estudio se efectuaron en las cuatro parejas de sondeos denominados **23A/23B**, **24A/24B**, **25A/25B** y **26A/26B**. Todos los sondeos habían sido perforados hasta 11 metros de profundidad y entubados con tubería de PVC.

No disponemos de ningún plano de localización de los sondeos que les fueron señalados a nuestro equipo sobre el terreno por los técnicos de **COBRA**. Según la descripción geológica que nos ha sido facilitada, los sondeos atravesaron 3 m de rellenos excepto el sondeo 24B que atravesó 8 metros y a partir de esa profundidad entraron en esquistos alterados. En la **Figura 2** incluimos esquemas simplificados de cada pareja de sondeos, con indicación de la distancia existente entre ellos.

Según lo establecido por **COBRA**, las medidas sísmicas se hicieron a **intervalos de 1 metro** en todos los sondeos. En cada posición del *sparker* que genera las señales sísmicas en uno de los sondeos y del sensor multicomponente situado en el otro sondeo de cada pareja, se hicieron dos registros independientes correspondientes a dos disparos orientando el *sparker* en sentidos contrarios, es decir, desfasados 180° entre sí.

De este modo se trata de conseguir un doble control del cambio de polaridad de las ondas S: Por una parte en función de la orientación de los pares de sensores acoplados diametralmente en sentidos contrarios y por otra parte en función del sentido del impacto generador de la señal sísmica. Esta forma de operación es necesaria y de fundamental importancia para la correcta identificación de las primeras llegadas de las ondas de cizalla.

Las medidas se hicieron sin ninguna incidencia digna de mención excepto las siguientes:

- En los **sondeos 26A/26B** sólo pudo medirse a partir de 5 metros de profundidad porque hasta esa cota los sondeos estaban secos.

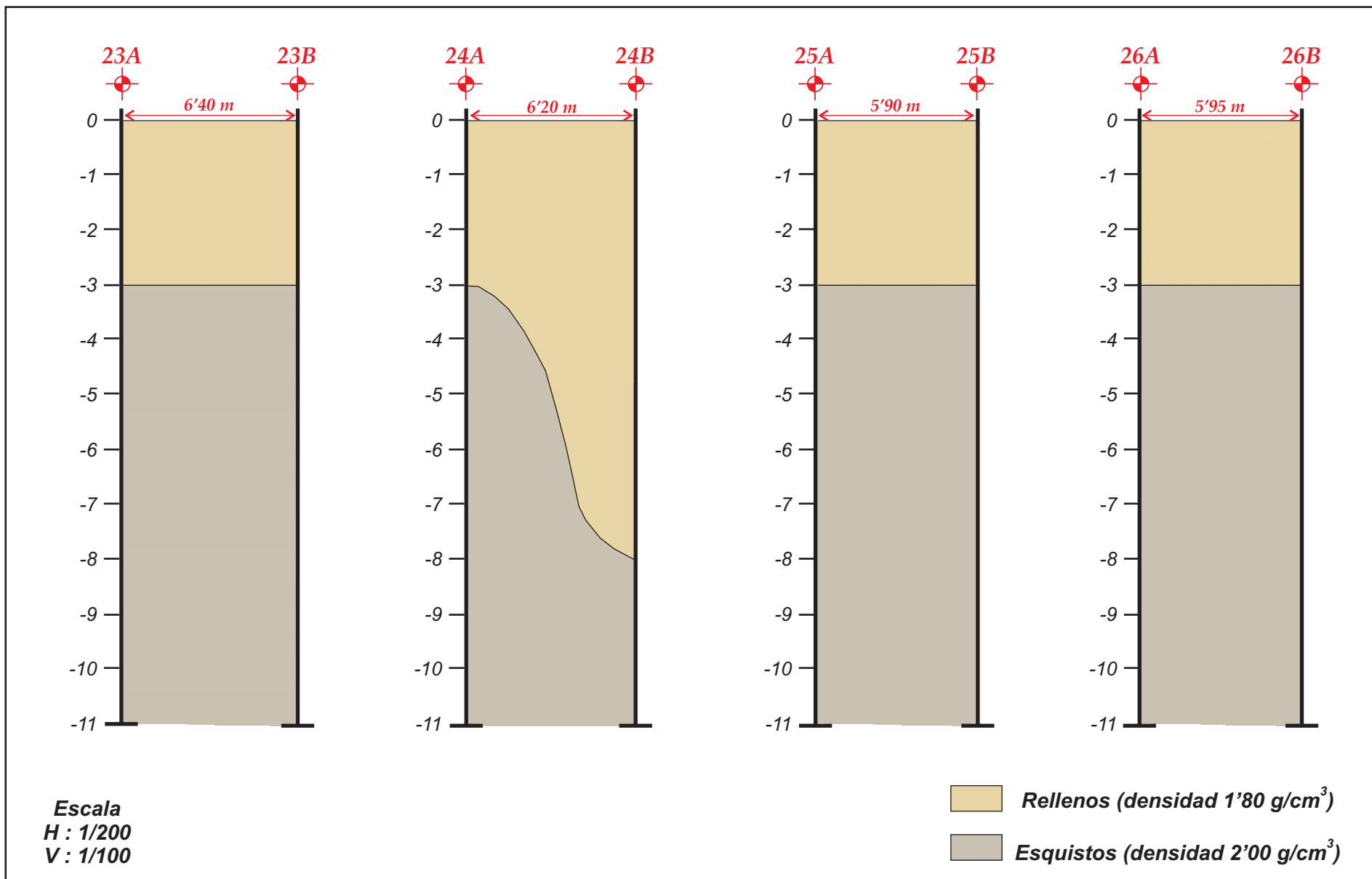


Figura 2.- Esquema con la información geológica de los sondeos estudiados.

- En los **sondeos 24A/24B** no pudo medirse por debajo de 7 metros porque la tubería del sondeo 24B estaba rota a esa cota. De hecho, la tubería dañó el sistema neumático del anclaje del sensor.

Los registros obtenidos en este estudio no fueron de muy buena calidad pese a todas las precauciones tomadas. Ello se ha debido a la sequedad del terreno y tal vez a la existencia de huecos entre la pared de los sondeos y la tubería. Este hecho se ha traducido en un considerable trabajo de análisis de los registros sísmicos para poder identificar en ellos las primeras llegadas de las ondas P y S. Los ejemplos que presentamos en las **Figuras 3 y 4** son ilustrativos del tipo de registros obtenidos en este estudio.

3.2. Procesado de los registros

El tratamiento de los registros de un estudio sísmico *cross-hole* es sencillo en sus conceptos, ya que se limita a determinar los valores de V_p y V_s como cocientes entre la distancia emisor-receptor y el tiempo invertido por las primeras llegadas de las ondas P y S para recorrerla. Su dificultad se centra en la **correcta identificación de las primeras llegadas de las ondas S**, aunque con la metodología seguida durante la toma de datos en este caso el problema se simplifica notablemente.

A partir de los valores de V_p y V_s determinados independientemente para cada una de las series de medidas realizadas, se ha calculado el **Coefficiente de Poisson** y los **módulos dinámicos E, G y K** mediante las fórmulas detalladas en el apartado 2 considerando como valor de densidad del terreno igual a 1'80 g/cc para los rellenos y 2'20 g/cc para el sustrato rocoso formado por esquistos.

En los documentos del **Anexo 1** se incluyen todos los resultados de estas medidas y cálculos en forma de gráficos. Asimismo presentamos toda la información relevante obtenida en este estudio en forma de tablas en el **Anexo 2**.

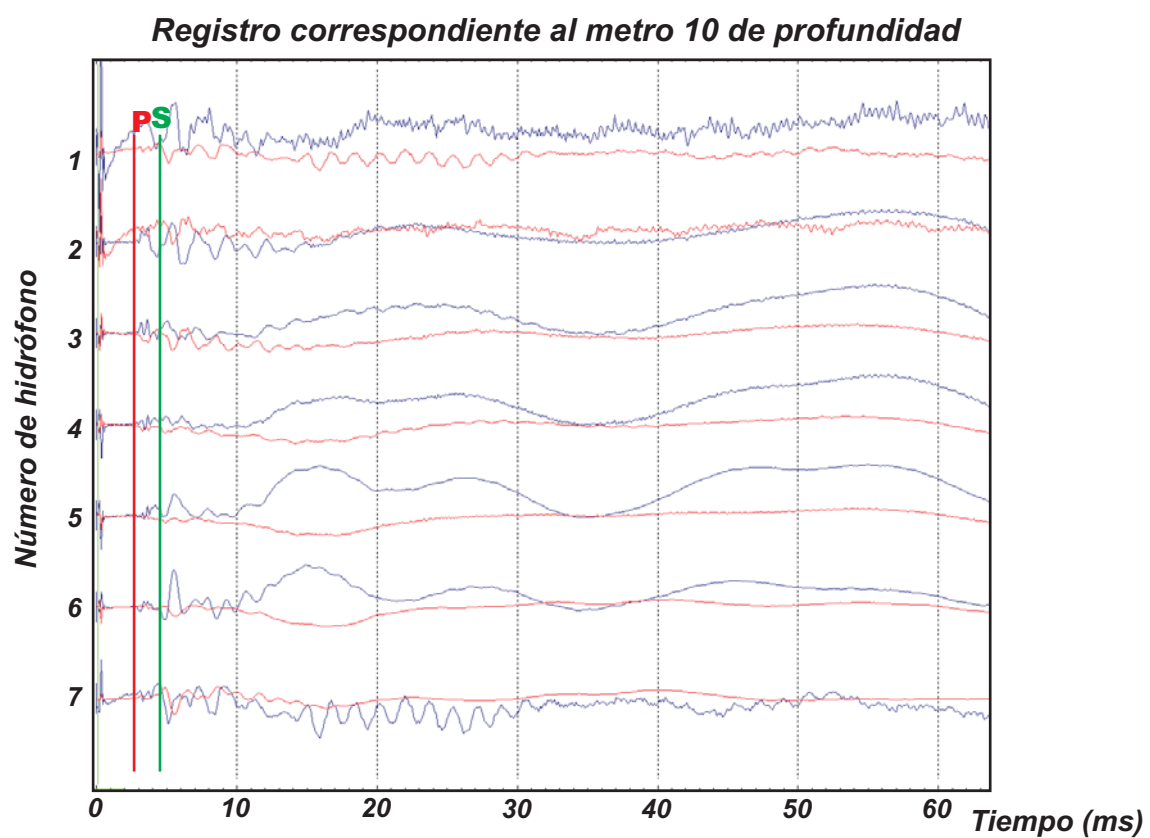
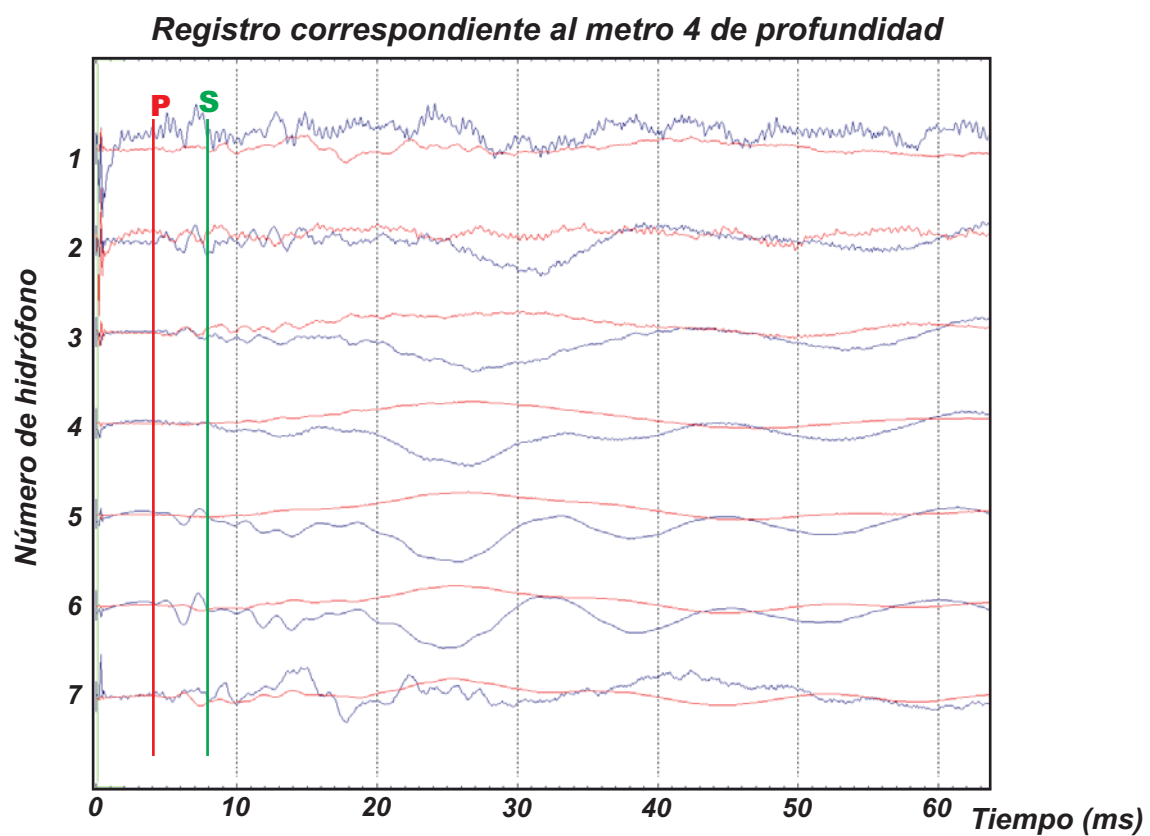
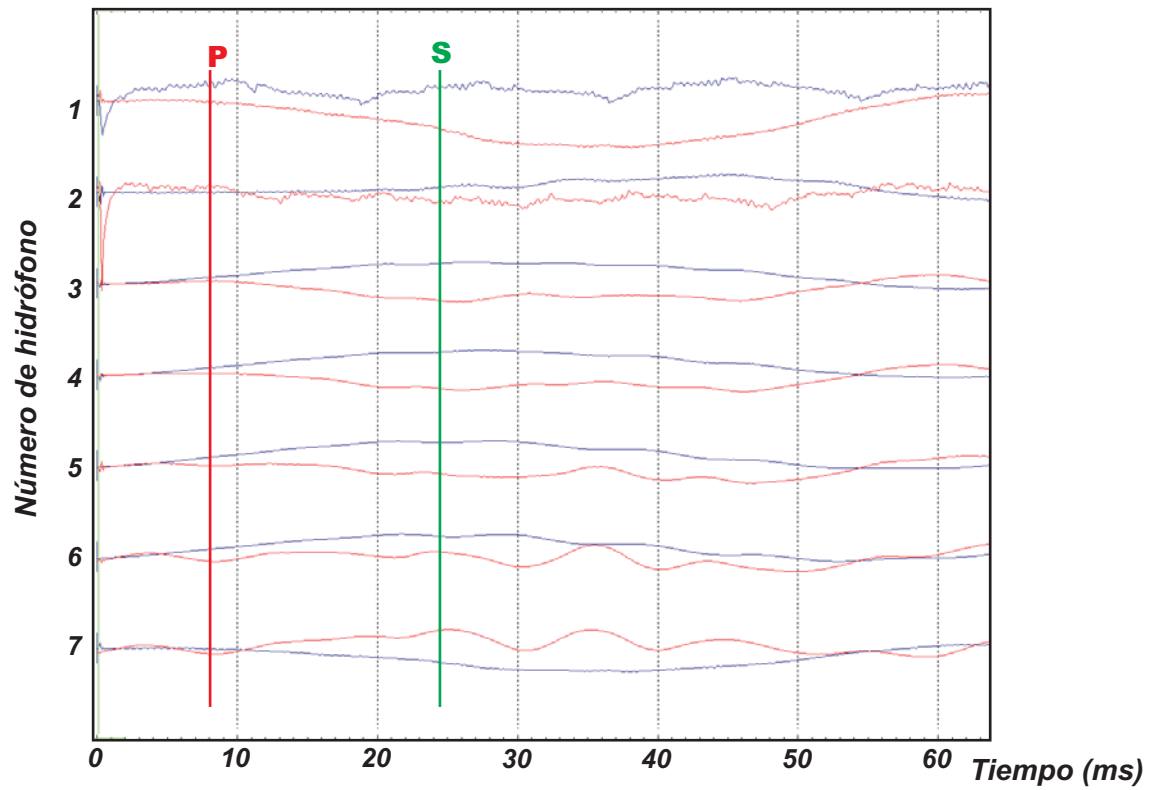


Figura 3.- Registros característicos de los sondeos 23A - 23B.

Registro correspondiente al metro 2 de profundidad



Registro correspondiente al metro 9 de profundidad

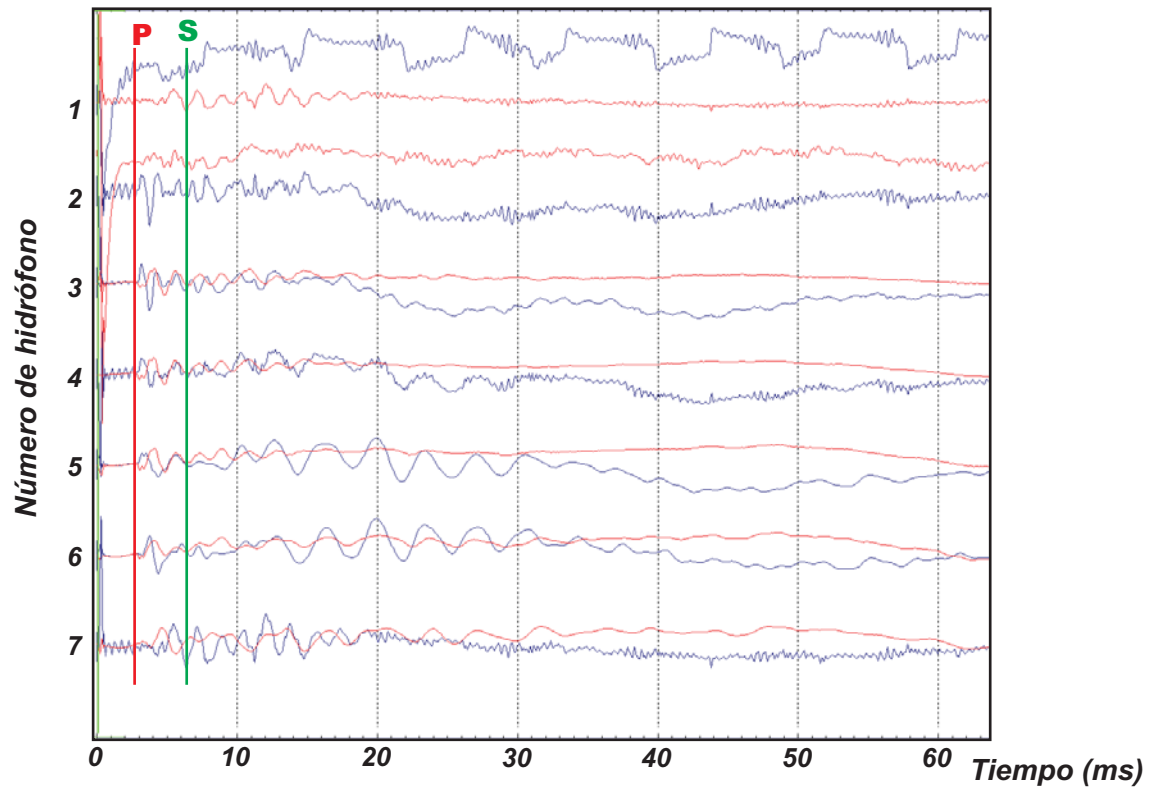


Figura 4.- Registros característicos de los sondeos 25A - 25B.

4. RESULTADOS DEL ESTUDIO

Los resultados de este tipo de reconocimientos geofísicos del terreno se presentan en forma de tablas y gráficos del tipo de los incluidos en el **Anexo**. Se trata de valores característicos de algunos parámetros de interés geotécnico que no requieren comentarios adicionales para su explicación o interpretación.

Aunque no es el objetivo de este estudio hacer una interpretación de los resultados geofísicos en términos geológicos o geotécnicos, hemos de destacar la buena correspondencia entre estos resultados y la información litológica de los sondeos. Los resultados de ambos sondeos ponen de manifiesto de forma evidente un fuerte cambio en los valores de los parámetros geotécnicos entre el relleno y el sustrato rocoso.

Puesto que los resultados obtenidos quedan perfectamente detallados en los documentos de los **Anexos 1 y 2**, no consideramos necesario extendernos aquí en comentarios de carácter descriptivo.

En conclusión, consideramos que el estudio ha cubierto sus objetivos al obtener la información requerida. Es de destacar que los **resultados** obtenidos son **fiables y representativos** pese a que los registros sísmicos a partir de los cuales han sido obtenidos, no sean de muy buena calidad. No obstante, en todos ellos se pueden identificar correctamente las primeras llegadas de las ondas P y S lo que constituye el aspecto de mayor importancia en este tipo de estudios.

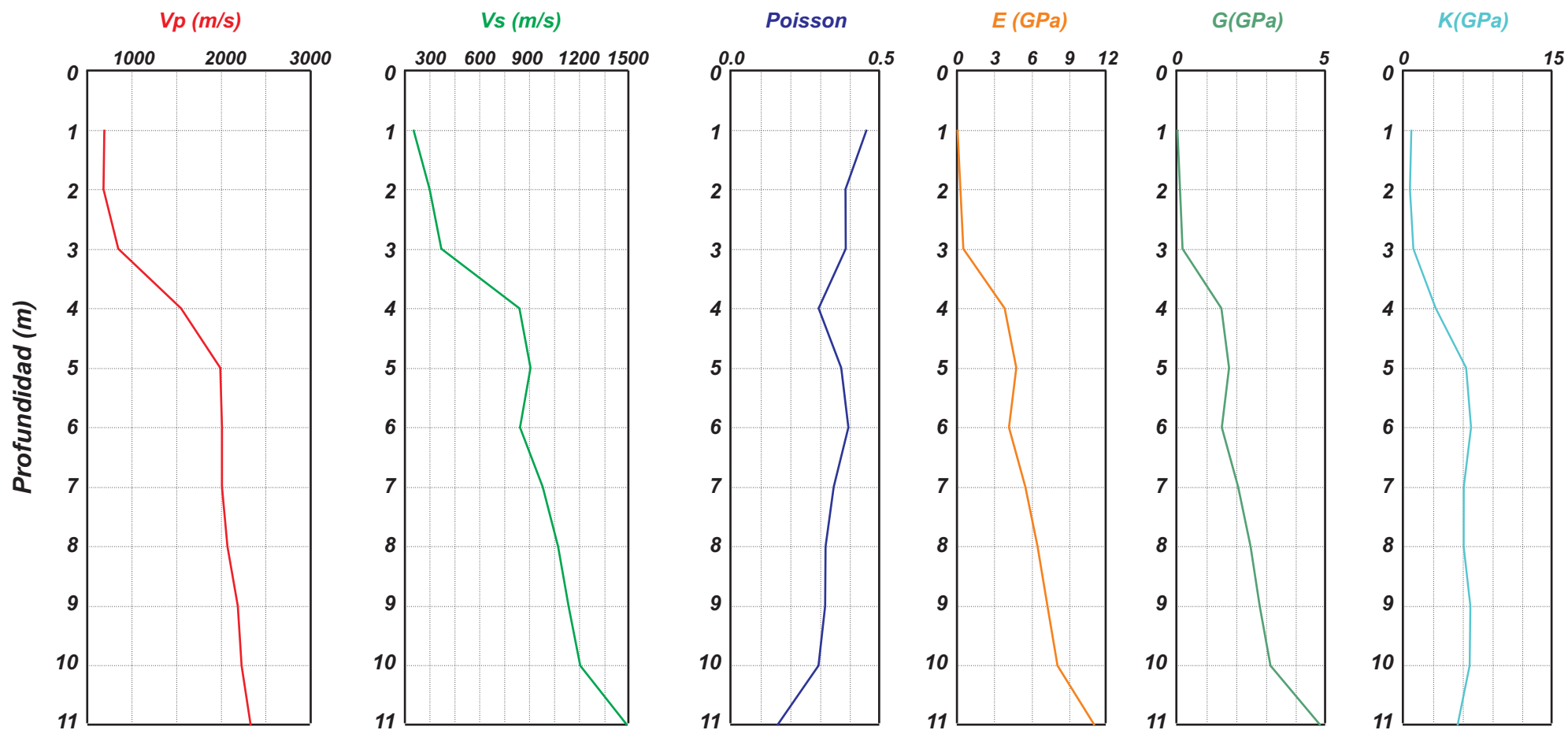
San Sebastián de los Reyes, Mayo 2.006
International Geophysical Technology, S.L.



Fdo.: Teresa Granda París
Ingeniero de Minas

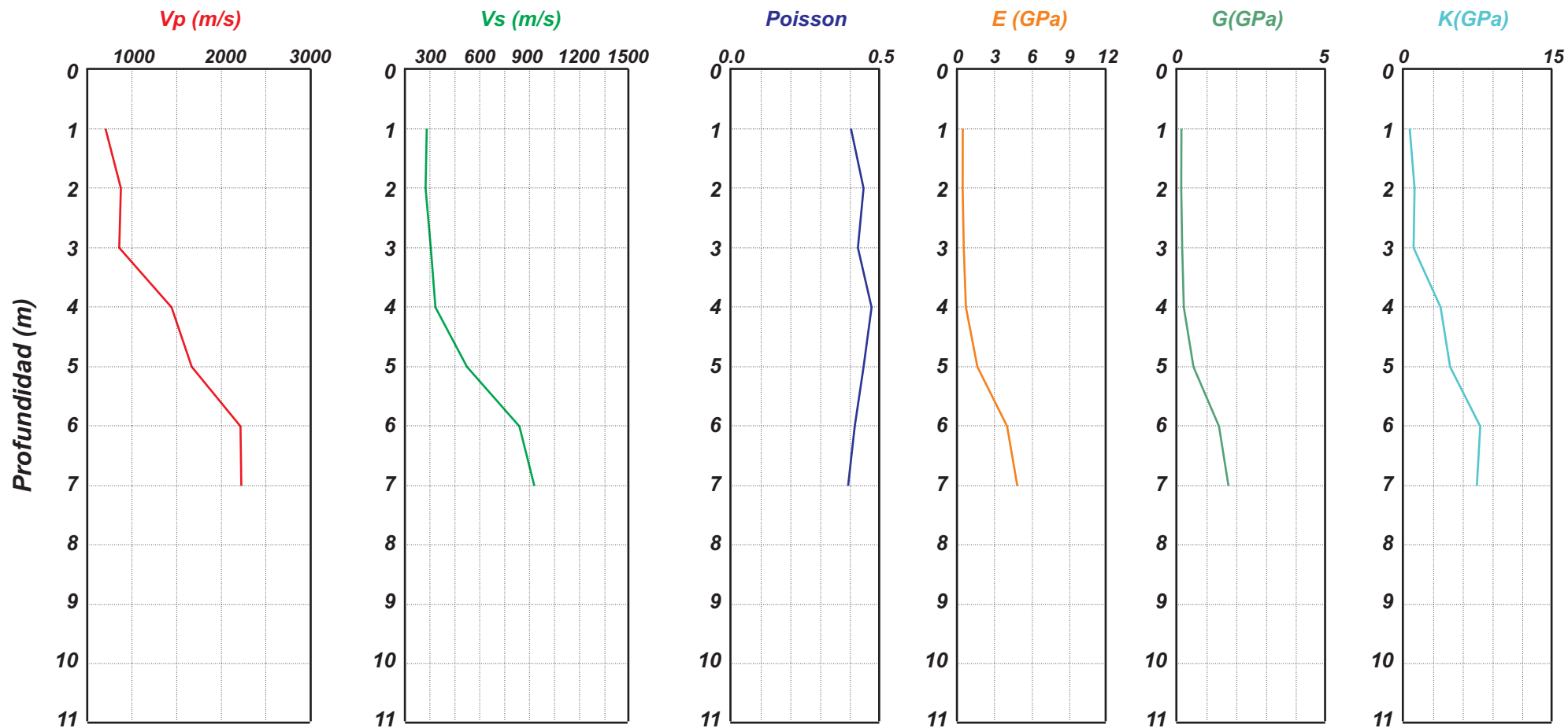
A N E X O 1

Gráficos con los valores de V_p , V_s , Coeficiente de *Poisson* y módulos dinámicos E, G y K que resumen los resultados del estudio



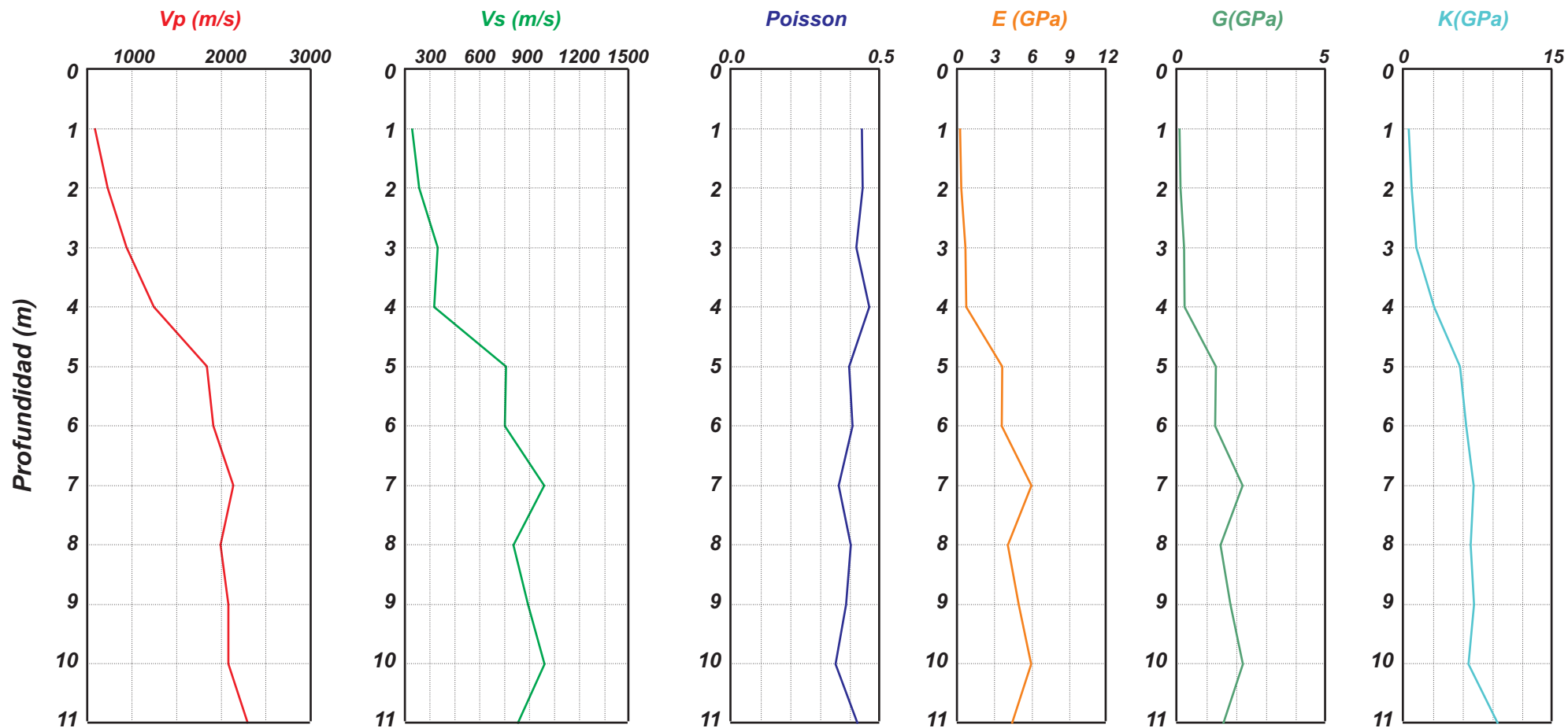
Resultados correspondientes a los sondeos 23A y 23B

Medidas sísmicas *cross-hole* en la Central Térmica de Sines (Portugal)



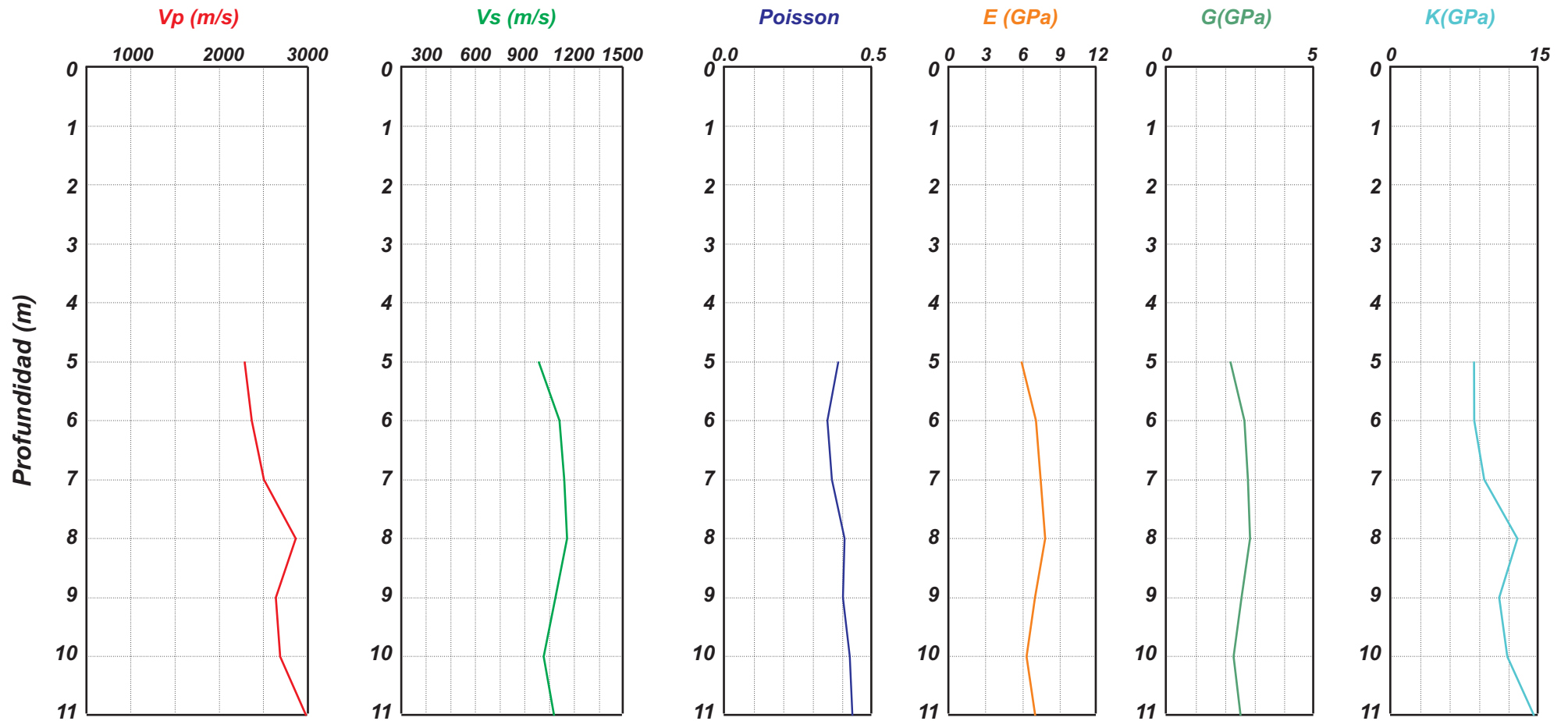
Resultados correspondientes a los sondeos 24A y 24B

Medidas sísmicas *cross-hole* en la Central Térmica de Sines (Portugal)



Resultados correspondientes a los sondeos 25A y 25B

Medidas sísmicas *cross-hole* en la Central Térmica de Sines (Portugal)



Resultados correspondientes a los sondeos 26A y 26B

A N E X O 2

Listado de valores con los resultados del estudio

Resultados correspondientes a las medidas entre los sondeos 23A y 23B

Profundidad (m)	tp (ms)	ts (ms)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (g/cm3)	Poisson	E (GPa)	G (GPa)	K (GPa)
1	9.187	31.75	696.6366	201.5748	1.8	0.454	0.21	0.07	0.78
2	9.3125	21.406	687.2483	298.9816	1.8	0.383	0.45	0.16	0.64
3	7.5123	17.321	851.9362	369.4937	1.8	0.384	0.68	0.25	0.98
4	4.125	7.625	1551.5152	839.3443	2.2	0.293	4.01	1.55	3.23
5	3.218	7.0625	1988.8129	906.1947	2.2	0.369	4.95	1.81	6.29
6	3.1875	7.5915	2007.8431	843.0481	2.2	0.393	4.36	1.56	6.78
7	3.1875	6.5315	2007.8431	979.8668	2.2	0.344	5.68	2.11	6.05
8	3.0935	5.969	2068.854	1072.2064	2.2	0.316	6.66	2.53	6.04
9	2.93	5.6377	2184.3003	1135.21	2.2	0.315	7.46	2.84	6.72
10	2.8745	5.309	2226.4742	1205.4785	2.2	0.293	8.27	3.2	6.64
11	2.7495	4.301	2327.6959	1488.026	2.2	0.154	11.25	4.87	5.42

Resultados correspondientes a las medidas entre los sondeos 25A y 25B

Profundidad (m)	tp (ms)	ts (ms)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (g/cm3)	Poisson	E (GPa)	G (GPa)	K (GPa)
1	9.187	31.75	696.6366	201.5748	1.8	0.454	0.21	0.07	0.78
2	9.3125	21.406	687.2483	298.9816	1.8	0.383	0.45	0.16	0.64
3	7.5123	17.321	851.9362	369.4937	1.8	0.384	0.68	0.25	0.98
4	4.125	7.625	1551.5152	839.3443	2.2	0.293	4.01	1.55	3.23
5	3.218	7.0625	1988.8129	906.1947	2.2	0.369	4.95	1.81	6.29
6	3.1875	7.5915	2007.8431	843.0481	2.2	0.393	4.36	1.56	6.78
7	3.1875	6.5315	2007.8431	979.8668	2.2	0.344	5.68	2.11	6.05
8	3.0935	5.969	2068.854	1072.2064	2.2	0.316	6.66	2.53	6.04
9	2.93	5.6377	2184.3003	1135.21	2.2	0.315	7.46	2.84	6.72
10	2.8745	5.309	2226.4742	1205.4785	2.2	0.293	8.27	3.2	6.64
11	2.7495	4.301	2327.6959	1488.026	2.2	0.154	11.25	4.87	5.42

Resultados correspondientes a las medidas entre los sondeos 24A y 24B

Profundidad (m)	tp (ms)	ts (ms)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (g/cm3)	Poisson	E (GPa)	G (GPa)	K (GPa)
1	8.9685	22.1875	691.3085	279.4366	1.8	0.402	0.39	0.14	0.67
2	7.188	22.75	862.5487	272.5275	1.8	0.445	0.39	0.13	1.16
3	7.344	20.406	844.2266	303.8322	1.8	0.426	0.47	0.17	1.06
4	4.344	18.687	1427.256	331.7815	2	0.471	0.65	0.22	3.78
5	3.7522	11.8853	1652.3687	521.6525	2	0.445	1.57	0.54	4.73
6	2.8237	7.4065	2195.687	837.1025	2	0.415	3.97	1.4	7.77
7	2.812	6.688	2204.8364	927.0335	2	0.393	4.79	1.72	7.43

Resultados correspondientes a las medidas entre los sondeos 26A y 26B

Profundidad (m)	tp (ms)	ts (ms)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (g/cm3)	Poisson	E (GPa)	G (GPa)	K (GPa)
1	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
2	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
3	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
4	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
5	3.3327	7.6034	1785.3225	782.5445	2.2	0.381	3.72	1.35	5.22
6	3.1875	6.5358	1866.6667	910.3668	2.2	0.344	4.9	1.82	5.23
7	2.9685	6.333	2004.3793	939.5231	2.2	0.359	5.28	1.94	6.25
8	2.5156	6.219	2365.2143	956.7455	2.2	0.402	5.65	2.01	9.62
9	2.781	6.719	2139.5182	885.5484	2.2	0.397	4.82	1.73	7.77
10	2.7185	7.3125	2188.707	813.6752	2.2	0.42	4.14	1.46	8.6
11	2.3956	6.7815	2483.7202	877.387	2.2	0.429	4.84	1.69	11.31