



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

INFORME ITGE

G 5 - 004.98

TÍTULO: INFORME SOBRE EL ENSAYO DEL EQUIPO
NUMIS (RMN) REALIZADO EN ARCOS DE
LA FRONTERA EN MAYO DE 1998

Revisión: 1ª

Autores: Juan Luis Plata Torres
Félix Manuel Rubio Sánchez-Aguililla
Fecha: Madrid, Julio 1998

40472



Secretaría de Estado de Aguas y Costas
Ministerio de Medio Ambiente

INDICE

	Pag.
0. RESUMEN	1
1. ANTECEDENTES	3
2. FUNDAMENTO DEL METODO RMN	4
3. SITUACION Y CONDICIONES DEL ENSAYO	7
4. DESCRIPCION DEL ENSAYO	8
4.1 PROCEDIMIENTO DE MEDICION	8
4.2 TRABAJOS EFECTUADOS	9
5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE CAMPO	12
5.1 SONDEO I-1	12
5.2 SONDEO D-4	15
5.3 SONDEO 14	16
5.4 PUNTO D-0	17
6. INTERPRETACION	18
6.1 ELEMENTOS PARA LA INTERPRETACION	18
6.2 SONDEO I-1	20
6.3 SONDEO D-4	22
6.4 SONDEO 14	23
6.5 PUNTO D-0	24
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	25

ANEXOS

	Pag.
I- Diario de los ensayos	29
II- Ficheros de datos de campo	37
III- Some recent publications on the proton magnetic resonance method applied to groundwater investigations (recopilación efectuada por IRIS).	
IV- PMR sounding with NUMIS equipment. Operating procedure.	
V- Surface PMR system for water prospecting. Operating manual.	
VI- Disquetes con ficheros de campo.	

Nota: Los Anexos III, IV, V sólo acompañan a los ejemplares depositados en el Centro de Documentación del ITGE y Biblioteca de Informes de Geofísica; el Anexo VI sólo se archiva en Geofísica.

0. RESUMEN

A fin de tener una experiencia directa en el método de Resonancia Magnética Nuclear (RMN), el ITGE ha realizado un ensayo de la instrumentación NUMIS, de la firma francesa IRIS Instruments, en el acuífero de los Sotillos (Cádiz).

La novedad y ventaja del método RMN es que la señal recibida se debe exclusivamente a la existencia de agua en el subsuelo; la profundidad de investigación depende de la intensidad del momento magnético emitido para generar la producción de la señal. Las posibilidades de medición de esta señal (que es del orden de decenas de nV) se ven limitadas por la profundidad del agua (se estima un máximo de 100 m), por la existencia de ruido ambiente elevado y por la presencia de rocas conductoras o volcánicas.

El equipo es pesado, siendo necesario acceder a los puntos de medida en vehículo; en una área no conocida, para asegurar las mejores condiciones de recepción de la señal, es preciso la implantación de grandes antenas, la emisión del mayor número de momentos magnéticos que permita el sistema (16) y la máxima adición de señales (128-256), tardándose varias horas en realizar una medición.

En este ensayo se han efectuado sondeos RMN en cuatro emplazamientos próximos a sondeos mecánicos de columna conocida; debido a la existencia de ruidos electromagnéticos en la zona, fue necesario realizar numerosas pruebas con diferentes tipos de antena, llegándose a utilizar diseños aun no previstos en la logística ordinaria del sistema: un bucle de dos cuadrados de 75 m de lado cada uno. La orientación de esta antena respecto de las líneas eléctricas también influye en la calidad de la señal recibida.

Cuando se dan las condiciones para la generación de señal, es fácil la apreciación de su existencia en los registros realizados, aunque resulta dudosa en casos de baja relación señal/ruido.

El resultado de campo (forma de la amplitud de la señal en función del tiempo) es suficiente para decidir sobre la existencia o no de agua. La interpretación cuantitativa presenta el problema de equivalencia normal en otros métodos geofísicos, de tal forma que la distribución volumétrica del agua puede adjudicarse

a diversas combinaciones de potencias-contenidos. La resolución es en cualquier caso decreciente con el aumento de la profundidad, dado el carácter exponencial de la señal medida. Además, en los acuíferos multicapa, las más profundas resultan peor definidas, al estar su señal mezclada con la de las más someras.

Los resultados obtenidos en Los Sotillos, permiten concluir que el método está en condiciones de ser utilizado como complemento de otros métodos geofísicos con los que se haya definido la geometría del posible acuífero, siendo entonces de gran utilidad para valorar la presencia real de agua.

Por todo ello se considera necesaria la continuación de experiencias con este método, a fin de adquirir mejor conocimiento del mismo, ya que hay que considerarlo como potencialmente desarrollable tanto en aspectos logísticos de campo, como interpretativos.

1. ANTECEDENTES

La idea de utilizar el principio de funcionamiento del magnetómetro de protones (Resonancia Magnética Nuclear) para detectar el agua del subsuelo se debe a Varian (1962), siendo posteriormente desarrollada por Semenov (1978); el primer instrumento (HYDROSCOPE) fue construido por la Academia de Ciencias de Rusia (ICKC) en 1982, y más tarde (1995) IRIS Instruments (Francia) fabrica el equipo NUMIS por colaboración entre el BRGM e ICKC. Sólo a partir de 1991 comienzan a aparecer en la literatura geofísica occidental referencias a ensayos realizados con la técnica RMN, dándose en el ANEXO III una recopilación de la existente hasta enero de 1998. Estos trabajos publicados son por sí suficientes para apreciar el interés que realmente tiene este método, quedando claramente definidas sus aplicaciones y limitaciones en el momento actual.

No obstante, en los inicios de un método, y sobre todo cuando sus bases físico-matemáticas son complejas, es normal que cada grupo de usuarios desee verificar sus resultados mediante experimentos realizados en el propio país o entorno. En España, el equipo HYDROSCOPE fue utilizado en 1996 por THIGSA en los acuíferos de las sierras de Libar, Las Cabras y Grazalema; sin embargo no resulta evidente de este estudio cual es la aportación al mismo de las medidas de RMN. Otros ensayos realizados posteriormente no han sido aun difundidos.

Por todo ello, parecía conveniente realizar una prueba del método RMN por parte del ITGE, en las condiciones más controladas posibles, a fin de analizar las posibilidades reales del método y sus limitaciones, así como proceder a la divulgación de los resultados obtenidos. Tras diversos intentos de hacer ensayos con el equipo HYDROSCOPE, a raíz de conversaciones mantenidas con la empresa IRIS durante el Congreso de la EEGS (Environmental and Engineering Geophysical Society) celebrado en Aarhus (Dinamarca) en septiembre de 1997, se llegó a un acuerdo para llevar a cabo un ensayo del equipo NUMIS en España, que se ha realizado finalmente del 19 al 21 de mayo de 1998 en el Acuífero de los Sotillos (Cádiz).

2. FUNDAMENTO DEL METODO RMN

Los núcleos atómicos que contienen un número impar de nucleidos (protones o neutrones), generan, debido a su movimiento de revolución, un campo magnético cuya fuerza y dirección se expresa en términos de una magnitud vectorial denominada momento magnético nuclear. En ausencia de un campo magnético externo, los momentos nucleares están orientados de una manera aleatoria. En presencia de un campo magnético, como el terrestre, los momentos magnéticos se orientan (se polarizan) en la dirección de las líneas de fuerza del campo externo. Este movimiento de orientación es acompañado de otro de precesión entorno al campo magnético presente, a una frecuencia f llamada de Larmor, que es proporcional a la intensidad H del campo magnético externo; la constante de proporcionalidad es el índice giromagnético, con un valor único para cada nucleido. En el caso de los protones del agua

$$f(\text{Hz}) = 0.04258 H (\text{nT})$$

Por lo tanto la frecuencia de precesión es independiente de la dirección inicial del momento magnético respecto de la dirección del campo, y cada nucleido tiene una frecuencia que lo caracteriza. Si una bobina se sitúa próxima a los protones, el campo magnético de los momentos en precesión inducirá en ella una f.e.m. de la misma frecuencia f . La amplitud de la f.e.m. va disminuyendo, hasta anularse una vez que se ha alcanzado de nuevo el equilibrio.

Puesto que en la naturaleza está siempre presente el campo magnético terrestre, el estado normal de los momentos magnéticos nucleares es el de estar en equilibrio, es decir, orientados en la dirección del campo terrestre. Para que puedan entrar en precesión es por tanto necesario el apartarlos de su orientación. En los magnetómetros de protones, ésto se consigue mediante la aplicación de un campo externo muy intenso y de dirección distinta al terrestre, que polariza los protones de una pequeña muestra de hidrocarburos; al suprimir el campo polarizante, la medición de la frecuencia f de los momentos nucleares en precesión, permite calcular la intensidad del campo magnético terrestre en el lugar de medición.

Otra forma de romper el equilibrio es mediante el fenómeno de Resonancia Magnética Nuclear (RMN), que consiste resumidamente en que al excitar los

protones con una energía electromagnética de frecuencia igual a la de Larmor (campo magnético resonante), el momento magnético, por absorción de la energía, es separado de su posición de equilibrio, adoptando otra orientación distinta a la del campo magnético terrestre; al cesar el campo resonante, el momento tiende a orientarse nuevamente, entrando en precesión.

Puesto que la frecuencia de Larmor es distinta para cada nucleido, este método permite seleccionar el tipo de elemento que desea detectarse: la f.e.m. producida por la precesión protónica será debida exclusivamente a los protones que entren en resonancia a la frecuencia de excitación, y es por tanto una indicación de la presencia de dichos protones.

La principal novedad de la utilización de este principio físico en la prospección de agua, estriba en el desarrollo de la instrumentación necesaria para generar el campo resonante y medir la señal de resonancia en trabajos de campo, así como en el desarrollo de las ecuaciones matemáticas que permiten determinar la distribución de agua en el subsuelo a partir de la medición de la f.e.m.

En la práctica, midiendo en una zona el campo magnético terrestre con un magnetómetro, puede calcularse la frecuencia de precesión de los protones del agua en dicha zona; haciendo pasar una corriente alterna de esta frecuencia por una bobina situada sobre la superficie del suelo, se produce un campo magnético oscilante según el eje de la bobina, de valor $H_e \exp(-i 2 \pi f t)$, y componente ortogonal también oscilante H_l , que es la responsable de que el vector momento magnético de los protones del agua, si es que existen bajo la bobina, se inclinen un ángulo teta respecto de su orientación inicial:

$$\theta = g/2 H_l(r, r_0) q$$

donde g : índice giromagnético de los protones del agua

r : distancia del centro de la bobina al punto de calculo

r_0 : resistividad del medio

q : producto de la intensidad de corriente que circula por la bobina emisora, por el tiempo de emisión, denominando a esta cantidad "momento", y siendo su magnitud A ms. Este parámetro juega un papel crucial en los sondeos de RMN, puesto que determina la amplitud resultante de la señal de RMN y se utiliza para determinar profundidades y espesores de los acuíferos que tienen agua.

HI está expresado en nT/A (campo debido a un Amperio), y depende de la intensidad del campo aplicado y de la inclinación del campo terrestre.

Por tanto, el ángulo que el vector momento magnético de los protones es desviado, es proporcional a la cantidad de energía entregada, y depende de la intensidad del campo de HI y su duración. Cesado el campo externo, el momento magnético de los protones inicia su movimiento de precesión mientras que adquiere de nuevo la orientación en dirección del campo terrestre; la f.e.m. inducida por este movimiento precesional se mide en la misma bobina, que ahora actúa como receptora, y va disminuyendo en función del tiempo t según la ley

$$E(t,q) = E_0(q) \sin(2\pi f t + \phi_i) \exp(-t/T_2)$$

que es la señal que se mide en el método RMN, siendo:

$$E_0(q) = \int_V 2\pi f H_I(r) M_I(r) f(r) dv \quad \text{es la señal para } t=0$$

con $M_I = M_0 \sin(\theta)$

M_0 = Momento magnético molecular de la unidad de volumen bajo las condiciones de equilibrio ($t=0$)

$f(r)$: cantidad de agua contenida en el volumen unitario

ϕ_i : desfase entre la corriente emitida y el voltaje recibido, que depende de la conductividad del medio.

T_2 : constante de tiempo de decaimiento de la señal, que depende de la porosidad del medio.

Por tanto, la señal $E(t,q)$ no varía linealmente con q, sino con el contenido en agua $f(r)$. Para mejorar la relación señal/ruido, este proceso (excitación- medición) es repetido muchas veces para realizar la suma (stacking) de la señal registrada, tendiendo a anularse el ruido aleatorio.

En el ANEXO III (Some recent publications on the Proton Magnetic Resonance method applied to groundwater investigations) y en el ANEXO IV (PMT sounding with NUMIS equipment. Operating procedure), pueden encontrarse más desarrollados todos los aspectos teóricos y prácticos de este método.

3. SITUACION Y CONDICIONES DEL ENSAYO

La selección del emplazamiento para realizar los ensayos fue efectuada tras consulta a la Dirección de Aguas del ITGE, eligiéndose Los Sotillos por ser un acuífero bien conocido y controlado; queremos expresar nuestro agradecimiento a la Comunidad de Regantes del Acuífero de los Sotillos y a su asesor hidrogeológico D. Florencio Fernández Alonso por todas las facilidades recibidas, así como por la valiosa información aportada para la realización del ensayo.

Este acuífero se encuentra en el detrítico mio-pliocuaternario de la cuenca media del río Guadalete (fig. 1), siendo de tipo multicapa: arenas, areniscas y conglomerados con intercalaciones de limos y arcillas en un conjunto que no sobrepasa los 100 m de potencia. La zona es llana y accesible, con una importante actividad agrícola (fotografías 1 y 2); existen numerosos pozos de extracción (fig. 2), llevando la Comunidad de Usuarios un riguroso control de niveles, explotación de caudales y autogestión de sus recursos.

Las condiciones diseñadas para la realización de los ensayos son:

- realización de las mediciones junto a sondeos mecánicos de columna hidrogeológica perfectamente conocida
- en la medida de lo posible, en función del tiempo disponible, realización de medidas intermedias entre sondeos conocidos.
- realización de un ensayo en una zona fuera del acuífero.
- la información sobre los sondeos permanecería desconocida por parte de IRIS hasta la finalización de los ensayos y de su interpretación.

En la zona existen bastantes líneas eléctricas, que alimentan las bombas de los pozos, y que pueden introducir ruido en las medidas; dado que este tipo de circunstancias resultan difícilmente evitables en cualquier zona rural activa, pensamos que deben formar parte intrínseca de las condiciones del ensayo, ya que de otra forma la aplicabilidad del método se vería restringida a zonas totalmente desérticas.



Fotografías 1 y 2: aspectos de la zona de ensayos, mostrando detalles del extendimiento de la antena.



Fotografías 3 y 4: adquisición de datos con la instrumentación montada en el interior de un vehículo y fuera del mismo

4. DESCRIPCION DEL ENSAYO

4.1 PROCEDIMIENTO DE MEDICION

El procedimiento para realizar una medición se detalla en el ANEXO IV (PMR sounding with NUMIS equipment: operating procedure) y en el ANEXO V (Operating Manual), facilitados por IRIS durante la realización de estos ensayos. En resumen, consiste en lo siguiente:

1. **La instrumentación** (ver ANEXO IV) consta de una unidad de generación de corriente, de salida máxima 200 A, 2500 V (70 kg), un convertidor (40 kg), ocho rollos de cable de 75 m (35 kg cada rollo) para configurar la antena emisora-receptora, baterías de 24 V, ordenador PC para control de operación y un magnetómetro de protones. Dada la poca manejabilidad del equipo, debido a su gran peso, normalmente se trabaja desde el interior del vehículo que lo transporta (ver fotografías 3 y 4).

2. **Selección de la frecuencia de excitación:** se precisa medir con un magnetómetro la intensidad de campo magnético total, calculando así la frecuencia de precesión de los protones en esa zona, por $f(\text{Hz}) = 0.0426 B(\text{nT})$. Poniendo un bucle emisor standard (p.e. cuadrado de 75x75 m), se realiza una medición de prueba con cinco momentos (intensidad de corriente por tiempo, A-ms) y poco stacking o suma de señales medidas: si la frecuencia de la señal que se recibe difiere menos de 1 Hz (20 nT) de la calculada, puede seguirse adelante con el procedimiento; si la frecuencia es distinta, puede ser debido a que no hay agua en los primeros 100 m, a que existe mucho ruido, a que hay rocas volcánicas que modifican el campo magnético terrestre en profundidad, o a la presencia de mucha arcilla que amortigua la señal.

3. **Selección de la forma de la antena o bucle emisor:** si el ruido es superior a 1500 nV, puede modificarse el tipo de antena, estableciendo un doble bucle (en ocho) de diversas dimensiones y orientaciones, para tratar de mejorar la relación señal/ruido. Cada antena precisa modificar los condensadores del circuito de emisión - recepción, de acuerdo con su resistencia y las características eléctricas del terreno.

4. Selección de los parámetros de adquisición: Estos parámetros son el rango de amplitud (entre 500 nV y 60.000 nV), que debe ser del orden de cuatro veces el del ruido ambiente; el intervalo de registro, de 250 ms o de 500 ms, que depende de la constante de tiempo esperada (tipo de litología); la duración del pulso, que por defecto es de 40 ms; el número de pulsos o momentos, que de forma standard es 16, determinando automáticamente el instrumento la amplitud de cada pulso; y el número de stackings, que depende de la relación señal/ruido, oscilando entre 16 y 256. Si se conocen además las características del acuífero buscado, puede estimarse la amplitud de la señal esperada, y de ahí deducir el stacking o número de sumas a utilizar.

5. Control de la calidad de las mediciones: los parámetros que se deben vigilar durante la medición son el factor de amplificación, que depende de la inductancia de bucle y de la resistividad del terreno, debiendo ser mayor de 5000; el ruido ambiente, que es un valor medio y filtrado de la amplitud total recibida antes de emitir señal, en la banda de frecuencia del convertidor A/D; las curvas de señal y ruido mientras se efectúa el stacking, debiendo presentar la señal un decaimiento con el tiempo y ser de mayor amplitud que el ruido (estas curvas son observables tras someterlas a un filtro que suaviza su aspecto, a través del software de adquisición, del que hay dos versiones, una en D.O.S. que las presenta descompuestas en su parte real e imaginaria, y otra bajo Windows 95, que las presenta en valor total). Son también parámetros de control la forma de la curva de fase (entre la corriente de excitación y la señal recibida), que debe ser aleatoria para el ruido y constante o con ligera disminución en función del tiempo para la señal.

4.2 TRABAJOS EFECTUADOS

Los ensayos de campo han tenido lugar durante 3 días, desde el martes 19 de mayo hasta el jueves 21; han podido realizarse mediciones en 4 sondeos (ver fig. 2): I-1, D-4, 14 y D-0; los tres primeros se encuentran dentro del acuífero, con suficientes diferencias entre ellos como para esperar diferentes respuestas del método; el último ensayo fue realizado fuera del acuífero, de tal forma que realmente no existe el sondeo D-0, habiéndose conservado esta nomenclatura para facilitar la ubicación del ensayo. La situación de detalle de cada sondeo está indicada en la fig. 2b, donde así mismo se ha dibujado la posición del mayor de los bucles empleados.

Los tres días dedicados a estos ensayos equivalen a 4,5 jornadas de trabajo, habiéndose dedicado una jornada a ensayos de definición de parámetros de adquisición y un término medio de unas seis horas para la medición de cada sondeo RMN definitivo; los tiempos de registro oscilan entre 1 h 30 min y 4 h, sin que se hayan utilizado los máximos valores de número de momentos ni de stacking que quizá hubieran sido necesarios, a fin de poder obtener datos en el mayor número de emplazamientos posible, que se ha visto limitado a posiciones junto a sondeos mecánicos (pozos de captación o de control del acuífero).

Los registros efectuados son de dos tipos: los que obedecen al proceso de pruebas para optimizar el tamaño, tipo y orientación de la antena, y los que contienen finalmente los datos más representativos de cada emplazamiento; por eso en cada sondeo se han realizado varias mediciones, con distintos tamaños y configuraciones de bucle, buscando la mejor relación señal ruido. En el ANEXO I se detalla la secuencia de trabajos llevada a cabo, indicándose los diferentes registros efectuados con cada uno de los bucles; en resumen estos trabajos han sido:

* En el sondeo I-1 se han probado hasta seis tipos de antena distintos, indicados en la fig. 3. Se han efectuado un total de 15 registros, siendo válidos el test5 y el test15, que permiten comparar los resultados con una antena en ocho de 37.5 m y diferente orientación, y el test9, obtenido con antena en ocho de 75 m y que es el resultado definitivo del sondeo RMN en este emplazamiento. El tiempo invertido en la realización de este ensayo ha sido de 15 h 35 min, del cual 8 h 12 min corresponden a tiempo de registro.

* En el sondeo D-4 se han probado tres tipos de antena, indicados en la fig. 20. Se han registrado 6 ensayos, siendo el resultado definitivo el test25, obtenido con una antena en ocho de 75 m de lado, aunque el test22, con antena en ocho de 37.5 m también puede ser considerado a efectos comparativos. El tiempo invertido en la realización de este ensayo ha sido de 5 h 25 min, del cual 4 h corresponden a tiempo de registro.

* En el sondeo 14 se ha registrado con un solo bucle (fig. 27) y tres registros, siendo el definitivo el test32, con antena en ocho de 75 m. El tiempo invertido en la realización de este ensayo ha sido de 5 h 25 min, del cual 3 h 46 min corresponden a tiempo de registro.

* En el punto D-0 se han efectuado dos registros con un solo tipo de antena (fig. 27), siendo válido el test41. El tiempo invertido en la realización de este ensayo ha sido de 3 h 30 min, del cual 1 h 25 min corresponden a tiempo de registro.

Cada sondeo RMN efectuado da lugar a tantos ficheros como momentos emitidos en la medición, mas un fichero con los valores finales de todo el sondeo. En el ANEXO II se indica con más detalle el contenido de estos ficheros, así como las operaciones realizadas por el ITGE en los mismos para proceder al Análisis de los datos. En el ANEXO VI (disquetes) se han recogido todos los ficheros de los registros realizados.

5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE CAMPO

A fines comparativos, se van a considerar aquí todos los registros realizados, inclusive los que han sido interrumpidos por fallos de sincronía, operación, etc. Para cada ensayo se van a representar los gráficos de Amplitud en nV de la "señal" y del "ruido" en función del tiempo en ms, existiendo un gráfico de este tipo para cada momento emitido; así, para el cuarto momento emitido en la medición del test01, el gráfico correspondiente será el test 01-4. Además se representará el valor de amplitud para $t=0$ en cada momento, en función del momento en A-ms.

Los gráficos de señal y ruido presentados en este Informe, están extraídos de los ficheros de campo, según se detalla en el ANEXO II, sin que se les haya aplicado ningún filtro, resultando de esta forma de aspecto bastante más ruidoso que los que se observan durante el proceso de registro.

5.1 SONDEO I-1 (fig. 3)

a) resultados con las antenas de 37.5 m

* **bucle 2:** bucle en ocho de 37.5x37.5 m

test_00 (3 min): $q = 5$, $s = 5$ (fig. 4)

test 01 (8 min): $q = 4$ (fig. 5)

test 02 : $q = 5$; interrumpido (fig. 6)

* **bucle 2p** bucle en ocho de 37.5x37.5 m modificado

test 03 (5 min): $q = 5$; interrumpido (fig. 7)

test 04 (5 min): $q = 5$ (fig. 8)

test 05 (22 min) $q = 5$ ($s = 15$?) (fig. 9)

Los registros 00 a 03 no pueden considerarse válidos, ya que los condensadores del emisor no estaban correctamente conectados para el tipo de antena empleada; no obstante, aunque en los registros 00, 01 y 02 solamente se aprecia ruido, al aumentar el stacking se observa que disminuye la amplitud de las curvas de

"señal" y de "ruido", debido a filtrarse más el ruido con la suma de impulsos, siendo esto muy apreciable en el registro 02, que es el que tiene el mayor número de stacking y donde se ha conseguido un mejor acoplamiento de la frecuencia de la antena. Al modificarse la distribución de áreas del bucle (bucle 2p), en el registro 03 vuelve a aumentar la amplitud por la disminución de stacking, y por fin el registro 04 es la primera prueba que puede considerarse útil: aunque con un ruido muy elevado, puede apreciarse decaimiento en la curva de señal al menos en los momentos 2 y 5. En el registro 05, al aumentar el stacking, se observa la disminución de la amplitud, pero el resultado no permite afirmar que la señal sea debida a la presencia de agua; este hecho es notorio, ya que en efecto existe agua a menos de 20 m de profundidad en este emplazamiento, y el método no es capaz de detectarla con claridad debido al ruido existente.

* **bucle 5** en ocho de 37.5x37.5 m con diagonal común paralela a la línea eléctrica.

test 12 (9 min): $q = 5$ (fig. 16)

test 13 (39 min): $q = 10$ $s = 100$. Interrumpido (fig. 17).

test 14 (40 min): $q = 10$ $s = 50$. Interrumpido (fig. 18).

test 15 (60 min): $q = 10$ $s = 50$ (fig. 19a y 19b)

Al variar la orientación de la antena, el registro 12 muestra una drástica disminución de la amplitud de la "señal" respecto de los obtenidos con la orientación anterior, e incluso una clara manifestación de decaimiento en el momento 3; esporádicamente se produce sin embargo un ruido muy intenso, que pasa a registrarse en la curva de "señal", como se observa en el momento 5, para el que se ha modificado la escala de representación. Al pasar a registrar con stacking 100 (registro 13, interrumpido por fallo operativo) es totalmente evidente la mejora que produce la suma de impulsos, pero tanto en este registro como en el 14 se aprecia que el ruido es dependiente de la hora del día (nótese que la escala de representación es diferente en el registro 14), obligando incluso a suspender el proceso de registro. Finalmente, el registro 15, permite apreciar claramente, a pesar de los intensos picos de ruido, la existencia de agua.

Los test05 (bucle 2, fig. 9) y test15 (bucle 5, fig. 19a y 19b) permiten comparar el resultado de la orientación del mismo tipo de antena, ya que ambos están hechos con bucle en ocho de 37.5 m de lado, pero girados 45° (fig. 3); la

amplitud tanto de señal como de ruido es mayor en el bucle 2, por lo que puede aceptarse que la orientación del bucle de forma paralela a la línea eléctrica puede en efecto contribuir a mejorar la relación señal/ruido, aunque hay que tener en cuenta que el test15 se ha efectuado con un stacking unas tres veces superior. El aspecto de las curvas del test5 no permite afirmar la presencia de agua, que sí es evidente en el test15. Para el momento de mayor amplitud de señal en ambos ensayos ($q=6$ para el 15 y $q=4$ para el 5), se representa en la fig. 33 los valores de señal en función del tiempo; en la misma fig. 33 se representa la amplitud en función del momento para ambos ensayos: la presencia de ruido invalida totalmente el método (test5), obligando por tanto a optimizar la antena y el número de stacking en cada circunstancia (test15).

b) resultados con las antenas de 75 m

* **bucle 3** : cuadrado de 75x75 m .

test 06 (24 min): $q=5$; (fig. 10)

En esta prueba sigue sin apreciarse la presencia de señal, por lo que se intenta eliminar el ruido, además de disponer de mayor área de antena para mejorar la recepción, mediante un nuevo bucle:

* **bucle 4** : bucle en ocho de 75x75 m, con diagonal común paralela a la línea eléctrica.

test 07 (58 min): $q=5$, $s=32$. No válido (fig. 11).

test 08 (5 min): $q=5$ (fig. 12)

test 09 (170 min): $q=10$ $s=100$ (fig. 13a y 13b)

test 10 (16 min): $q=5$ $s=8$ (fig. 14)

test 11 (20 min): $q=5$ $s=8$ (control bajo Windows) (fig. 15)

El registro 07, aunque dudoso por problemas de acoplamiento de antena, permite apreciar por comparación con el 06 la disminución de ruido respecto de utilizar un solo cuadrado como antena. El problema de acoplamiento está ya resuelto en el test08, que al ser válido permite efectuar el registro definitivo test09, donde ya es muy clara la presencia de señal del agua. De los registros 10 y 11, realizados

en idénticas condiciones, puede deducirse que aun en presencia de agua a poca profundidad, como el sondeo RMN no se realice en condiciones de garantía máxima de recepción, el resultado puede ser muy dispar, como indican las curvas de amplitud en función del momento en ambos registros.

El resultado definitivo del ensayo en el sondeo I-1 es el test09 con el bucle 4, siendo el resto de antenas y registros pruebas de optimización. No obstante pueden también considerarse como registros válidos los test05 y test15.

Los ensayos 15 (bucle 5) y 9 (bucle 4) tienen la misma orientación de la antena, pero en el 9 los lados de cada bucle son de 75 m y además se han hecho el doble de sumas que en 15 ($s = 100$), y por tanto cabe esperar mejor respuesta. El máximo momento del test9 no sobrepasa los 5200 A-ms, mientras que en 15 se llega a 11000 A-ms. En la figura 34 se representan las curvas de amplitud en función del momento, así como de amplitud de señal en función del tiempo para el mejor registro de ambos test. Es apreciable que a pesar del mayor bucle y stacking realizado en el 9, el nivel de oscilación de la señal es mayor, lo que habrá que adjudicarlo a que los ruidos en esta zona son variable según la hora del día, quedando por tanto en duda la influencia real de los parámetros de medida. En cualquier caso, las diferencias entre ambos ensayos vuelven a aconsejar emplear en una zona desconocida y con ruido, los máximos valores que permitan garantizar los resultados: no es suficiente con que la curva de la señal presente decaimiento; esto solo vale para afirmar la presencia de agua, pero dejará en duda su interpretación en función de la profundidad.

5.2 SONDEO D-4

* bucle 1; bucle cuadrado de 75x75 m.

test 20 (7 min): $q = 5$ $s = 8$ (fig. 21).

test 21 (45 min): $q = 10$ $s = 32$ (fig. 22a y 22b).

Aunque el aumento de stacking consigue amortiguar algo los numerosos picos de ruido presentes en esta zona, el resultado sigue estando muy distorsionado por su presencia.

* **bucle 2:** bucle en ocho de 37.5x37.5 m, con diagonal común ortogonal a la línea eléctrica.

test 22 (75 min): $q = 10$ $s = 50$ (fig. 23a y 23b)

Se aprecia que la nueva disposición de la antena consigue, junto con el aumento de stacking, mejorar la apreciación de señal en decaimiento, pero no impide que los ruidos fuertes y aleatorios existentes distorsionen las constantes de tiempo.

* **bucle 3:** bucle a ocho de 75x75 m con diagonal ortogonal a línea eléctrica.

test 23 (15 min): $q = 5$ $s = 8$ (fig. 24)

test 24 (16 min): $q = 5$ $s = 4$ (fig. 25)

test 25 (80 min): $q = 10$ $s = 50$ (fig. 26a y 26b)

El registro 23 no es válido por problemas de acoplamiento de antena; los resultados del 24 permiten pasar a obtener el registro definitivo 25.

Pueden considerarse por tanto como resultados válidos los test 22 (bucle 2) y 25 (bucle 3), ambos con el mismo número de momentos y de stacking. En la fig. 35 se comparan las curvas de señal en función del momento y de señal en función del tiempo para el mejor registro en ambos test. siendo en este caso más evidente que en el sondeo I-1 (ver fig. 34) la mayor calidad de la señal obtenida con el bucle de mayor tamaño, por lo que en definitiva parece que la existencia de ruidos hace que, en una misma zona, las modificaciones de antena no siempre logran mejorar la señal de igual manera, teniendo distinta repercusión los parámetros en la calidad de los registros obtenidos, según el tipo de ruido.

5.3 SONDEO 14

- bucle en ocho de 75x75 m, con diagonal común paralela a línea eléctrica.

test 30 (5 min): $q = 5$ $s = 4m$ (fig. 28)

test 31 (11 min): $q = 5$ $s = 16$ (fig. 29)

test 32 (210 min): $q = 10$ $s = 150$ (fig. 30a y 30b).

En el test 30 no es apreciable la presencia de señal, por lo que es preciso aumentar el stacking de este registro de prueba, obteniéndose el 31, con mejor resultado, y pasando al registro definitivo 32. Puede apreciarse que en este sondeo el ruido es más continuo que en los sondeos anteriores, por lo que aunque el aumento de stacking consigue alguna mejora, ni siquiera en el test 32 (en el que se ha utilizado el mayor número de stacking de todo este ensayo), la calidad de la señal registrada permite apreciar con claridad la presencia de agua (hay que observar no obstante, que la aplicación de un filtro previo a la visualización de las curvas, como se hace en software de obtención de datos en campo, mejora algo su aspecto, siendo más apreciable el decaimiento que permite apreciar la presencia de señal de precesión de los protones del agua).

5.4 PUNTO D-0

- bucle en ocho de 75x75 m

test 40 (9 min): $q = 5$ $s = 8$ (fig. 31)

test 41 (76 min): $q = 10$ $s = 50$ (fig. 32a y 32b).

Esta es la zona de menor ruido de todas las registradas, por lo que cabe deducir que la ausencia de señal se debe a la ausencia de agua.

6. INTERPRETACION

6.1 ELEMENTOS PARA LA INTERPRETACION

De las ecuaciones en que se basa la teoría del método, se deduce que la intensidad de la señal recibida es directamente proporcional al contenido en agua del subsuelo, mientras que un aumento de la intensidad de corriente en el circuito emisor no aumenta la intensidad de la señal, sino la profundidad de investigación.

Las ecuaciones, en forma matricial tienen la forma

$$\{ \text{señal}(q) \} = M(z,q) \{ c(z) \}$$

siendo $\text{señal}(q)$ la amplitud de la señal en función de la amplitud del momento emisor, M la matriz que contiene la respuesta del modelo, y $c(z)$ la matriz con la información del contenido de agua en función de la profundidad y constante de tiempo.

La resolución de las ecuaciones permite determinar el contenido de agua y la constante de tiempo, en función de la profundidad

$$\{ c(z) \} = M(z,q)^{-1} \{ \text{señal}(q) \}$$

siendo estos los parámetros que proporciona el método. Para ello hay que calcular previamente la matriz M del problema directo, en la que para n capas y m momentos emitidos, cada elemento de la matriz es la contribución de una capa a la señal de un momento emisor; para este cálculo es preciso conocer la forma y tamaño de la antena emisora, la frecuencia, inclinación de campo magnético, la resistividad del terreno y la profundidad máxima de investigación deseada (que depende del tamaño de la antena y tiene gran influencia sobre la resolución). Esta matriz se calcula para 100×100 elementos (se tarda varias horas en dicho cálculo), pero su inversión para un caso dado solo tarda unos segundos.

Los datos de entrada para los cálculos de inversión son la señal medida para cada momento en función del tiempo (pudiéndose elegir el tiempo hasta donde desean tomarse los datos), a la que se le ajusta una exponencial de donde se obtiene el valor máximo y la constante de tiempo, formando la función $\text{señal}(q)$. Para este

proceso, la señal medida puede someterse a algún tipo de filtro, para suavizar la solución, caracterizado por la denominada "time constant for filtering", que puede variar de 5 ms (para curvas poco ruidosas) a 40 ms (para curvas muy ruidosas y de larga duración). De la matriz general M se toman por interpolación los elementos necesarios para el número de momentos medidos y número de capas seleccionado; si los datos son ruidosos la inversión puede ser inestable, para lo que se puede emplear un coeficiente de regularización, que pondera la diferencia entre los valores medidos y los debidos al modelo, minimizando el contraste entre capas; si este parámetro es cero, la solución sería la de muchas capas delgadas; si su valor es 100000, la solución es la de una sola capa con variación suave del contenido en agua en función de la profundidad; el valor standard de este parámetro es 5000 (cuanto más alto sea el valor, más suavizada será la solución).

La constante de tiempo calculada para cada capa del modelo obtenido en el ajuste, depende de la porosidad, y es por tanto un parámetro que indica la permeabilidad; sus valores no pueden ser inferiores al tiempo de retraso en que se inicia la medición (35 ms) ni superiores a 1000, lo que ocurre cuando la curva de la señal es muy ruidosa. El valor de la constante de tiempo es por tanto un índice litológico, de tal forma que se da la siguiente relación empírica (ver ANEXO IV):

> 600	...	agua libre
600-300	...	grava
300-180	...	arena gruesa
180-120	...	arena media
120-60	...	arena fina
60-30	...	arenas muy finas, arcilla
< 30	...	arcillas arenosas

En este proceso de inversión de los datos existen varias soluciones equivalentes, en función de los filtros y parámetro de regularización elegidos, por lo que como en cualquier otro método geofísico, la elección de la solución depende del grado de conocimiento que se tenga sobre la zona y del empleo simultáneo de otros métodos.

La interpretación llevada a cabo por IRIS Instruments se ha hecho para los registros definitivos de los diferentes emplazamientos, proporcionándose para cada caso los gráficos siguientes:

- **NUMIS experimental data: signal amplitude (nV)- time (ms):** valores de amplitud de señal en función del tiempo (curva de trazo continuo), para los momentos leídos en cada caso, sometidos a un filtro que suaviza el aspecto de la curva, junto con la función exponencial ajustada (curva de trazo discontinuo). Estas curvas permiten juzgar sobre la calidad de la señal y la existencia o no de protones en el subsuelo.

- **NUMIS experimental data: signal amplitude (nV), frequency (Hz), decay time (ms), phase (degr) - pulse parameter (A-ms):** las curvas de señal máxima, frecuencia, constante de tiempo y fase, en función del momento emitido. La estabilidad de las curvas de frecuencia y fase permiten juzgar sobre la fiabilidad de las medidas: la frecuencia debe presentarse constante y la fase con variación en forma lineal.

- **NUMIS inversion results:** los resultados de la inversión, para dos valores del parámetro de regularización, dando la distribución del contenido de agua y constante de decaimiento en función de la profundidad, así como las curvas señal/momento de los modelos teóricos frente a los valores medidos. Al aumentar el parámetro de regularización, la interpretación es más global, focalizándose al disminuir dicho parámetro.

6.2 SONDEO I-1

Se corresponde con el lugar de "test site1"; en la fig. 37a puede verse la columna del sondeo mecánico, con indicación de la litología y tramos del acuífero. Se presentan los resultados de los registros tests 09 (antena en ocho de 75x75 m, $q = 10$, $s = 100$) y test 15 (antena en ocho de 37.5x37.5 m, $q = 10$, $s = 50$). Para el test 09 no se han tenido en cuenta los valores para $q = 2$, por ser demasiado ruidosos (ver fig. 13a), limitándose el tiempo para inversión de los datos a 200 ms; en las curvas representadas en la fig. 36a (y equivalentes para el resto de los registros interpretados), se ha añadido una constante a cada función de señal-tiempo, a fin de representar conjuntamente todas las curvas para los diferentes

momentos seleccionados. Para el test 15, no se han tenido en cuenta los valores para $q=3$ y $q=8$ (ver fig. 19), limitándose así mismo el tiempo a 200 ms.

Aunque las dos secuencias de curvas de campo para los diferentes momentos (fig. 36a y 38a) dejan ver la presencia de señal, la amplitud tanto de la señal como del ruido es inferior en el test15 (con una relación señal/ruido de 2.61), que además muestra picos de ruido más fuertes (lo que no es atribuible a la antena, sino al instante específico de realizar los registros), haciendo más dudosos los valores de ajuste de exponenciales y por tanto de valores máximos de señal y constante de tiempo.

En ambos casos, las curvas de frecuencia y fase (fig. 36b y 38b) permiten concluir que existe realmente señal debida a la presencia de agua en el subsuelo.

Los datos han sido invertidos aplicando un filtro de 10 ms y parámetro de regularización de 500, con una segunda solución de mayor detalle (parámetro de 100 para el test 15 y de 200 para el test 09).

La inversión de los datos se presenta en las fig. 36c y 38c; con la antena de 37.5 m (test 15) la máxima penetración interpretada es de 41 m, mientras que con la antena de 75 m (test 09) se llega a los 97 m. Para mayor facilidad de análisis los resultados de la inversión se han superpuesto a la información de la columna del sondeo mecánico: la interpretación dada al test15 (fig. 39), con parámetro de regularización 500, es un acuífero que comienza a los 10 m de profundidad y se mantiene al menos hasta los 45, está mejor ajustada en la interpretación del test9 (fig. 37b), que permite diferenciar un primer acuífero desde los 10 m hasta lo 35 m, y posteriormente otro que tiene mayor importancia (contenido en agua) hacia los 60 m, lo que coincide muy aceptablemente con la realidad. La interpretación con parámetro de regularización menor (100 o 200, fig. 39), que intenta acotar más las capas, es aceptable para el test15, aunque no tiene definido el fin de su curva y presenta un error en la profundidad de inicio del acuífero; para el test9 no es cierta la mayor presencia de agua entre los 30 m y los 60 m.

Un resumen de la interpretación dada a este sondeo sería que el nivel de agua se encuentra a los 12-14 m, con un contenido del 12 al 15 %, siendo un acuífero de tipo arena media a gruesa, de profundidad máxima del orden de 60 m, pero no determinada.

Puede deducirse por tanto que para obtener resultados más fiables, en una zona desconocida hay que agotar al máximo las posibilidades de medir señal, optimizando los parámetros de medición en campo. La medición de un mayor número de momentos habría permitido una mejor definición de las capas, aunque la segunda y siguientes capas van a quedar siempre peor resueltas que la primera. La hora de realizar los registros, en zonas de ruidos, puede ser también decisiva para la calidad de los resultados.

6.3 SONDEO D-4

Se corresponde con el lugar de "test site2"; se presentan los resultados de los tests 25 (antena en ocho de 75x75 m, $q = 10$, $s = 50$) y 22 (antena en ocho de 37.5x37.5 m, $q = 10$, $s = 50$). En ambos casos, la inversión de los datos se ha limitado a los primeros 200 ms. La relación señal/ruido es mucho peor para la antena de menor tamaño (1.94 frente a 4.54), habiéndose eliminado para la interpretación los valores de los momentos $q = 2$ y $q = 3$, no por ser más ruidosos que los demás, sino por que presentan un pico en la curva señal-momento (ver fig. 23b), lo que equivaldría a una capa con agua muy superficial, que no es visible en el test 25, de mejor calidad, y para el que no se ha eliminado ningún valor.

Aunque filtradas, las curvas de campo del test22 (fig. 42a) son más ruidosas que las del test 25 (fig. 40a); teniendo en este caso ambos registros el mismo número de stacks. La mejor calidad de la señal en el test25 puede ser debida además de a la mejora introducida por la antena, al menor ruido ambiental existente durante el tiempo de medición. Las curvas de fase y frecuencia son también de peor calidad en el registro del test22 que en el test25 (fig. 42b y 40b).

La inversión se ha hecho aplicando un filtro de 10 ms y diferentes parámetros de regularización. La penetración del test22 es de 40 m (fig. 42c), mientras que la mayor antena del test 25 ha permitido llegar a 98 m (fig. 40c). La columna del sondeo D-4 (fig. 41a) solo difiere ligeramente de la del sondeo I-1 en la parte inferior, lo que refleja bien el resultado de las curvas experimentales de los test 9 y test 25 (valores de amplitud en las figuras 36b y 40b), que presentan, en efecto, una gran similitud; los resultados de la inversión para los test 9 y test 25 son así mismo equivalentes en lo que respecta a la profundidad y contenido en

agua, presentando sin embargo importantes diferencias en la curva de la constante de tiempo. Así mismo, las curvas de amplitud-momento para los bucles menores (fig. 42b y 38b), son muy diferentes entre si.

Sin embargo, la interpretación para el mayor parámetro de regularización es coincidente para ambos registros de este sondeo (fig. 40c y 42c): un primer acuífero por encima de los 5 m y de 2-3 m de potencia, y un acuífero más importante desde los 10 m hasta los 40 m; el acuífero inferior solo está definido en el registro 25 (fig. 41b), con valores importantes de contenido en agua sobre los 60 m y que se prolonga hasta los 100 m, mientras que para el test 22 el resultado de la interpretación (fig. 43) solo permite apreciar el acuífero superior. Hay una pobre correspondencia entre valores medidos y valores teóricos del modelo adoptado para el test 22 (fig. 42c), siendo buena para el test 25 (fig. 40c). La interpretación para valores menores del parámetro de regularización es bastante distinta en ambos tests: para el 25, el primer grupo de capas interpretadas coincide con buena precisión con el primer acuífero realmente existente, siendo peor la interpretación del segundo grupo de capas, que además, y a diferencia de la interpretación del test 09 para el sondeo I-1, solo llega a los 57 m. Podría pensarse que al tratarse de un acuífero multicapa, en los tramos indicados en las interpretaciones siempre es posible encontrar un nivel con agua.

El resumen de la interpretación dada a este sondeo es análogo al del punto I-1, con nivel de agua sobre los 12-14 m, contenido del 12 al 15 % y acuífero arena media a gruesa, de profundidad máxima del orden de 60 m, pero no determinada.

En conclusión, son más fiables para efectuar la inversión, los registros obtenidos con el mayor bucle de antena, apreciándose una importante variación en la asignación de profundidades y potencias en función de los parámetros de inversión utilizados, así como un menor grado de correspondencia con la realidad, en la interpretación de las capas más profundas.

6.4 SONDEO 14

Se corresponde con el lugar de "test site3"; se presentan los resultados del test 32 (antena en ocho de 75x75 m, $q = 10$, $s = 150$), que es el de mayor número de stack de todos los realizados.

Las curvas de campo (fig. 44a) son muy ruidosas (relación señal/ruido de 2.09), lo que puede poner en duda los valores de amplitud y constante de tiempo disponibles para la inversión; se ha suprimido el valor de señal para $q=6$, por presentar una bajada que obligaría a introducir un acuífero superficial adicional; esta eliminación de valores obedece evidentemente a criterios subjetivos del interpretador. El tiempo se ha limitado a 200 ms. Las curvas de frecuencia y fase no son muy buenas (fig. 44b). Sin embargo, el resultado de la inversión presenta buena coincidencia con la situación real (fig. 45a) para los dos parámetros de regularización utilizados: acuífero entre 15 y 30 m (fig. 44c y 45b).

La interpretación es por tanto la de un acuífero de arena media a gruesa, con nivel de agua a partir de los 14 m, contenido del 15 % en la parte superior, descendiendo al 5 % en la inferior, con una profundidad del orden de 32 m, con una capa posterior de profundidad indeterminada y menor contenido en agua (en realidad se trata de una capa mucho menos potente y de mayor contenido en agua).

6.5 LUGAR D-0

Se corresponde con el lugar de "test site4"; se presentan los resultados del test 41 (antena en ocho de 75x75 m, $q=10$, $s=50$).

Solamente para las curvas de la señal en los primeros momentos (fig. 46a) es apreciable una tendencia que permita reconocer la existencia de agua. El resultado de la inversión (fig. 46c) acusa solamente la presencia de un agua superficial, con contenidos inferiores al 10 %, y un nivel de agua a los 23 m, con contenido del orden del 4 %, arena fina y profundidad máxima de 40 m, lo que coincide con la posición de este ensayo, fuera del acuífero.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

EQUIPO

. el equipo es pesado (más de 400 kg) y, por su volumen, es difícil de transportar, lo que condiciona su uso a la accesibilidad en vehículo al lugar de ejecución del sondeo.

. la operación de implementar el bucle ocupa poco tiempo, en proporción al de medición: unos 20 minutos para antena cuadrada de 75x75 m y unos 50 minutos para bucle en ocho de 75x75 m, entre tres personas; el peso de los rollos de cable de 75 m resulta algo elevado (35 kg).

OPERATIVIDAD

. la operatividad del método es lenta; para asegurar la calidad de la señal y mejorar la resolución, es preciso medir al menos 16 momentos, con un número de stacking elevado (100 o más), lo que puede suponer más de cuatro horas de registro, pudiendo ser el tiempo total de ejecución de un sondeo diario.

. en una zona no conocida es necesario efectuar diversas pruebas, a las que hay que dedicar al menos un día, a fin de determinar los parámetros de mayor garantía de señal; en este ensayo ha sido preciso utilizar un bucle máximo en ocho de 75 m.

. algunos de los parámetros empleados en este ensayo (p.e. bucle en ocho de 75x75 m) no estaban contemplados en el manual de operaciones, lo que indica que el método operativo está todavía en vía experimental.

SOFTWARE DE CONTROL DE REGISTRO

. la operación de registro se ve ralentizada con el uso del software bajo Windows, que no obstante es preferible, ya que permite una mejor visualización de las curvas de señal y ruido en valor total, mientras que el software bajo D.O.S. ofrece estas curvas descompuestas en su parte real e imaginaria.

. en cualquier caso, el software de operación adolece del inconveniente de que no permite interrumpir una secuencia de medidas y continuarla posteriormente, ni aumentar el stacking una vez lanzada la secuencia. Esto da lugar a que si por cualquier razón el registro queda interrumpido, o no se ha conseguido suficiente calidad, hay que comenzar lo íntegramente. Este es un aspecto del método que está aun en desarrollo.

. en la cabecera de los ficheros de datos se echa en falta mayor información sobre la zona, nombre del sitio, fecha, parámetros de registro (en ningún caso hemos apreciado que figure el stacking), etc.

CONDICIONANTES EN LA MEDIDA E INTERPRETACION

. el resultado del método está muy condicionado a la existencia de ruido electromagnético en la zona.

. la interpretación es muy dependiente de los parámetros utilizados en la inversión de los datos, por lo que sin un apoyo de conocimiento de las profundidades y/o potencias de capa, la indeterminación es bastante elevada. El criterio empleado en la eliminación de puntos dudosos en las curvas de amplitud-momentos añade además subjetividad al sistema.

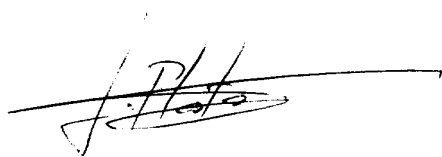
. la penetración conseguida con la antena en ocho de 75 m ha sido en este ensayo el doble que la conseguida con la antena de 37.5 m, siendo del orden de 100 m y 45 m respectivamente.

. La interpretación de la primera capa, en caso de acuíferos multicapa, es más precisa que la de las inferiores.

En definitiva, tras este ensayo se ha adquirido una experiencia directa en el método RMN, que nos han permitido apreciar mejor sus posibilidades de utilización; pensamos que el método está en condiciones de emplearse en aquellas situaciones en que se conozca, por otros métodos geofísicos, la geometría del posible acuífero, y la profundidad no supere los 100 m; el resultado de RMN puede ser entonces de gran valor en la investigación, ya que antes de efectuar un sondeo mecánico permitirá saber si hay o no agua.

No obstante, a la vista de las conclusiones obtenidas, sería de gran utilidad para el ITGE participar activamente en las experiencias que permitan desarrollar el sistema, sobre todo desde el aspecto de usuario, por lo que se recomienda la continuidad de este ensayo, bien mediante el alquiler durante un período de tiempo del equipo, bien mediante la colaboración con algún otro Organismo o Empresa interesada en el método.

Madrid, Julio 1998

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. Plata', with a long horizontal line extending to the right.

Fdo: Juan Luis Plata Torres

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'F. Rubio', with a horizontal line underneath.

Fdo: Félix M. Rubio

ANEXO I

ANEXO I

DIARIO DE LOS ENSAYOS

Se presenta el detalle de las mediciones realizadas en este ensayo, a fin de poder valorar las dificultades operativas que presenta el método, al utilizarlo en una zona desconocida.

Día martes 19 de mayo 1998

SONDEO I-1 (fig. 2 y fig. 3)

- llegada a las 9,40 h
- línea eléctrica de baja tensión a unos 150 m
- campo magnético: 42701 nT --- 1819 Hz ($f=0.0426 \times T$)

- * **bucle 1:** se extiende bucle cuadrado de 75x75 m, con lados paralelos al camino.

- comienzo lecturas: 10,45 h

- ruido 7000 nV; para intentar reducirlo a menos de 1500 nV, se cambia el bucle. No se hacen registros.

- * **bucle 2:** bucle en ocho de 37.5x37.5 m, a partir del anterior; lados paralelos al camino. Esta transformación es fácil y rápida de hacer.

- comienzo lecturas: 11,15 h

- #fichero test0 (3 min): $q(\text{momentos}) = 5$, $s(\text{stacking}) = 5$; solo se observa ruido 1200-1400 nV, inestable.

- #fichero 01 (8 min): $q = 4$, mayor stacking; sigue habiendo mucho ruido, sin que se aprecie señal. Se mide nuevamente el campo magnético: 42666 nT --- 1817.6

Hz; esta bajada de más de 20 nT puede haber producido una falta de sincronía del circuito de resonancia, por lo que se procede a modificar la frecuencia. Se aprecia cierta tendencia al decaimiento en algunas curvas de señal.

#fichero 02 : $q = 5$; el ruido sigue en 1200 nV. Se interrumpe el registro.

- se modifica el área de los bucles, disminuyendo la más próxima a la red eléctrica, por desplazamiento del centro en unos 7 m.

#fichero 03 : comienzo a las 13 h; $q = 5$; el ruido baja a 400 - 700 nV, aunque no se consigue buena resonancia (la frecuencia enviada de respuesta difiere de la del circuito emisor). Además los condensadores del emisor "saltan". Registro interrumpido en $q = 4$.

- se procede a modificar las capacidades del circuito emisor, para acoplarlos a la nueva disposición del bucle (esto se hace tras consulta a la central de IRIS en Orleans):

#fichero 04 (5 min): $q = 5$. Se comprueba que la frecuencia es correcta y que la señal presenta decaimiento, por lo que se procede a efectuar un registro completo.

#fichero 05 (22 min) $q = 5$, comienzo 13,15 h, con campo magnético de 42672 nT --- 1817.8 Hz. Ruido de 600 nV, obteniéndose señal con máxima amplitud de 85 nV, sin que sea posible asegurar la presencia de señal de precesión protónica.

- parada para comer a las 14 h

- reinicio a las 16 h

* **bucle 3** : cuadrado de 75x75 m con diagonal paralela a la línea eléctrica.

- campo magnético de 42695 nT --- 1818.8 Hz

- ruido ambiente de 4000 nV

#fichero 6 (24 min): inicio 16,30 h, $q = 5$; amplitudes de señal de 200 - 400 nV, con 1832 Hz. Falta de sincronización; resultado no fiable.

* **bucle 4** : bucle en ocho de dos cuadrados de 75x75 m, con diagonal común paralela a la línea eléctrica.

#fichero 7 (58 min): $q = 5$, $s = 32$; comienza registro a las 17,20 h, poniendo frecuencia de emisión de 1818.4 Hz. Ruido de 2200-2700 nV. Se producen bastantes rechazos en el stacking, porque el ruido supera en algunos momentos 20.000 nV; la frecuencia de respuesta se mantiene en 1818.1 Hz. Se aprecia en las curvas una mejor tendencia de decaimiento exponencial propio de existencia de señal.

- se modifican los condensadores del emisor para acoplarlos al nuevo bucle, empleándose posiciones algo diferentes de las indicadas en el manual del Anexo III, por ser la antena diferente a las ahí contempladas.

#fichero 8 (5 min) $q = 5$. Se comprueba que la frecuencia y la señal son correctas.

-se procede a realizar un registro completo:

#fichero 9 (170 min): $q = 10$ $s = 100$ (comienza a las 19 h y finaliza a las 22 h). Campo magnético al acabar: 42705 nT. Se observa con claridad la presencia de señal.

Día miércoles 20 mayo 1998

- ha llovido fuertemente durante la noche; el camino de acceso al sondeo I-1 está intransitable y se lleva toda la instrumentación a mano hasta el mismo punto del día anterior, donde se quedó extendido el bucle 4 (fotografía 4). Campo magnético 42705-42699 nT.

fichero 10 (16 min): $q = 5$ $s = 8$; (comienzo a 10,45 h); ruido 200-800 nV, se aprecia señal.

fichero 11 (20 min): mismo registro a través de programa de control bajo Windows; es más lento de ejecución.

* **bucle 5** (11,30 h) en ocho de 37.5x37.5 m con diagonal paralela a la línea eléctrica, para comprobar la eficacia del tamaño de antena. Se modifican los condensadores del emisor para acoplarlos a la nueva antena.

fichero 12 (9 min) : comienzo a 11.45 h con $q=5$, $f=1818$ Hz, ruido 100 nV, señal 30 nV. Se aprecia señal.

fichero 13: comienzo a 12.00 h; $f=1817.5$ Hz; $q=10$ s = 100. A las 13.00 h da mensaje de missing loop Rx/Tx; se interrumpe el registro y hay que comenzar de nuevo.

fichero 14: $q=10$ s = 50; el ruido ha subido hasta 4000 nV; la ganancia disminuye de 20000 a 9000 al producirse un ruido muy intenso durante varios minutos. Se interrumpe el registro.

El software no permite reiniciar un registro para un valor de q determinado, por lo que se inicia de nuevo todo el registro.

fichero 15 (60 min): $q=10$ s = 50 comienza a 13,45 h; el ruido está en 100 nV. Hay buena señal y la frecuencia es estable en 1818.2 Hz. Se producen de vez en cuando ruidos fuertes que distorsionan la señal y la constante de tiempo. Finaliza a las 14,45 h.

- se come de bocadillos y se recoge el bucle.

SONDEO D-4 (fig. 2 y fig. 20)

* **bucle 1**; llegada a las 16 h. Se pone bucle cuadrado de 75x75 m, con diagonal según dirección de línea eléctrica con transformador y bomba funcionando a unos 25 m del final del bucle.

fichero 20 (7 min), comienzo a 16,20 h. $q=5$ s = 8. Algo de ruido de vez en cuando. No es evidente la presencia de señal. Se procede a aumentar el stacking.

fichero 21 (45 min), $q=10$ s=32; se siguen produciendo golpes de ruido fuerte, que distorsionan la constante de tiempo.

- se ven los resultados del sondeo I-1, para el que hubo de calcularse la matriz adecuada durante la noche del día anterior (el cálculo tarda unas 7 h).

* bucle 2: se cambia a bucle en ocho de 37.5x37.5 m, con diagonal común ortogonal a la línea eléctrica.

fichero 22 (75 min): comienza a las 17.50 h; $q=10$ s=50; ruido de 200 nV. Finaliza a las 19,05 h. La señal es clara para algunos momentos, aunque sigue habiendo mucho ruido.

- se deja bucle en el terreno.

Día jueves 21 mayo 1998

* bucle 3: se cambia el bucle a ocho de 75x75 m con diagonal común ortogonal a línea eléctrica. Campo magnético de 42706 nT --- 1818.4 Hz.

fichero 23 (15 min); comienza a 9,30 h; $q=5$ s=8; buena señal a partir del segundo stacking.

- se modifican los condensadores del emisor para adaptarlo a la antena.

fichero 24 (16 min): $q=5$ s=4 ruido 300-400 nV. Se acepta como prueba y se pasa a efectuar un registro más completo:

fichero 25 (80 min): $q=10$ s=50, comienza a 10,05 h; la frecuencia se mantiene bien en 1818.2 Hz y el ruido en unos 400 nV; finaliza a 11,25 h. Se aprecia bien la existencia de señal.

SONDEO 14 (fig. 2 y fig. 27)

- se instala bucle en ocho de 75x75 m, con doble diagonal paralela a línea eléctrica. Se finaliza de poner el bucle a las 13,20 h. Campo magnético de 42705-42712 nT.

fichero 30 (5 min): $q = 5$ $s = 4$, ruido 2000 nV, amplitud 20000. No se ve señal.

fichero 31 (11 min): $q = 5$ $s = 16$. No se sintoniza bien la frecuencia, aunque se aprecia algo más de señal, al haber aumentado el stacking.

fichero 32 (210 min): $q = 10$ $s = 150$, comienzo 14,10 h. $f = 1818.4$ Hz. En $q = 5$ el ruido sube a 2500-3000 nV, la frecuencia se mantiene en 1817.8. La señal pierde forma, con constante de tiempo de 1000. En $q = 8$ el ruido sigue en 2500 nV. En $q = 9$ el ruido sigue en 2200 nV, constante de tiempo 1000, señal 142 nV y $f = 1818.02$ Hz. Finaliza a las 18,25 h. Ni la antena ni el stacking han conseguido mejorar sustancialmente la relación señal/ruido en esta zona.

PUNTO D-0 (fig. 2 y fig. 27)

- a 500 m del Cortijo de Sotillo Viejo, fuera del acuífero.

- se pone bucle en ocho de 75x75 m, acabando de instalarlo a las 19,45 h. Campo magnético de 42707 nT.

fichero 40 (9 min): comienza a las 19,55 h. $q = 5$ $s = 8$, ruido 200-400 nV. No se ve señal, con máximos de 26 nV.

fichero 41 (76 min): comienza a las 20,10 h, $q = 10$ $s = 50$.

En realidad habría que utilizar $s = 100-150$, porque la señal, si existe, es más baja que antes, y por lo tanto la relación señal/ruido sería muy mala, aunque el ruido sea mejor que en otras zonas; no obstante ésto requeriría un registro de unas 4

horas. No se aprecia la forma en decaimiento que se ha observado en los registros anteriores, con valores máximos de señal muy inferiores a los obtenidos en los otros puntos.

- se finaliza a las 21,10 h

- se recoge todo; encontramos la puerta de la finca cerrada, saliendo campo a través a las 22.30 h.

ANEXO II

ANEXO II

FICHEROS DE DATOS DE CAMPO

En cada uno de los registros se generan tantos ficheros (raw data files) como momentos q de medida se han seleccionado, lo que viene indicado por la extensión del fichero correspondiente (p.e, para el test0 se han medido cinco momentos, existiendo por tanto los ficheros test0.1 a test0.5), y además un fichero con el resultado total, de extensión inp. (p.e. test0.inp)

Los formatos completos de estos ficheros están indicados en el ANEXO IV. Para los ficheros con los valores de cada momento q , el contenido es el siguiente:

* primer registro:

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1819.50	-13	-23	4	1402	19	22353.1	9.374	114

contiene nueve variables, de las que destacamos: A1 (frecuencia en Hz); A4 que es una clave dependiente del tipo de antena utilizado (hacemos observar, que en los registros 6, 20 y 21, realizados con antena de un cuadrado de 75x75 m se ha utilizado la clave 2, según indica el manual, pero en el resto de los registros se le ha dado a la clave A4 el número 4, que corresponde a antenas de dos bucles cuadrados en ocho de 37.5x37.5 m, ya que no está previsto en el manual la utilización de bucles en ocho de 75x75 m); A5 es una evaluación del ruido medio en nV; y A9 es el número de filas con datos que contiene el fichero.

* segundo registro: tiene 11 variables, entre las cuales la primera y la quinta informan del número de veces que se han leído el ruido y la señal respectivamente (este número no es el stacking de datos seleccionado).

* resto de registros: son (A9-1) filas; cada una contiene hasta 13 variables, no estando en nuestro caso presentes más que las 7 primeras:

- A tiempo en ms al que corresponden los valores medidos
- B componente X del ruido en nV
- C componente Y del ruido en nV

- D componente X de la Intensidad, en A
- E componente Y de la Intensidad, en A
- F componente X de la señal en nV
- G componente Y de la señal en nV

El tiempo total de registro seleccionado puede ser de 250 ms, 500 ms, etc. El intervalo entre valores es de 2.20 ms. Cada valor de las componentes representa en este fichero el resultado del stacking seleccionado.

Para cada fichero se van a representar los valores de señal y ruido de cada momento, en función del tiempo de registro; para ello, a los ficheros registrados en campo les hemos añadido en el ITGE las columnas:

$$J = \sqrt{B \times B + C \times C} \text{ :amplitud del ruido en nV}$$

$$K = \sqrt{F \times F + G \times G} \text{ :amplitud de la señal en nV}$$

representándolas frente al tiempo (columna A), siendo esta la forma en que se han recogido en el ANEXO VI

El fichero con los valores resumen de cada registro completo, tiene la extensión .inp, con el siguiente contenido:

- * primer registro: tipo de antena y número de medidas o momentos
- * línea de ceros
- * tantas líneas como momentos q, con el contenido:

A	B	C	D	E	F	G
143	77	1000	1494	8	1822.60	104

A: momento emitido en A-ms

B: amplitud de señal máxima (extrapolación para $t=0$) en nV

C: constante de tiempo en ms

D: amplitud del ruido en nV

E:

F: frecuencia en Hz

G: fase en grados

De los ficheros *.inp se ha representado la amplitud de la señal en función de la intensidad del momento aplicado (columnas A y B).

El ANEXO VI está constituido por dos disquetes, que contienen un directorio para cada uno de los emplazamientos de los ensayos: I-1, 14, D-4 y SOT; cada uno de estos directorios está a su vez dividido en tantos directorios como registros efectuados en el emplazamiento; así, por ejemplo el contenido del directorio I-1 es:

Directorio de A:\I-1

.	<DIR>		08-27-98	9:21a
..	<DIR>		08-27-98	9:21a
00	<DIR>		08-27-98	9:21a
1	<DIR>		08-27-98	9:22a
2	<DIR>		08-27-98	9:22a
3	<DIR>		08-27-98	9:22a
4	<DIR>		08-27-98	9:22a
5	<DIR>		08-27-98	9:22a
6	<DIR>		08-27-98	9:22a
7	<DIR>		08-27-98	9:22a
8	<DIR>		08-27-98	9:22a
9	<DIR>		08-27-98	9:22a
10	<DIR>		08-27-98	9:22a
11	<DIR>		08-27-98	9:22a
12	<DIR>		08-27-98	9:22a
13	<DIR>		08-27-98	9:22a
14	<DIR>		08-27-98	9:22a
15	<DIR>		08-27-98	9:23a
5-15	GRF	7,512	07-14-97	6:06p
9-15	GRF	7,499	07-14-98	6:02p

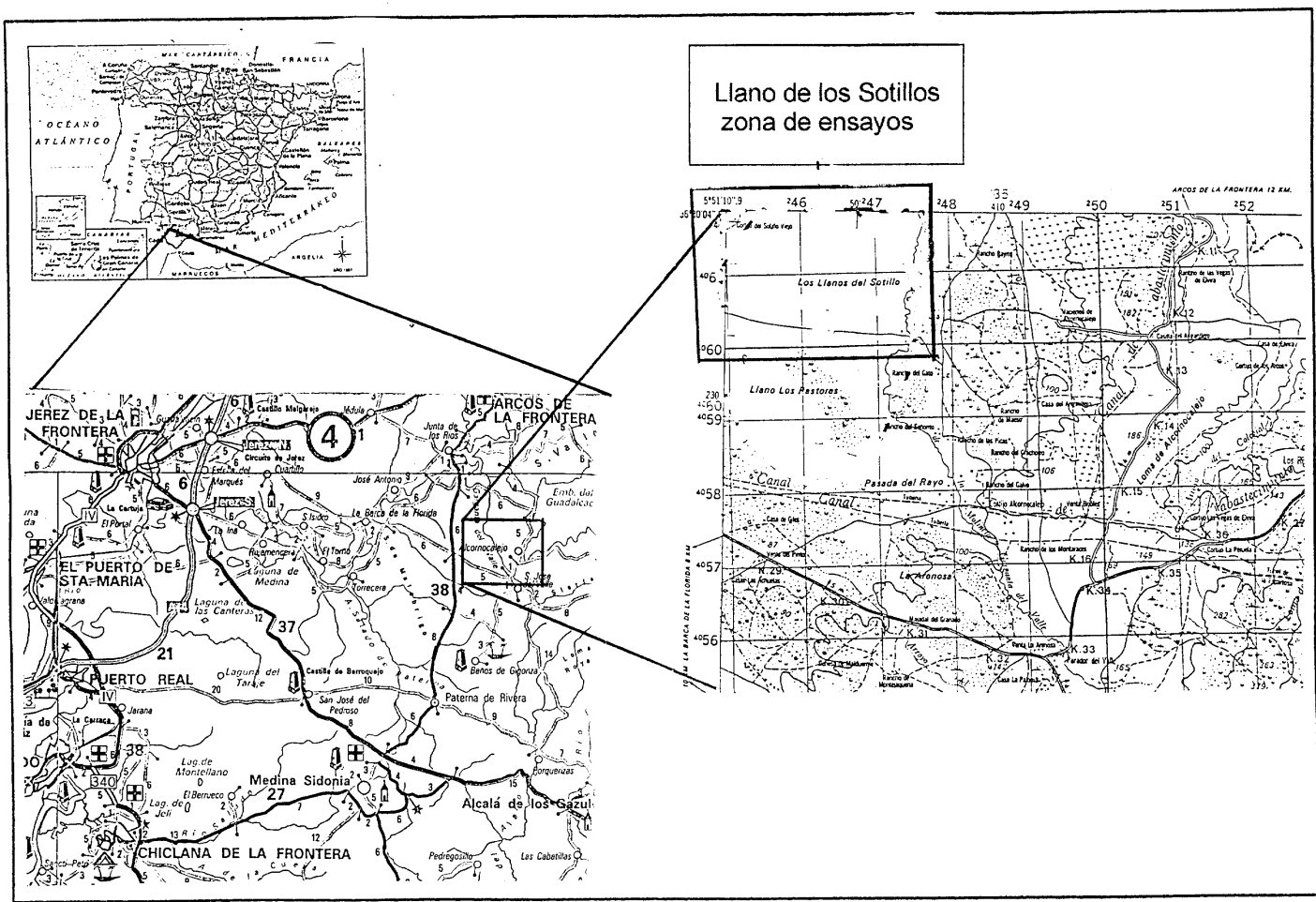
Cada uno de estos directorios contiene todos los ficheros asociados al registro: tantos ficheros test-xx.i como momentos se hayan emitido en el registro xx, además del fichero resultado test-xx.inp. Por ejemplo, para el registro 00 se tienen los ficheros:

Directorio de A:\I-1-00

.	<DIR>		08-27-98	9:21a
..	<DIR>		08-27-98	9:21a
TEST_00	1	6,520	06-25-98	1:36p
TEST_00	2	6,439	06-25-98	1:36p
TEST_00	3	6,219	06-25-98	1:50p
TEST_00	4	6,185	06-25-98	1:50p
TEST_00	5	6,168	06-25-98	1:55p
TEST_00	GRF	17,861	07-08-98	2:36p
TEST_00	INP	287	05-19-98	11:28a

Estos ficheros incluyen ya la manipulación efectuada en el ITGE de incorporar los valores de señal y ruido en amplitud total. Se incluye en cada uno de estos directorios además un fichero test-xx.grf, que contiene los gráficos correspondientes a dicho registro y que son las figuras presentadas en el Informe. Estos gráficos están realizados con el programa GRAPHER.

FIGURAS



Llano de los Sotillos
zona de ensayos

Fig. 1 Plano de situación del Acuífero de los Sotillos.

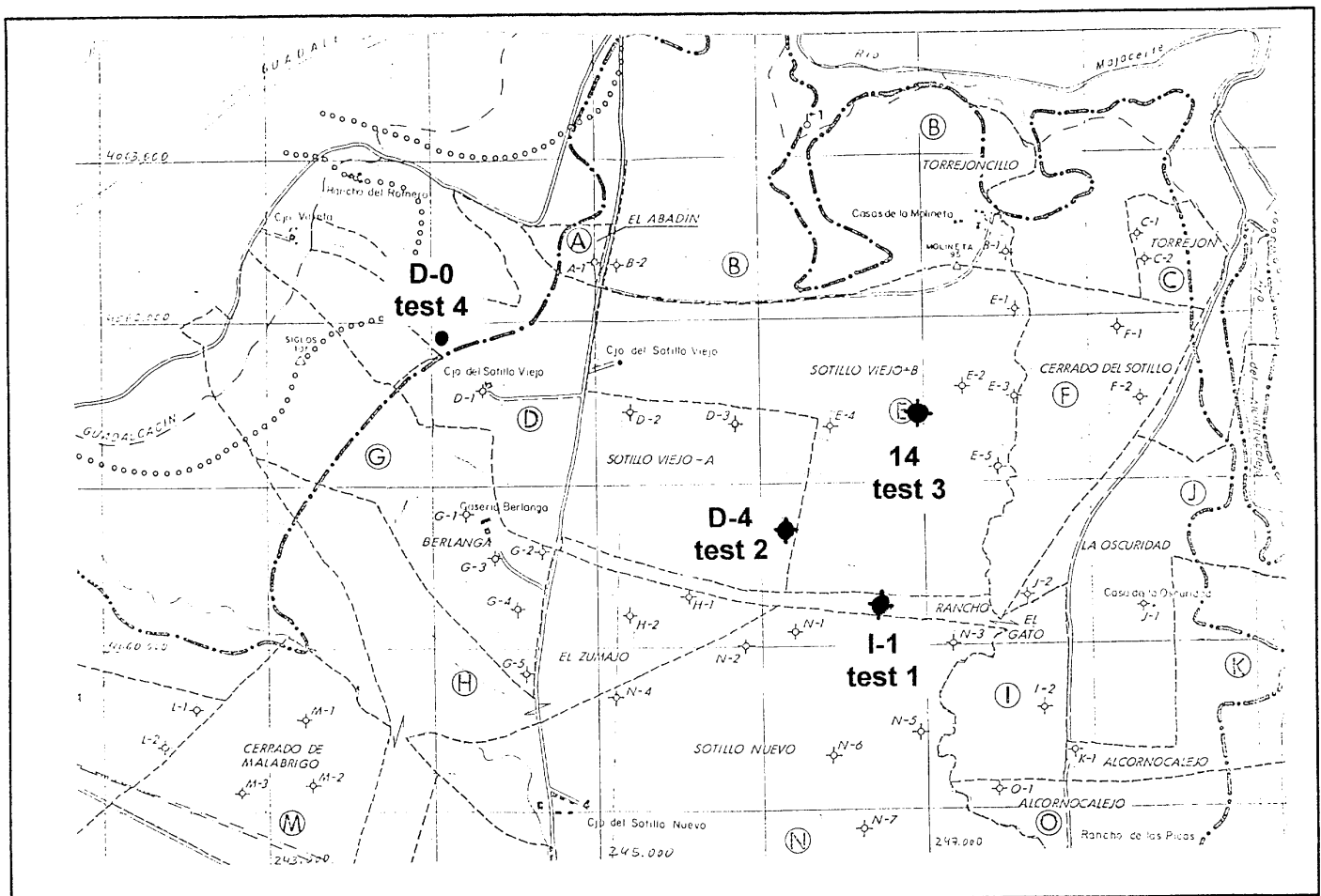


Fig. 2 Plano de posición de los ensayos efectuados. ---límite de acuífero ● ensayo de RMN ☆ pozo

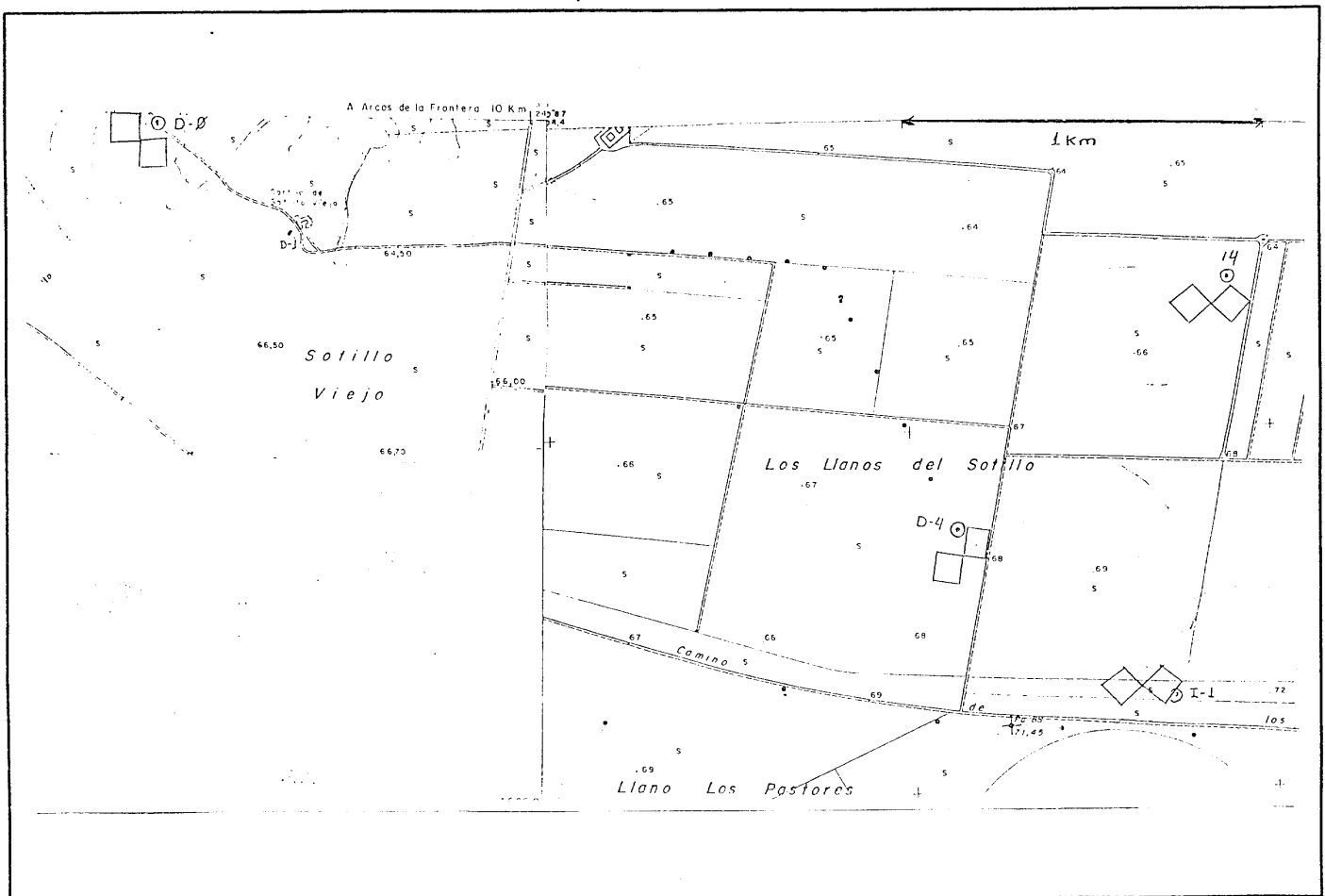




Fig. 2b Plano de posición de detalle de los ensayos efectuados.  antena máxima empleada  sondeo mecánico

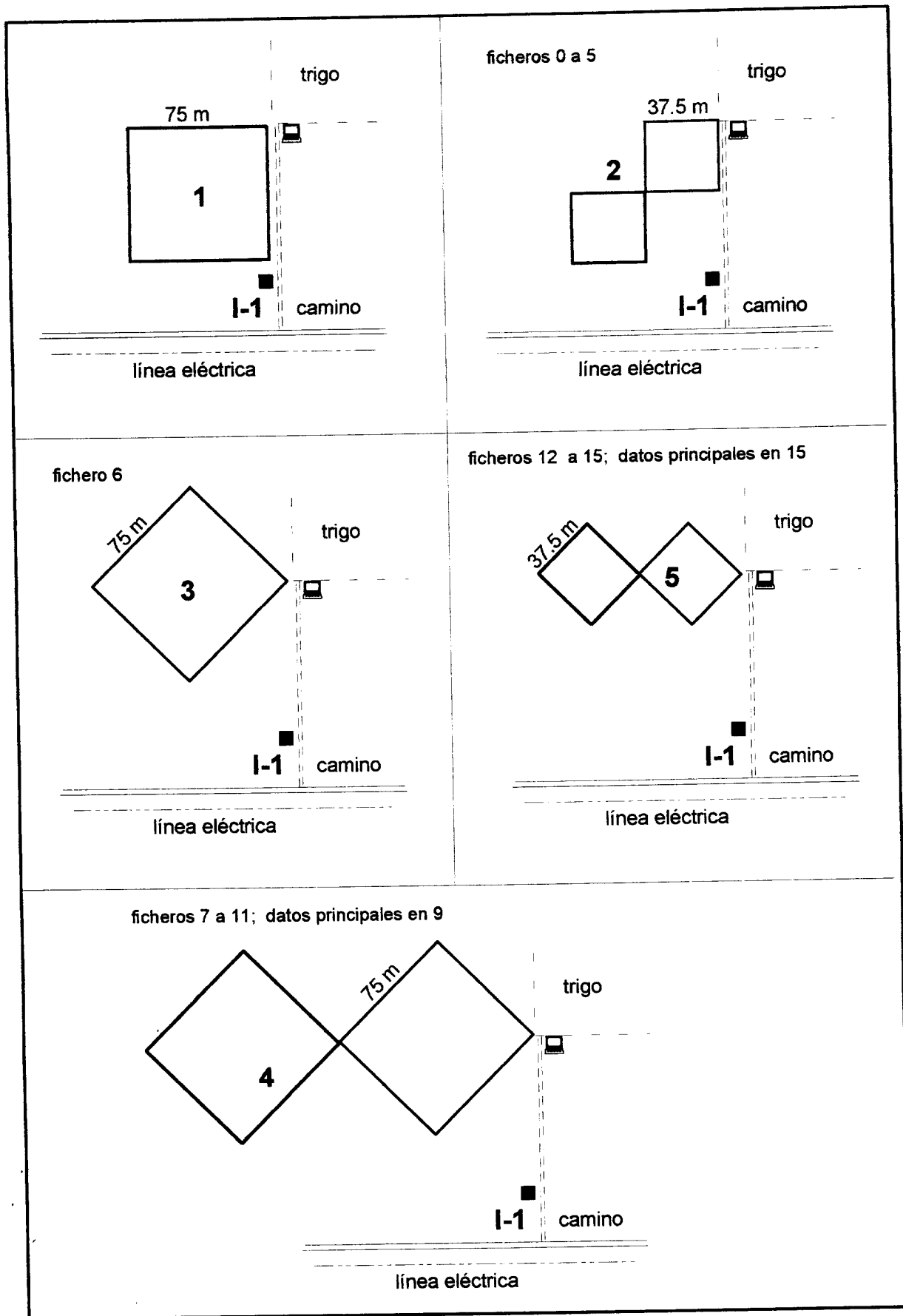


Fig. 3 Esquema de dispositivos y ficheros asociados en el sondeo I-1

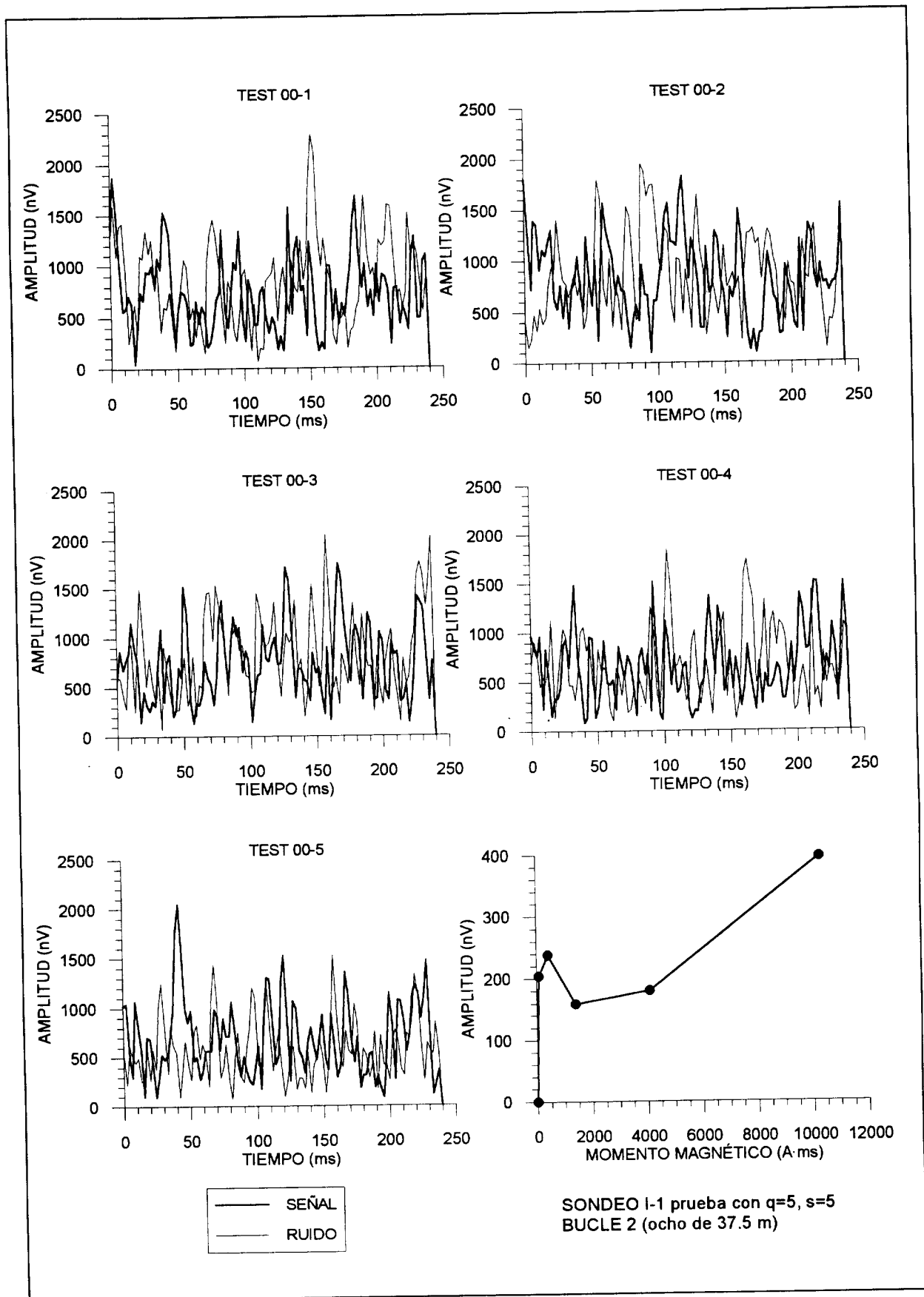


Fig. 4

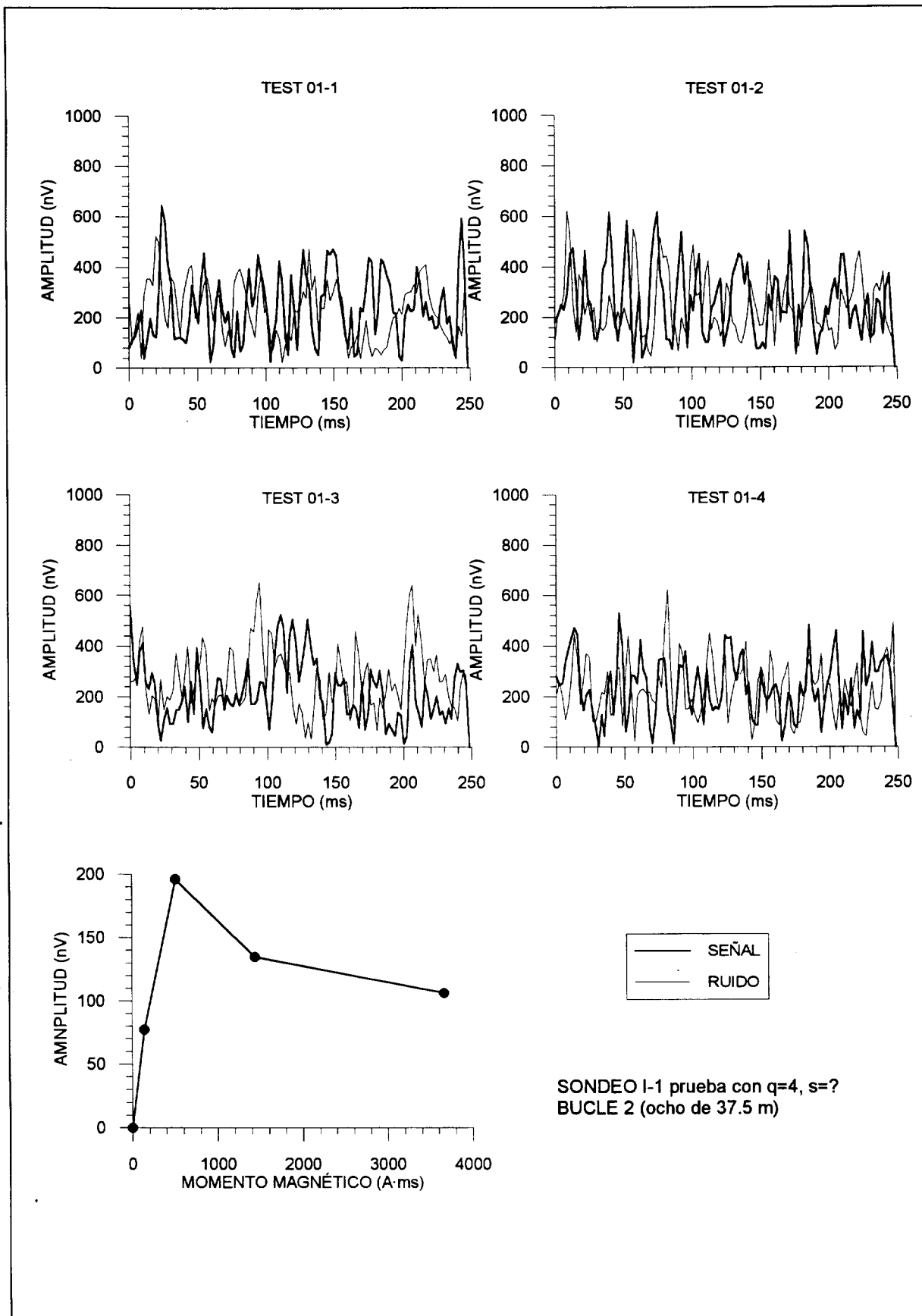


Fig. 5

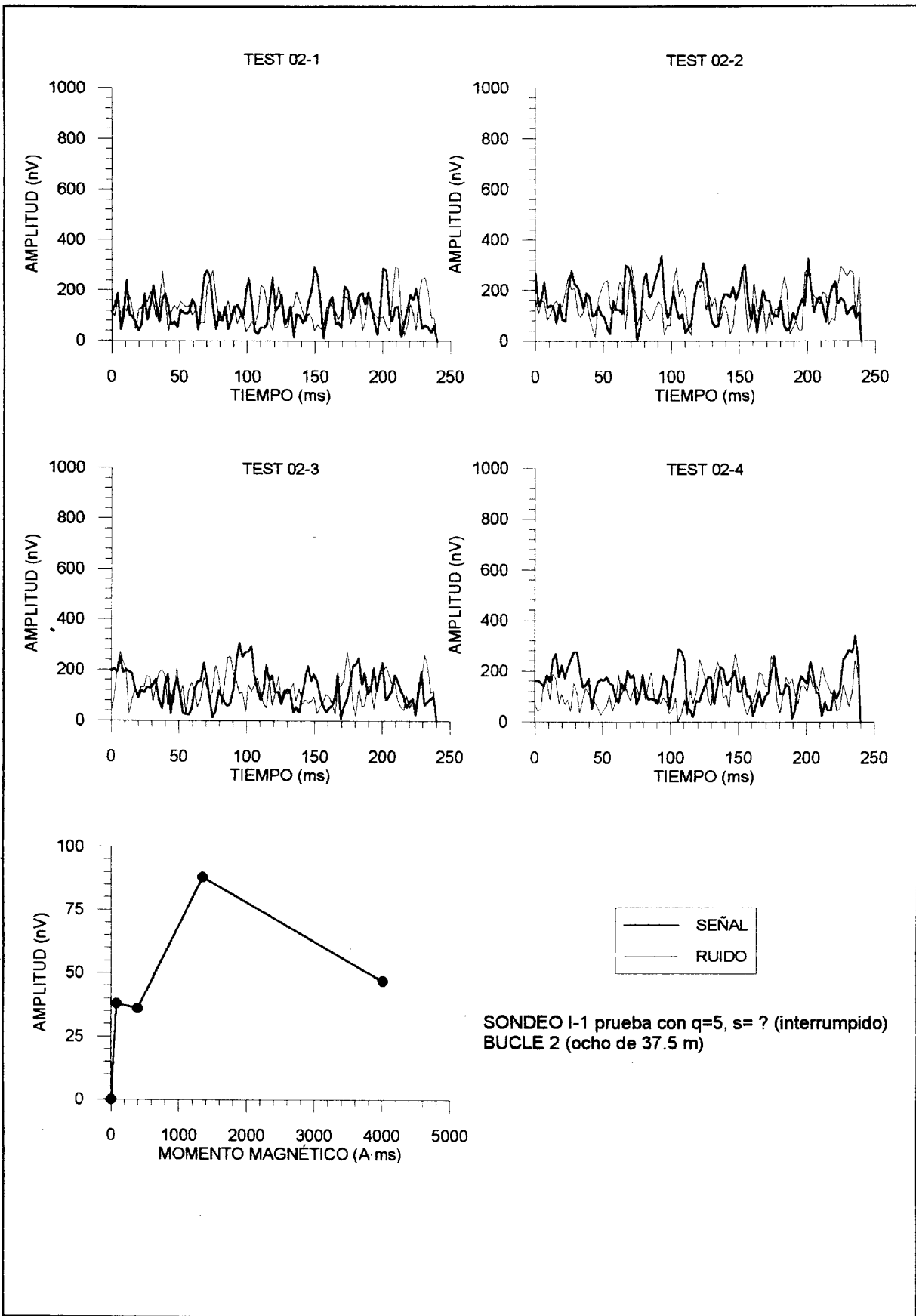


Fig. 6

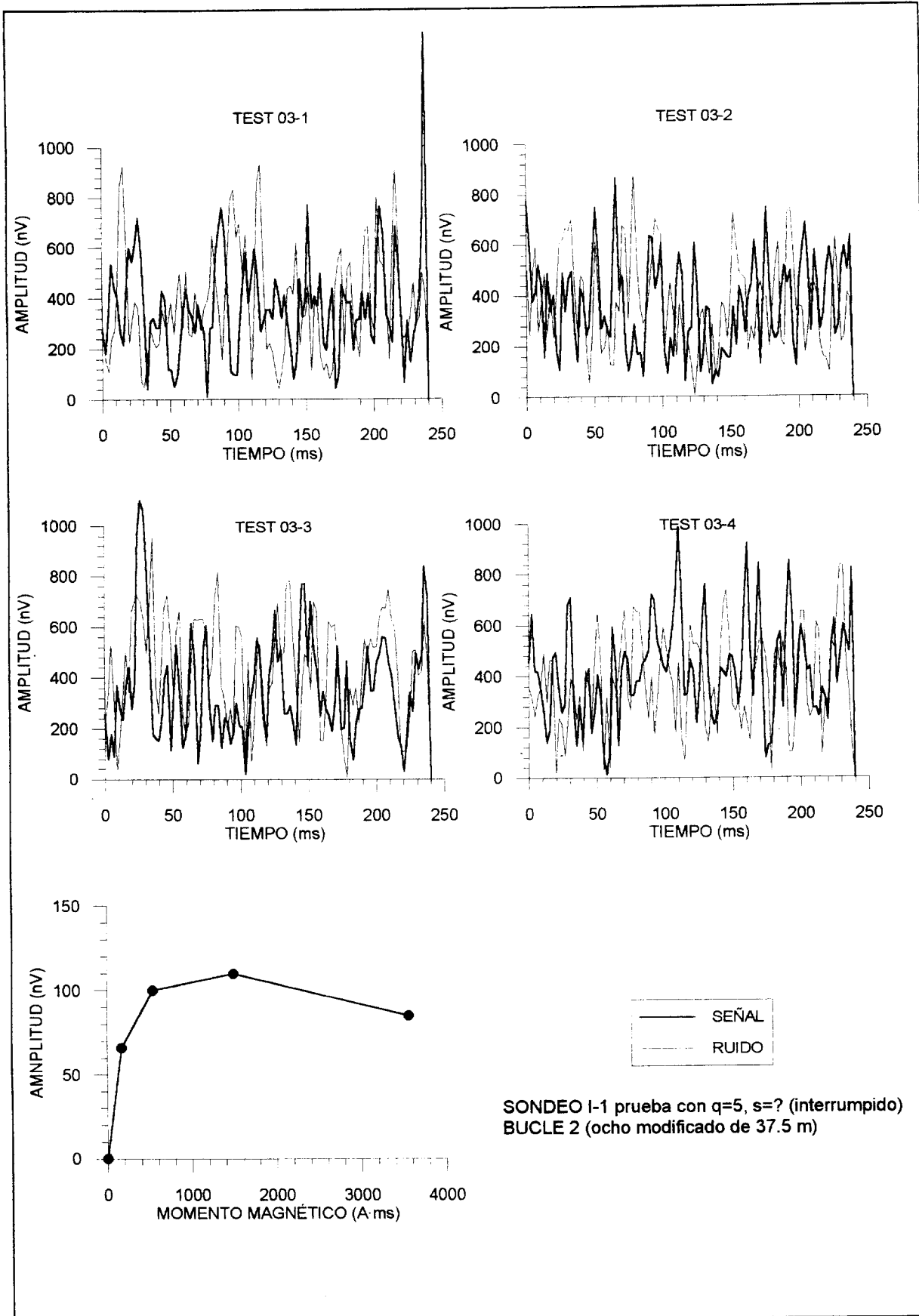


Fig. 7

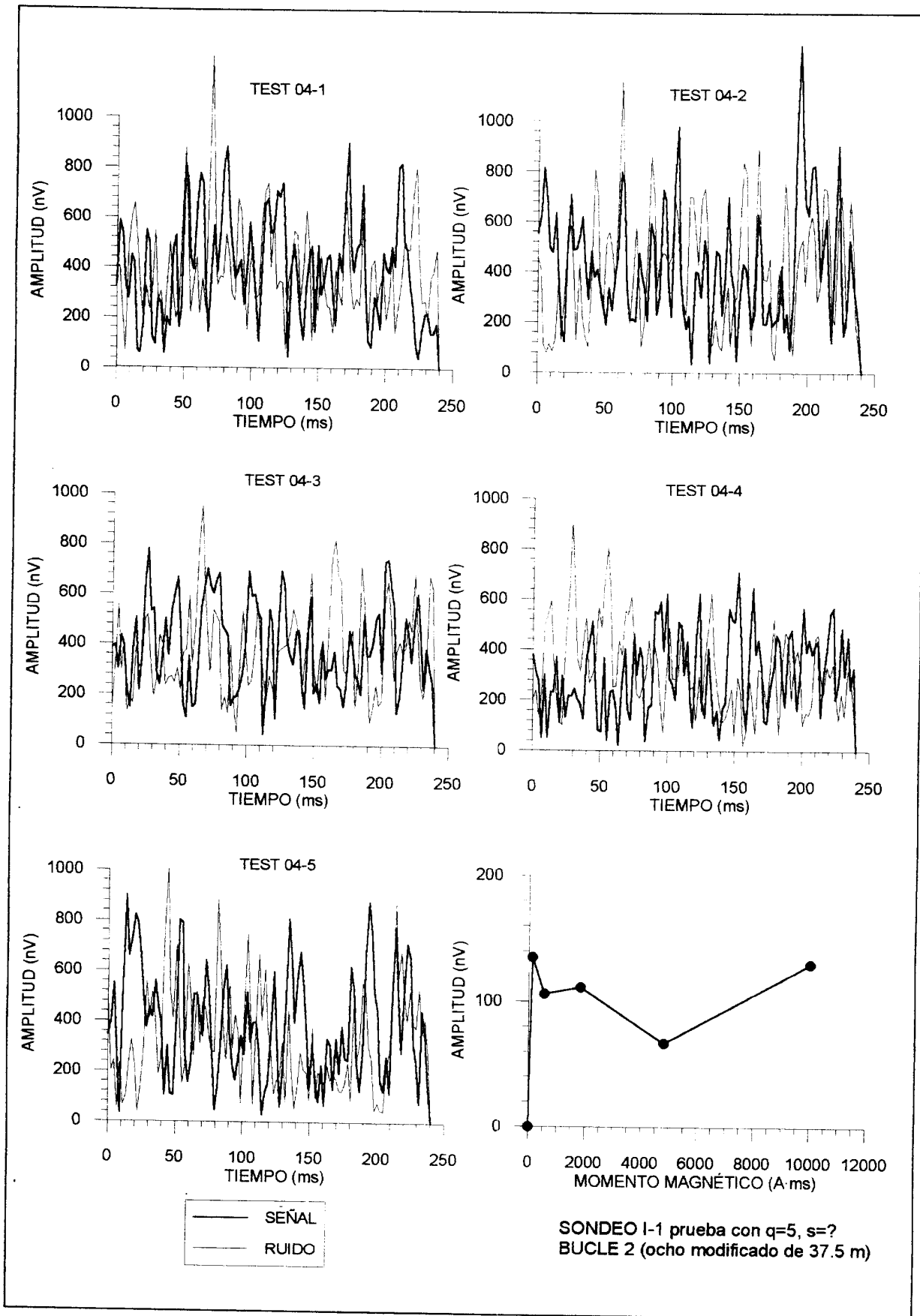


Fig. 8

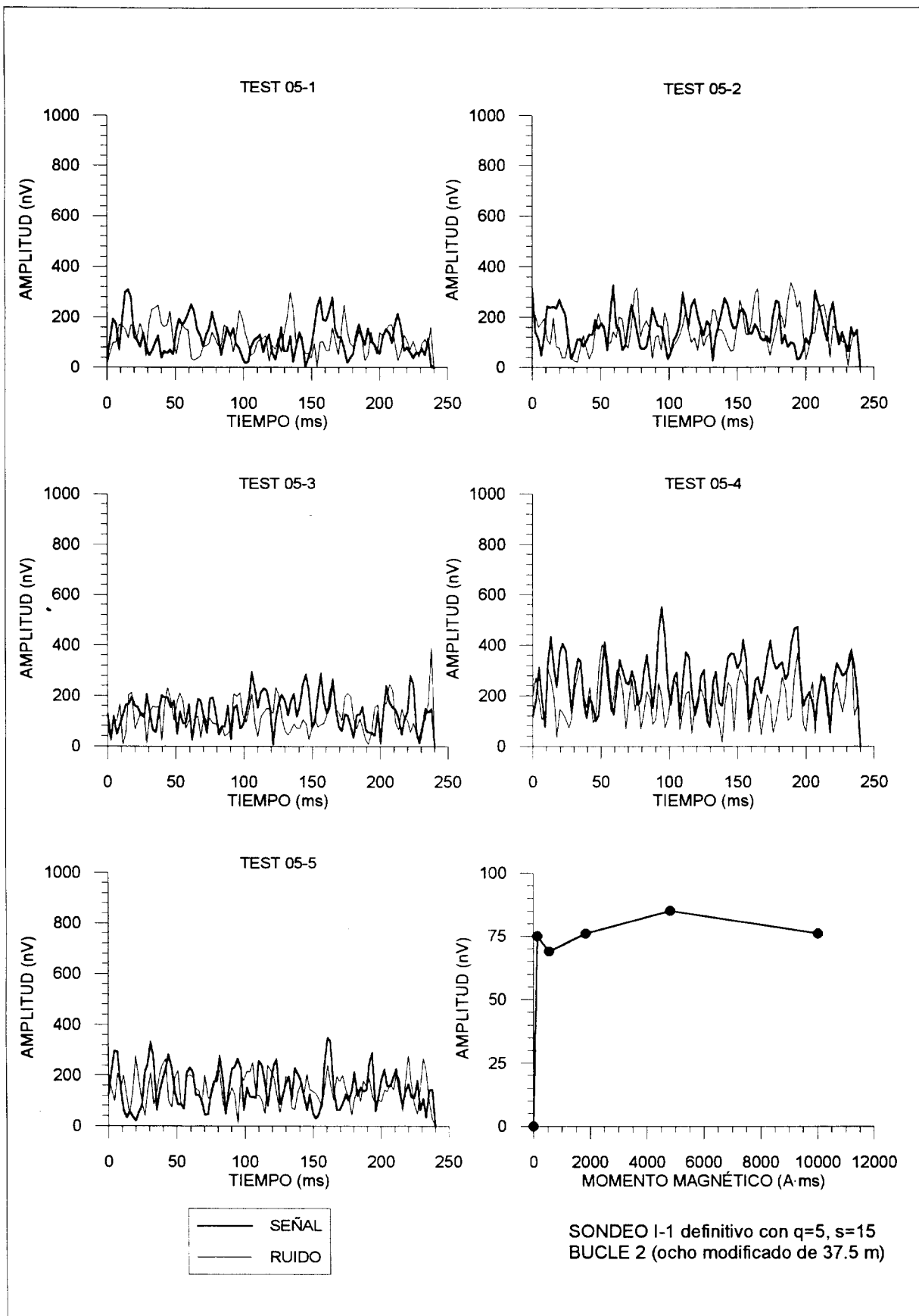


Fig. 9

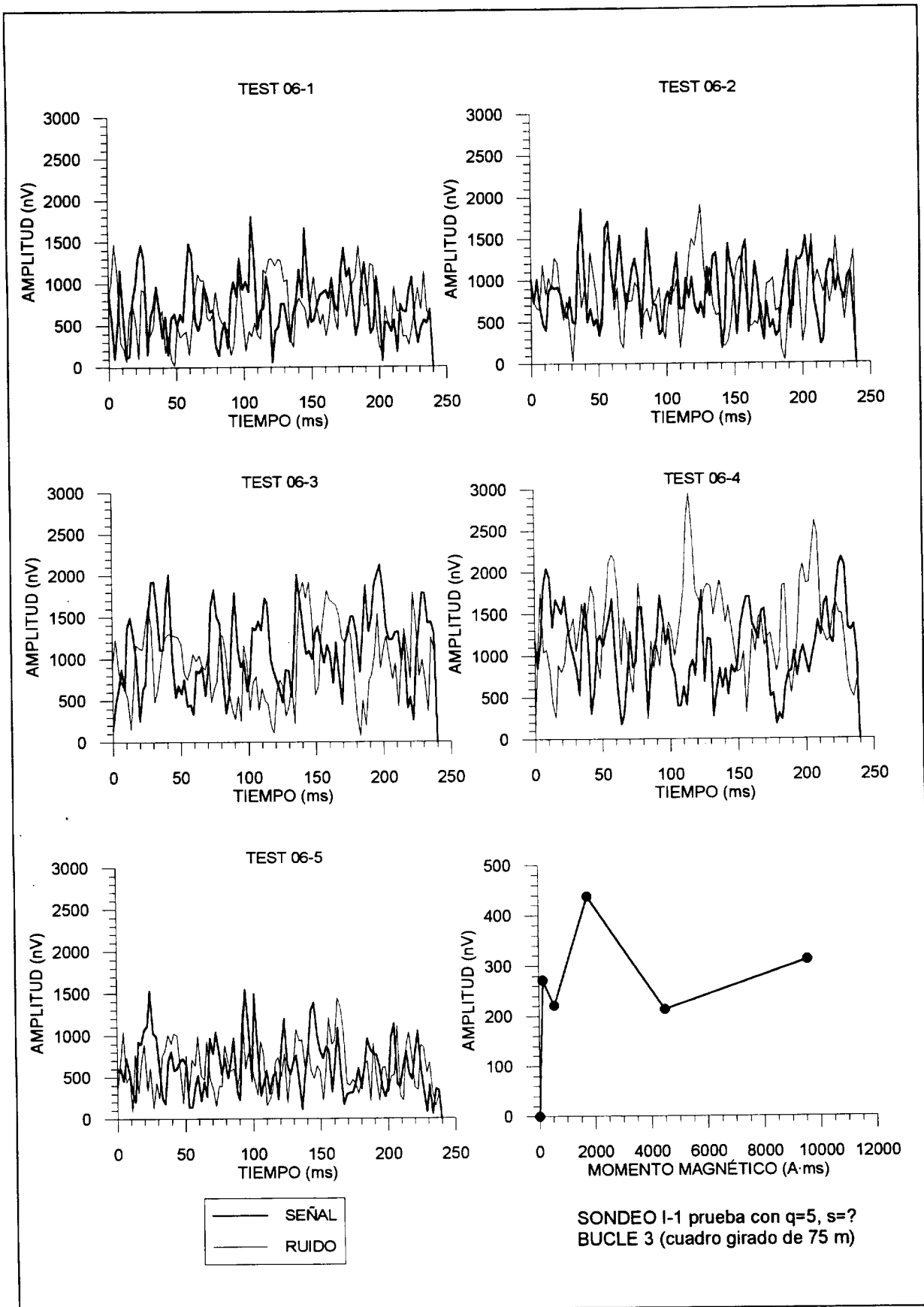


Fig. 10

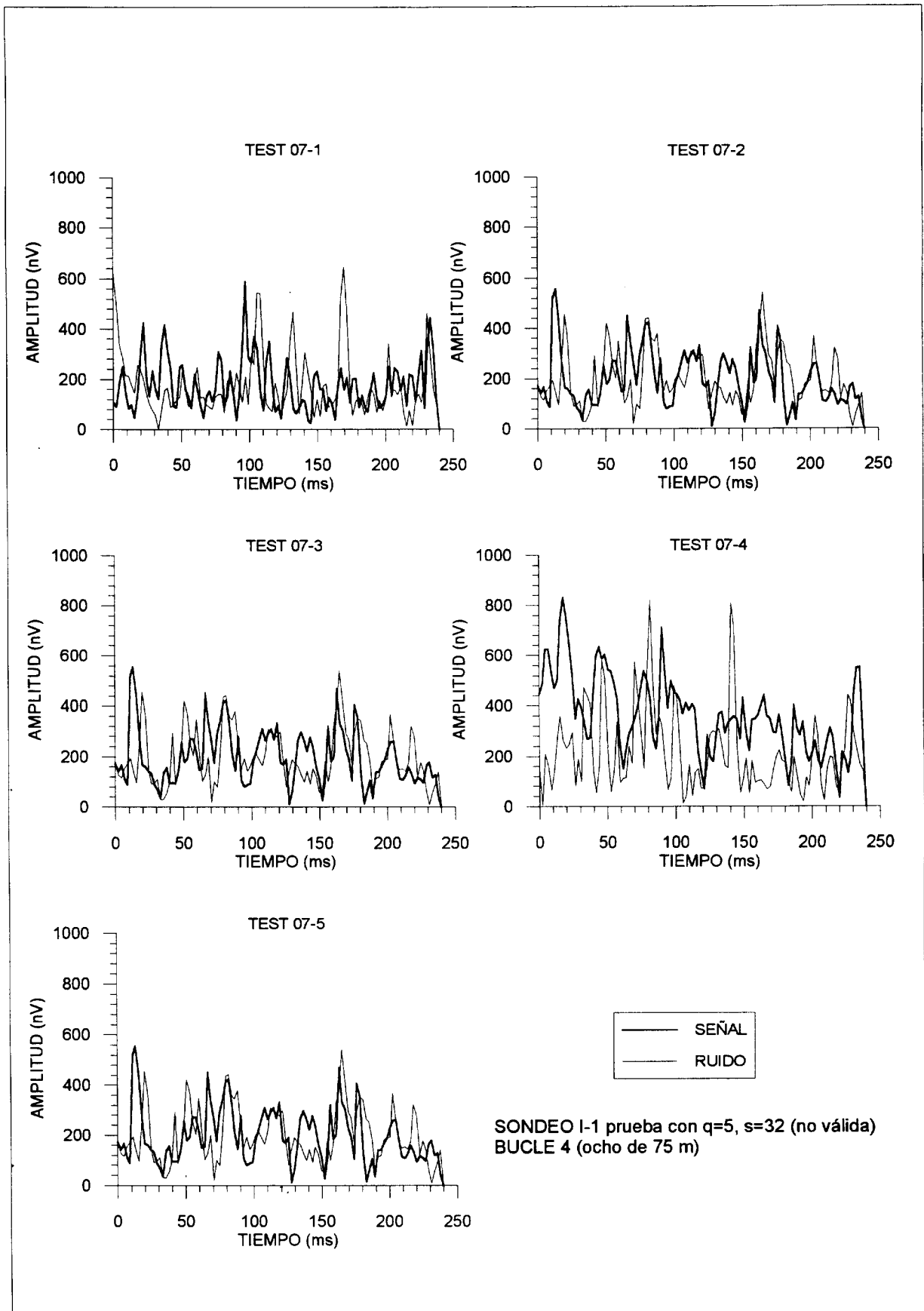


Fig. 11

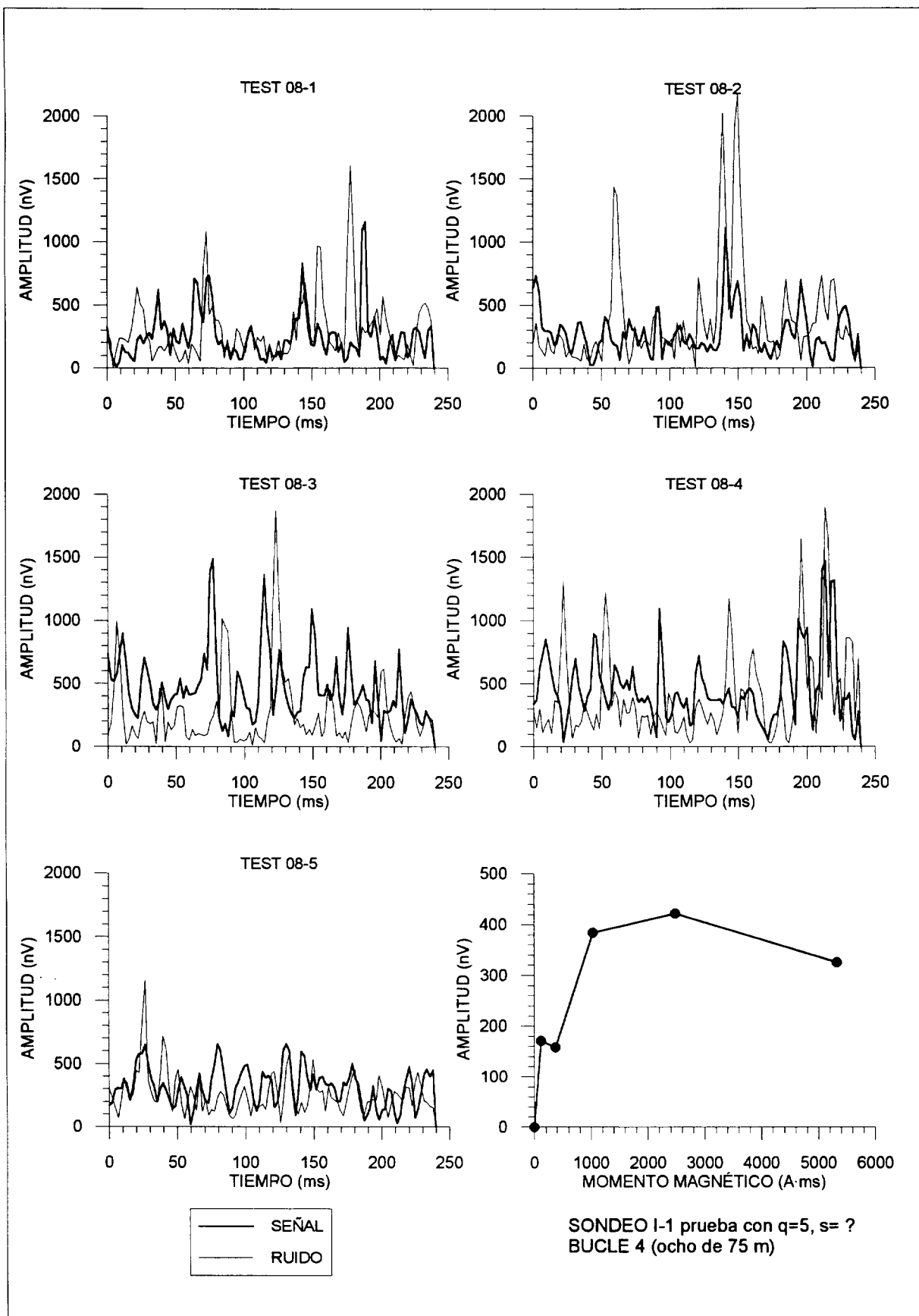


Fig. 12

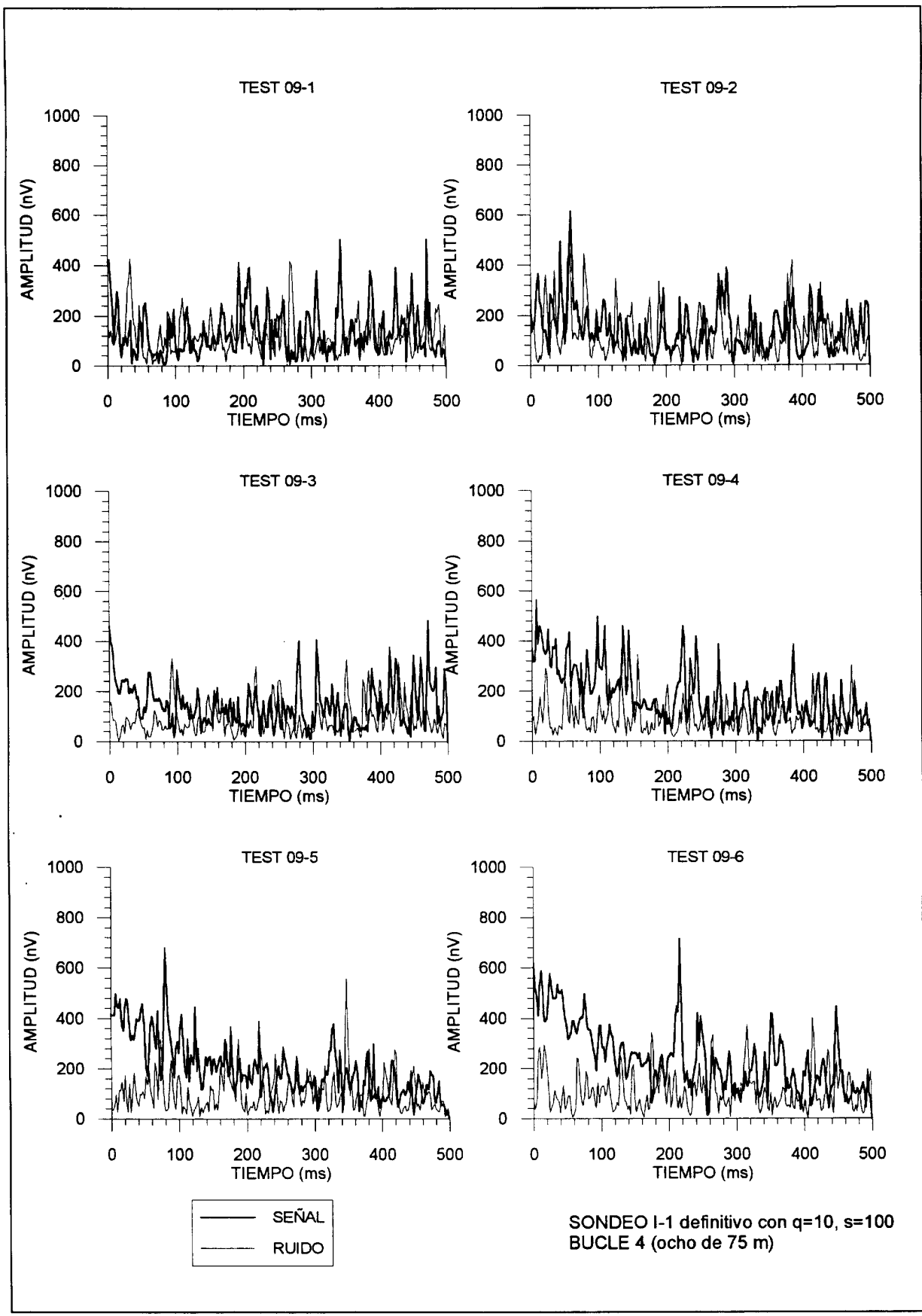


Fig. 13a

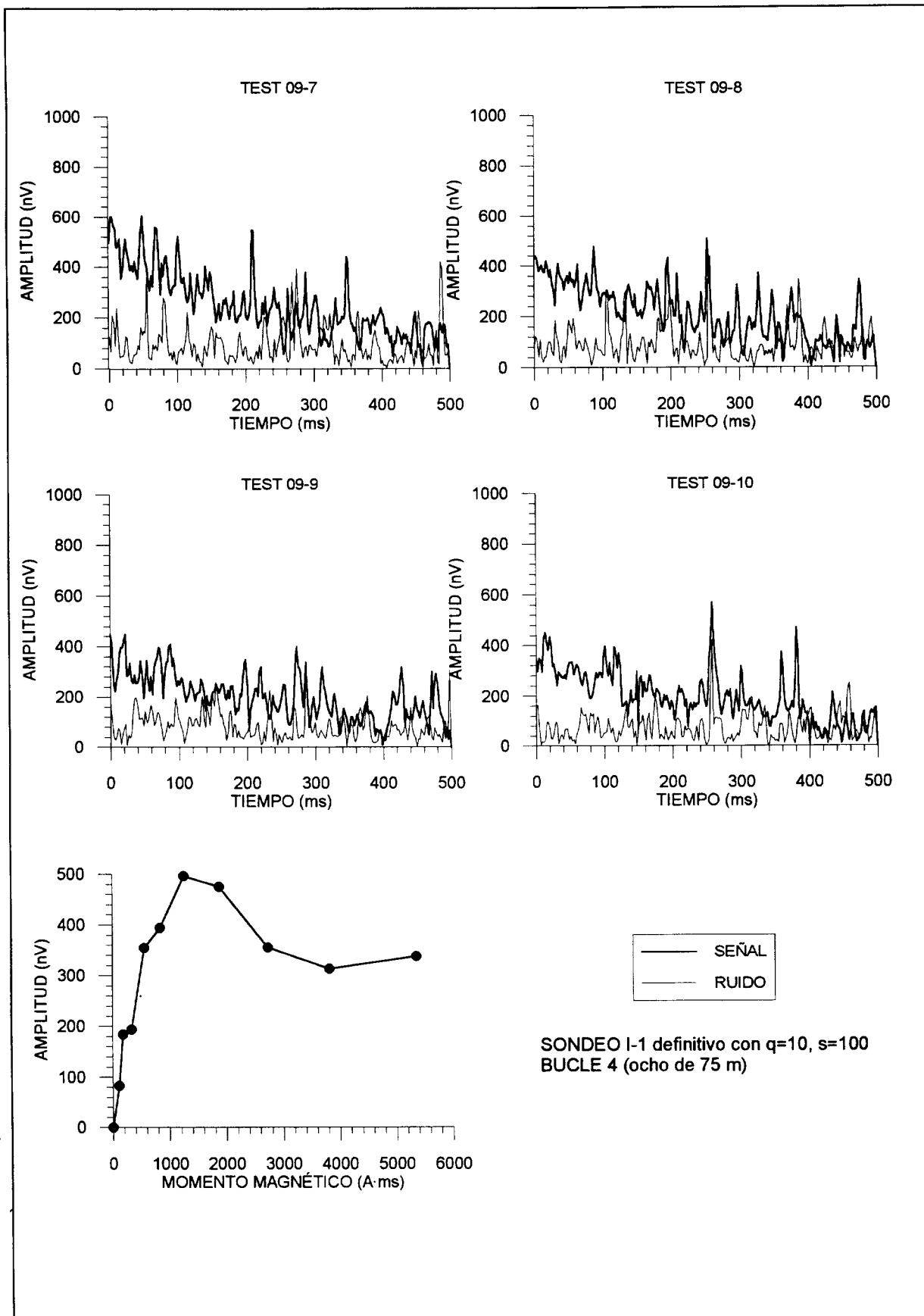


Fig. 13b

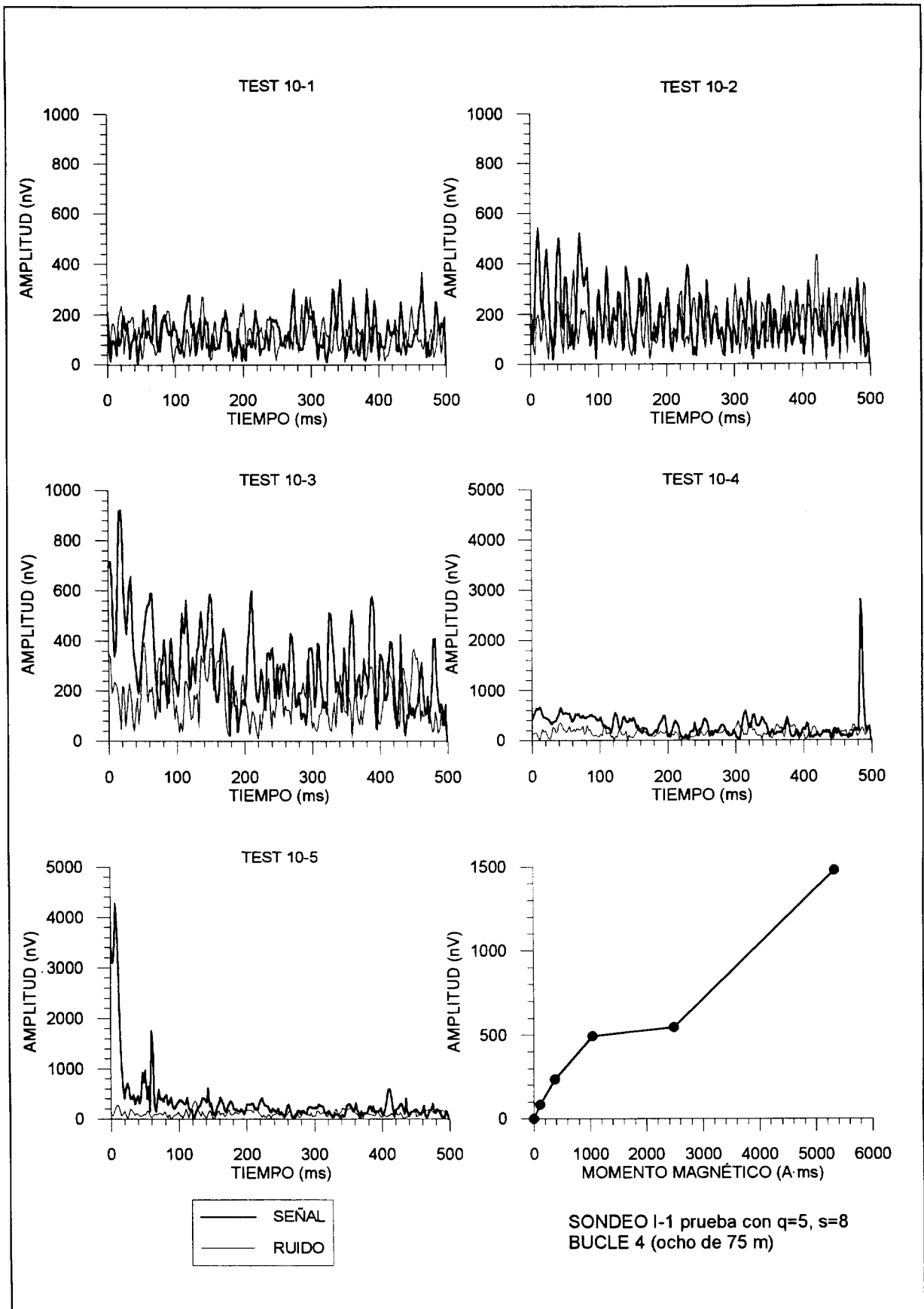


Fig. 14

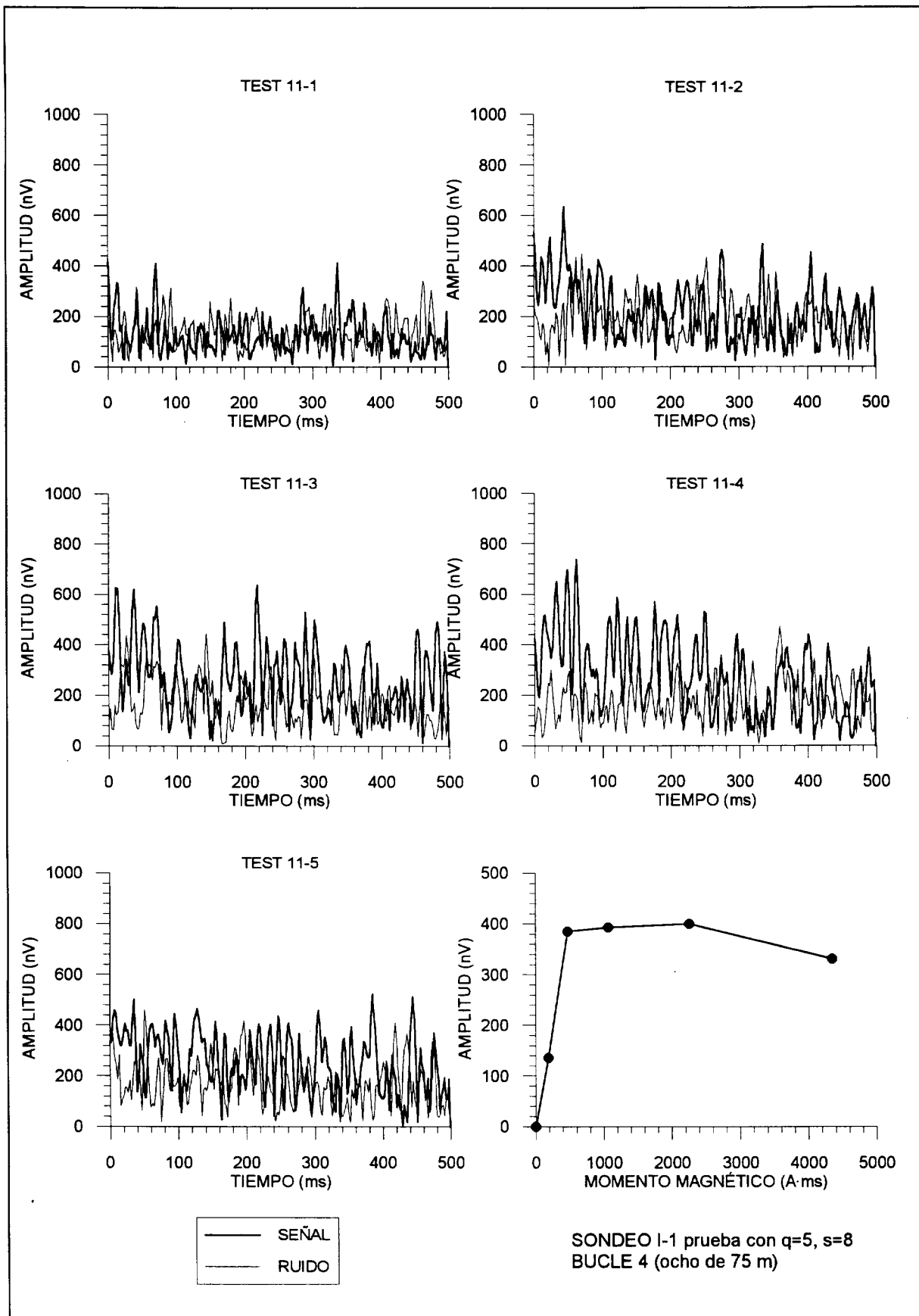


Fig. 15

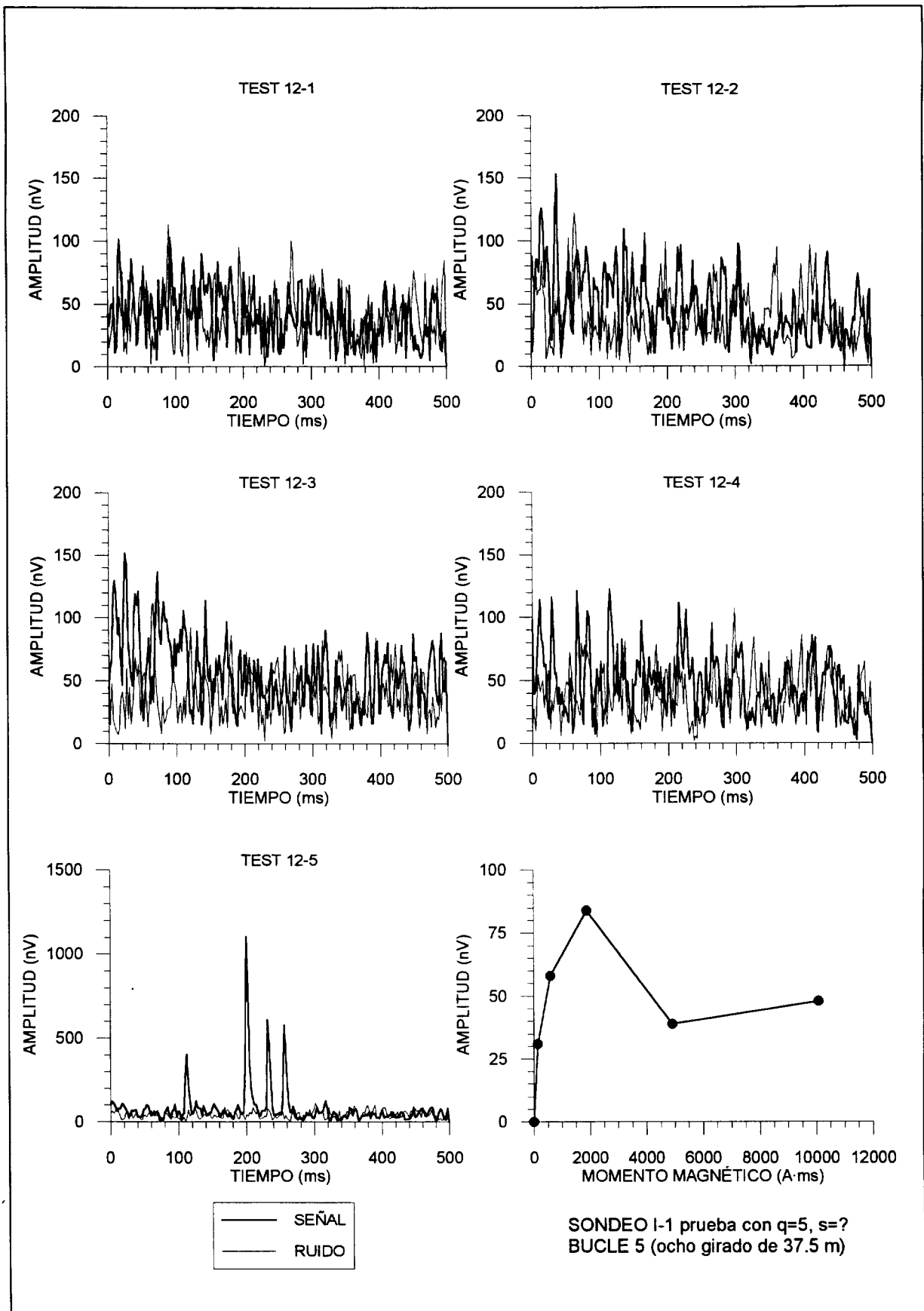
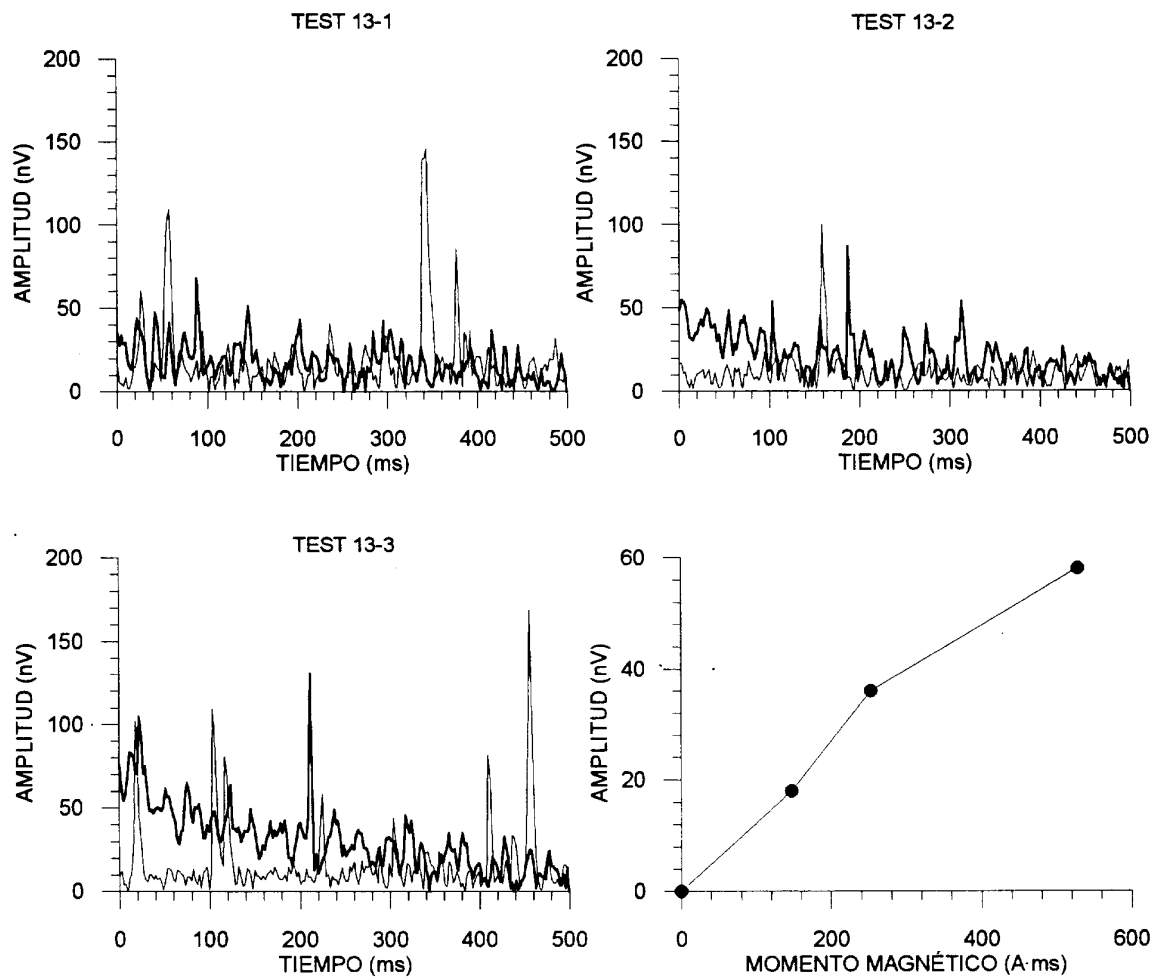


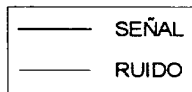
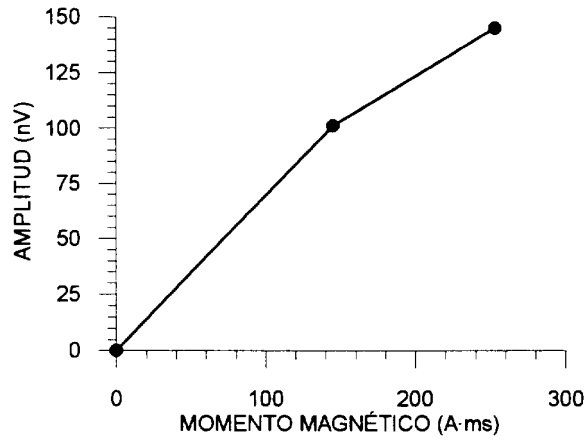
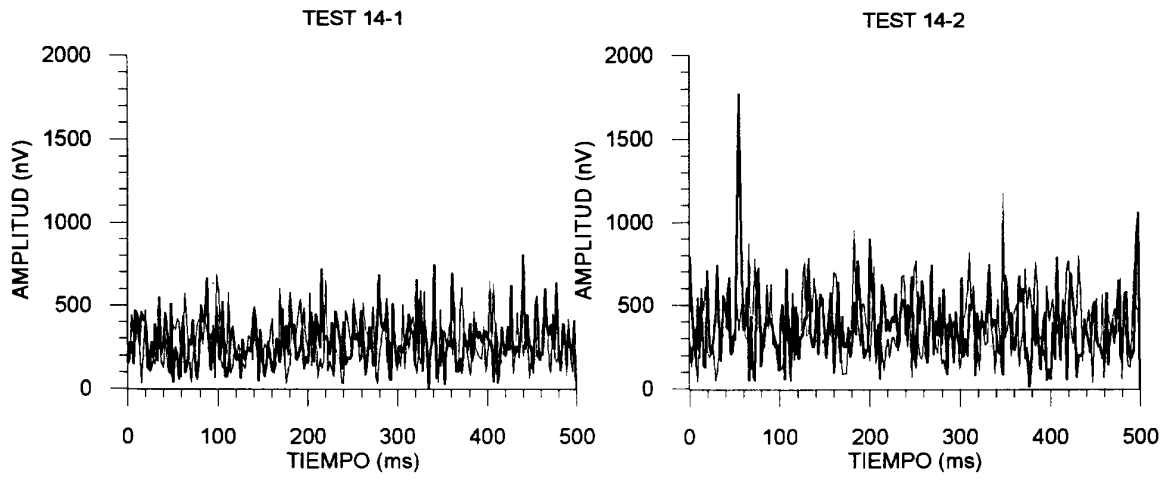
Fig. 16



— SEÑAL
 — RUIDO

SONDEO I-1 No válido. Interrumpido por desconexión de antena. $q=10$, $s=100$
 BUCLE 5 (ocho girado de 37.5 m)

Fig. 17



SONDEO I-1 prueba con $q=10$, $s=50$ (interrumpido)
 BUCLE 5 (ocho de 37.5 m)

Fig. 18

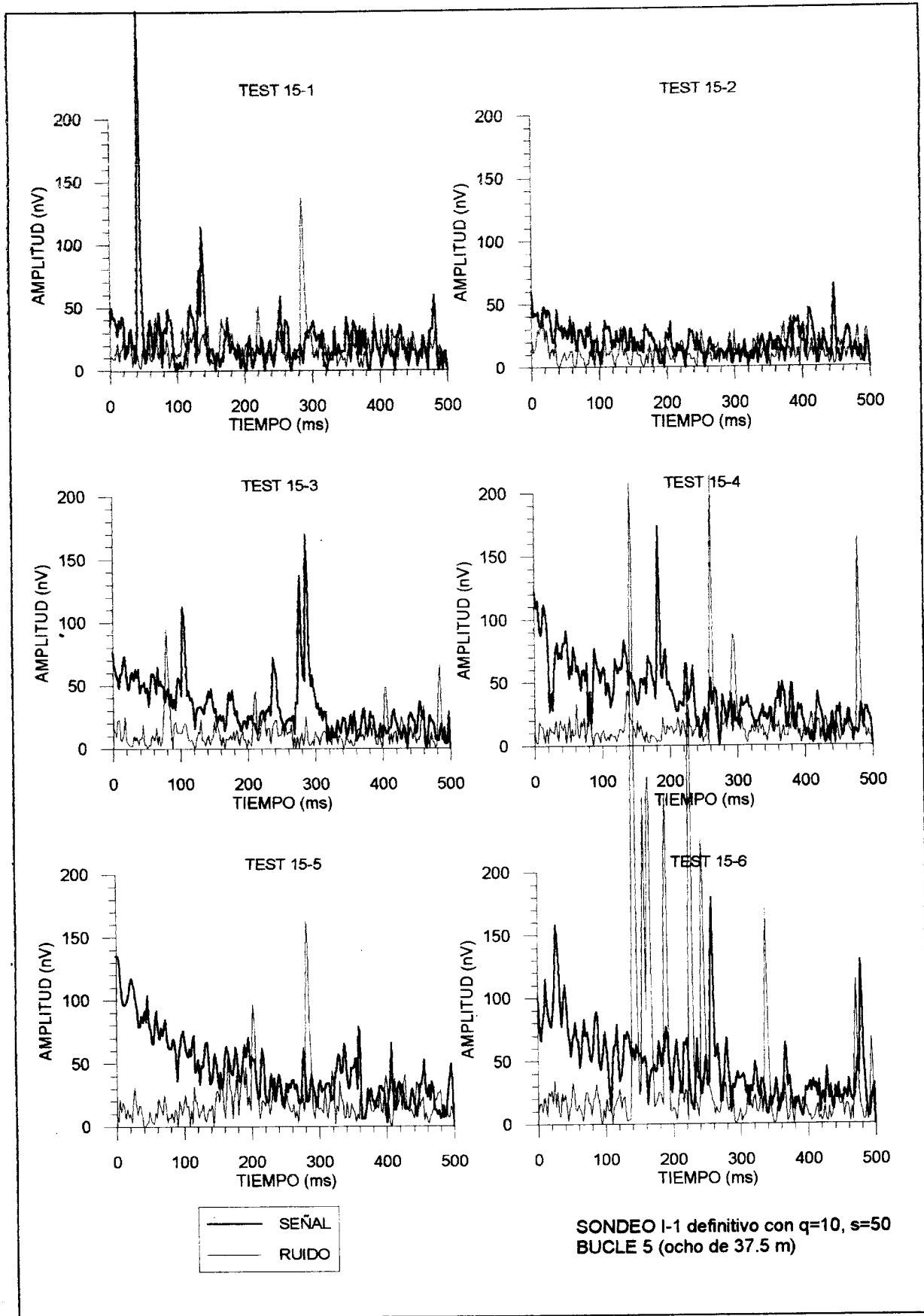


Fig. 19a

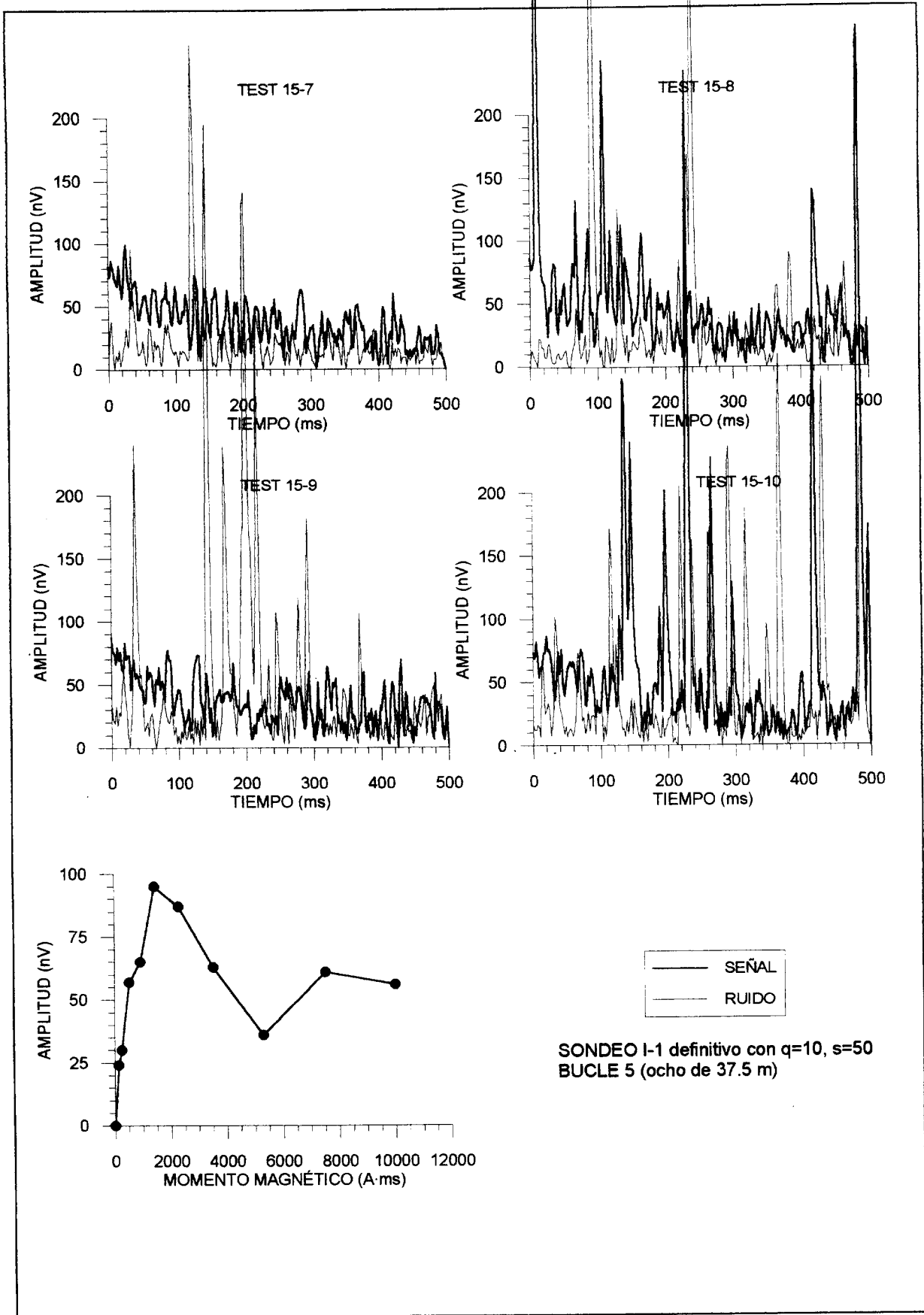


Fig. 19b

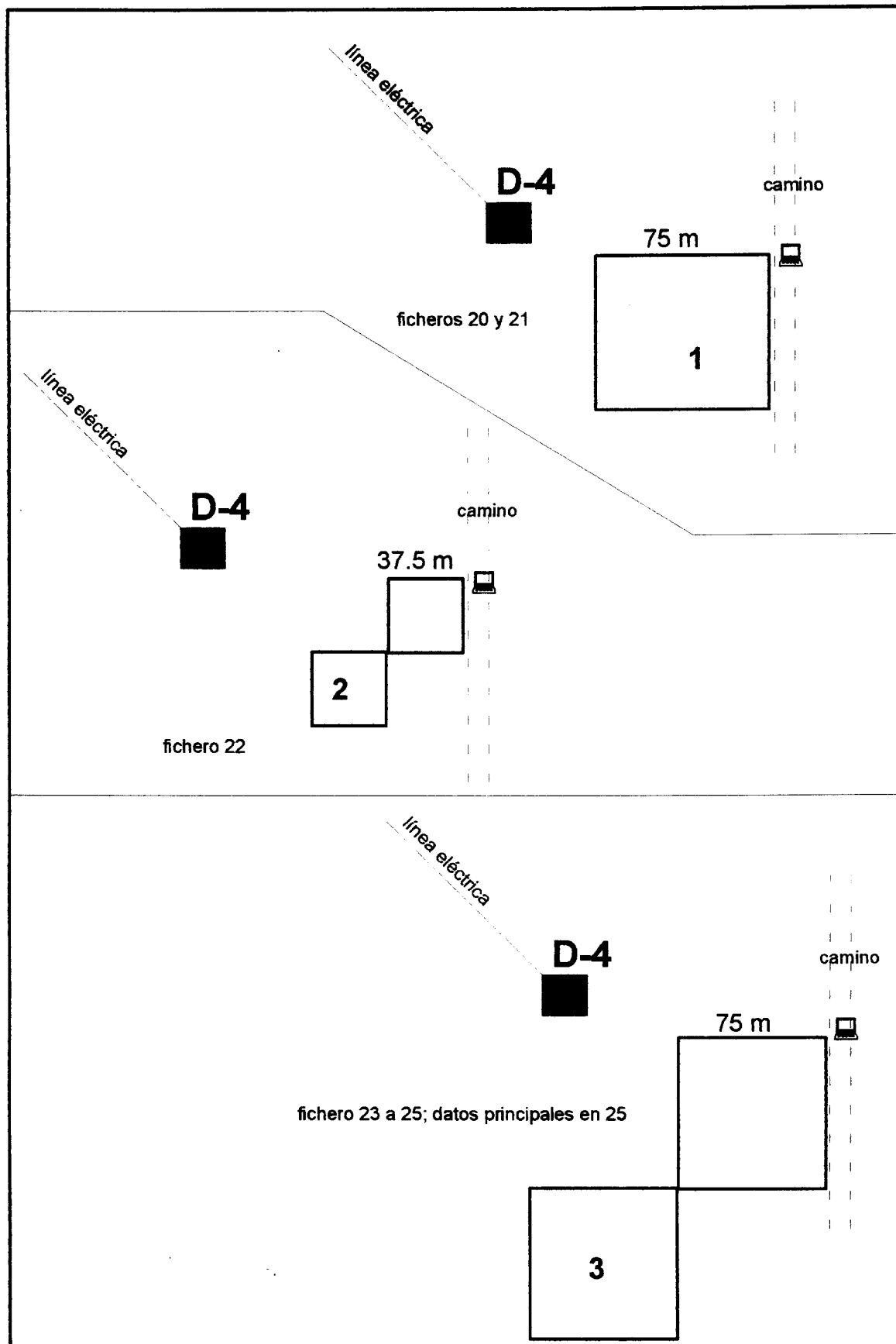


Fig. 20 Esquema de dispositivos y ficheros asociados en el sondeo D-4

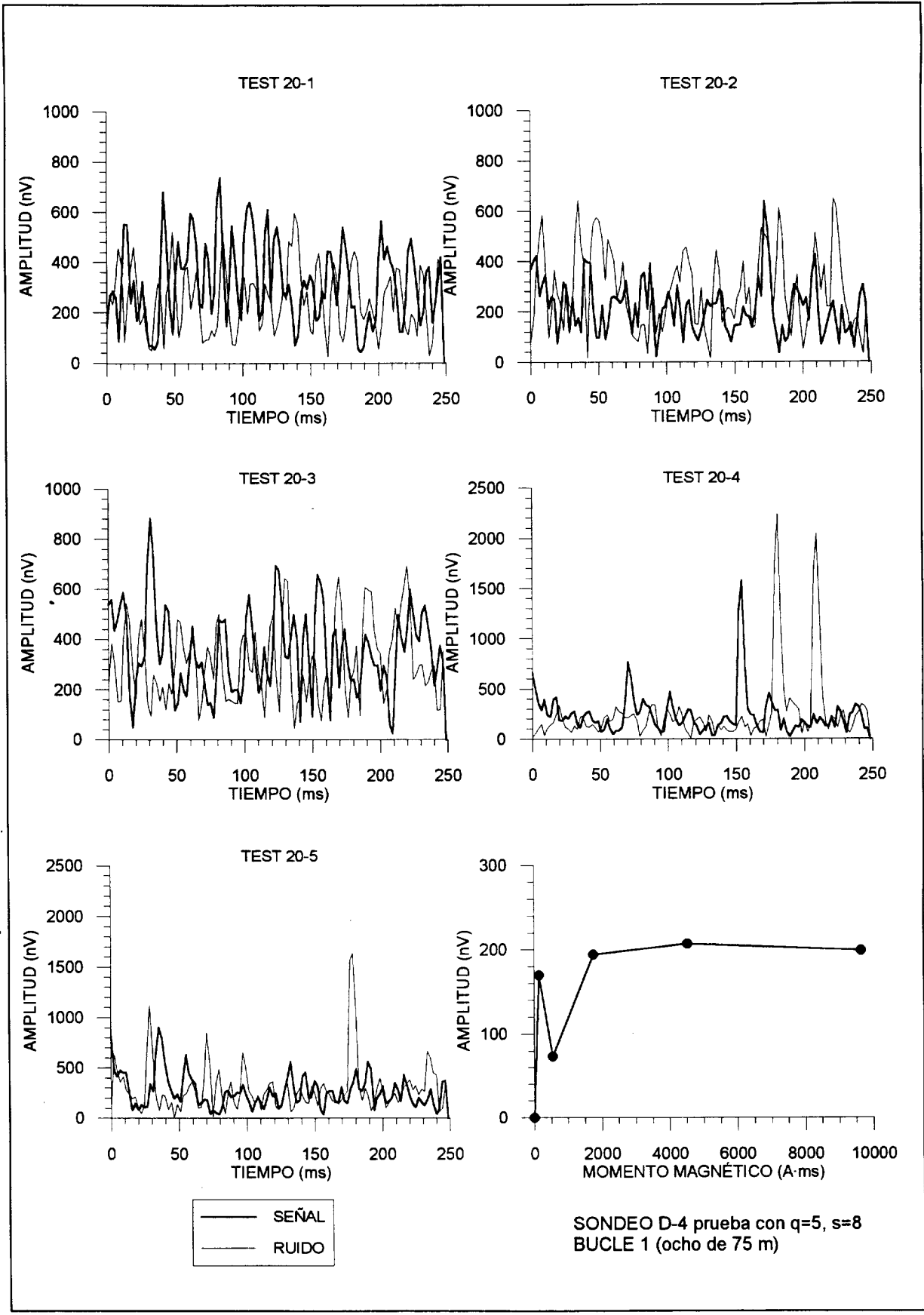


Fig. 21

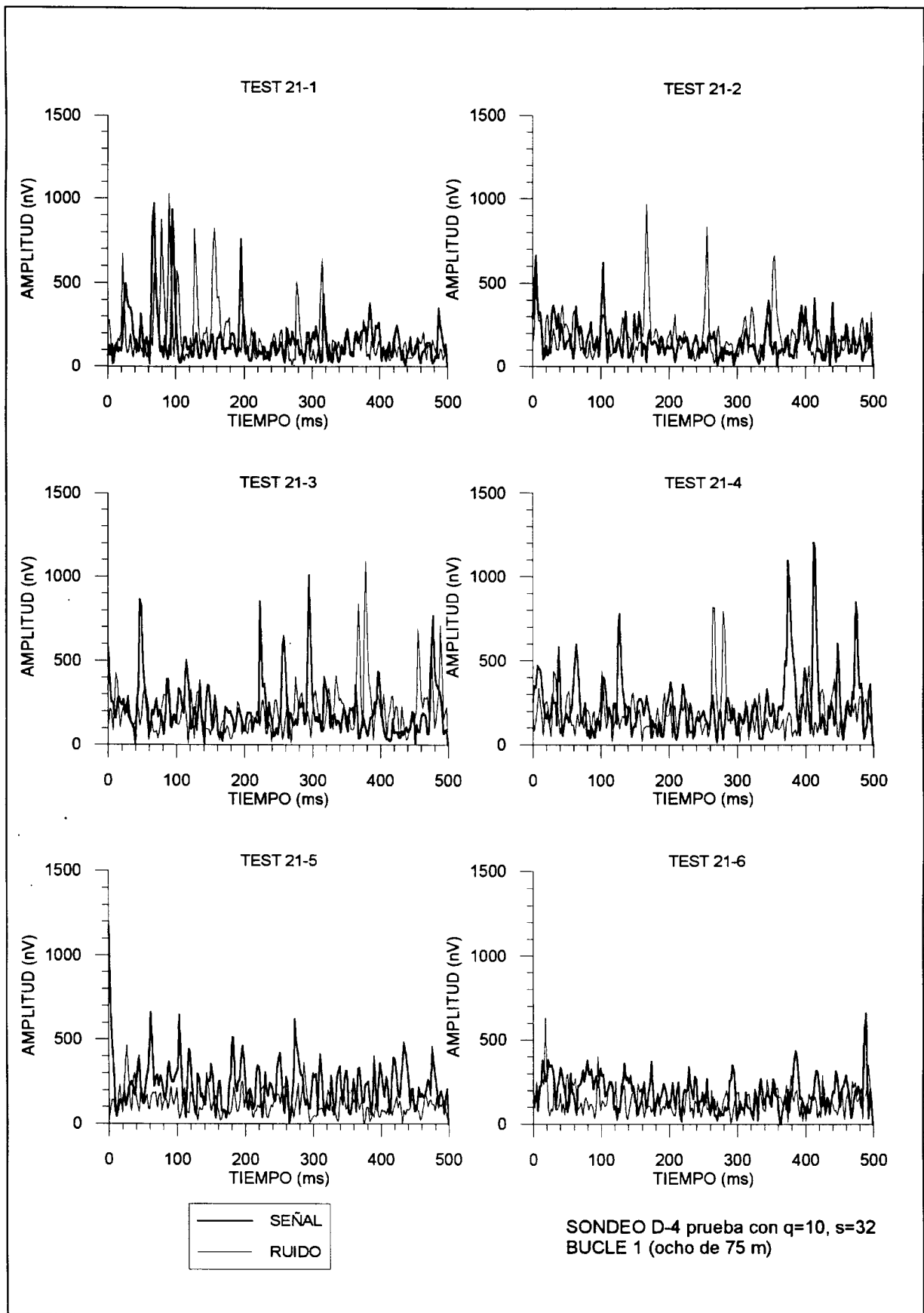


Fig. 22a

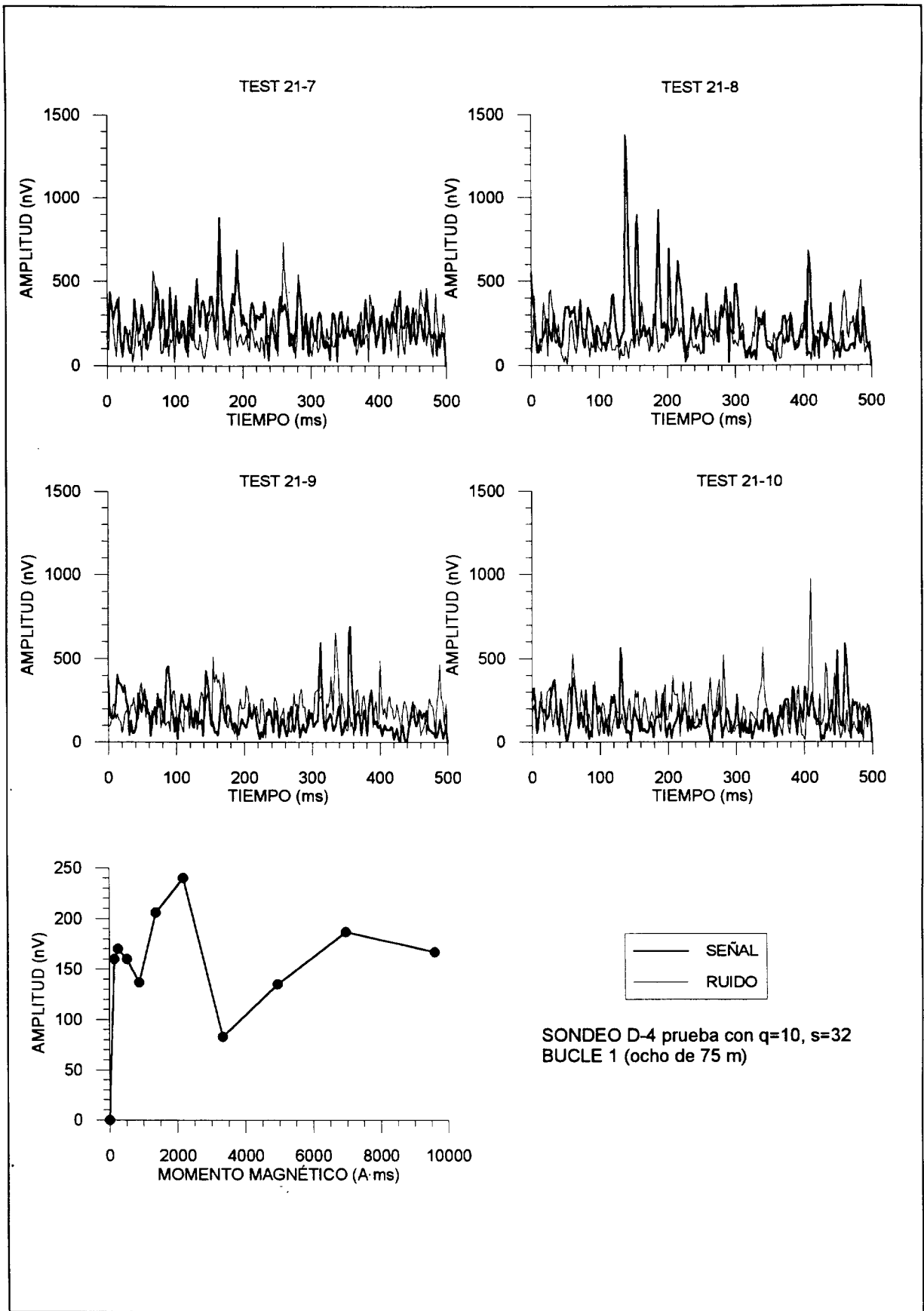


Fig. 22b

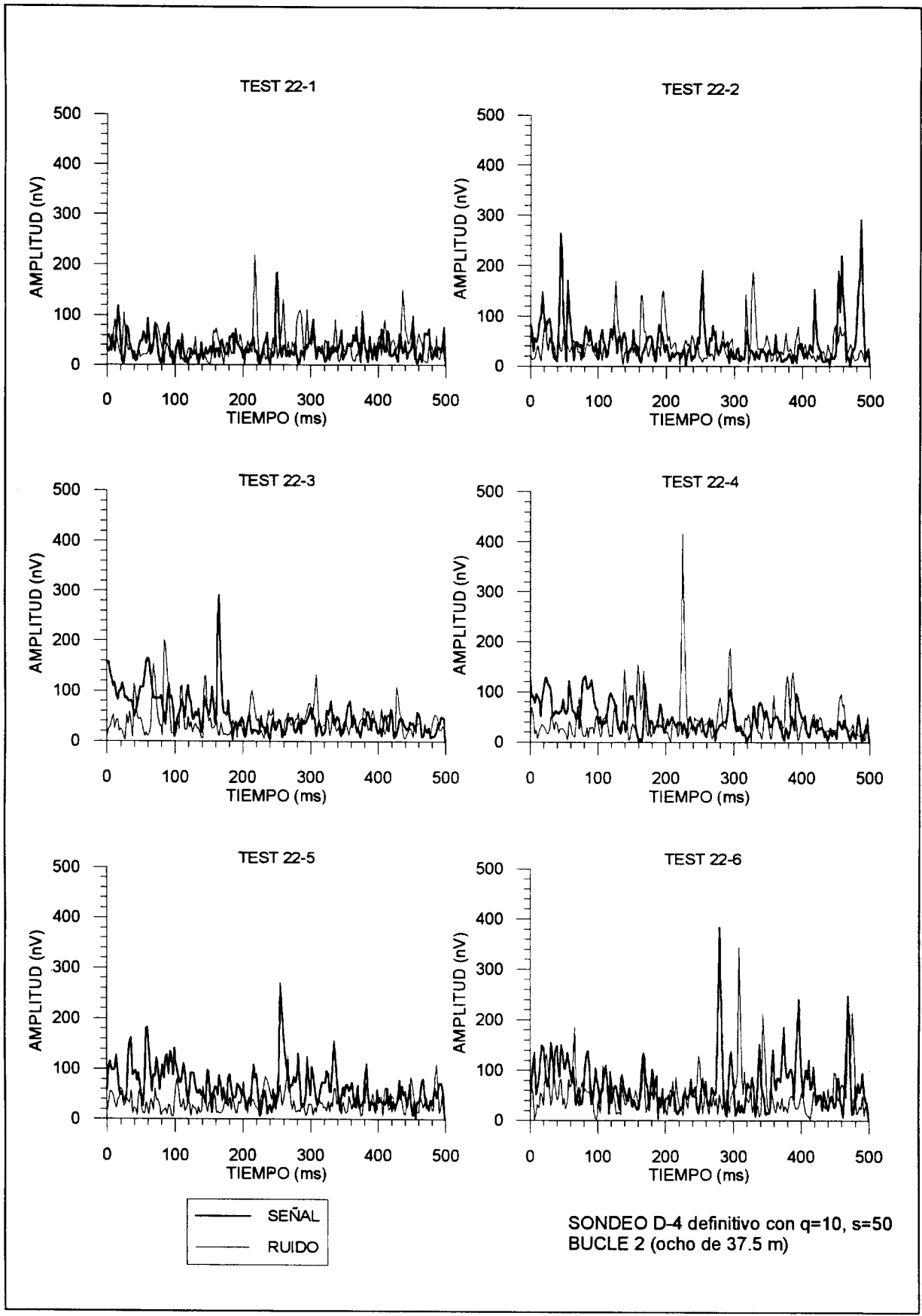


Fig. 23a

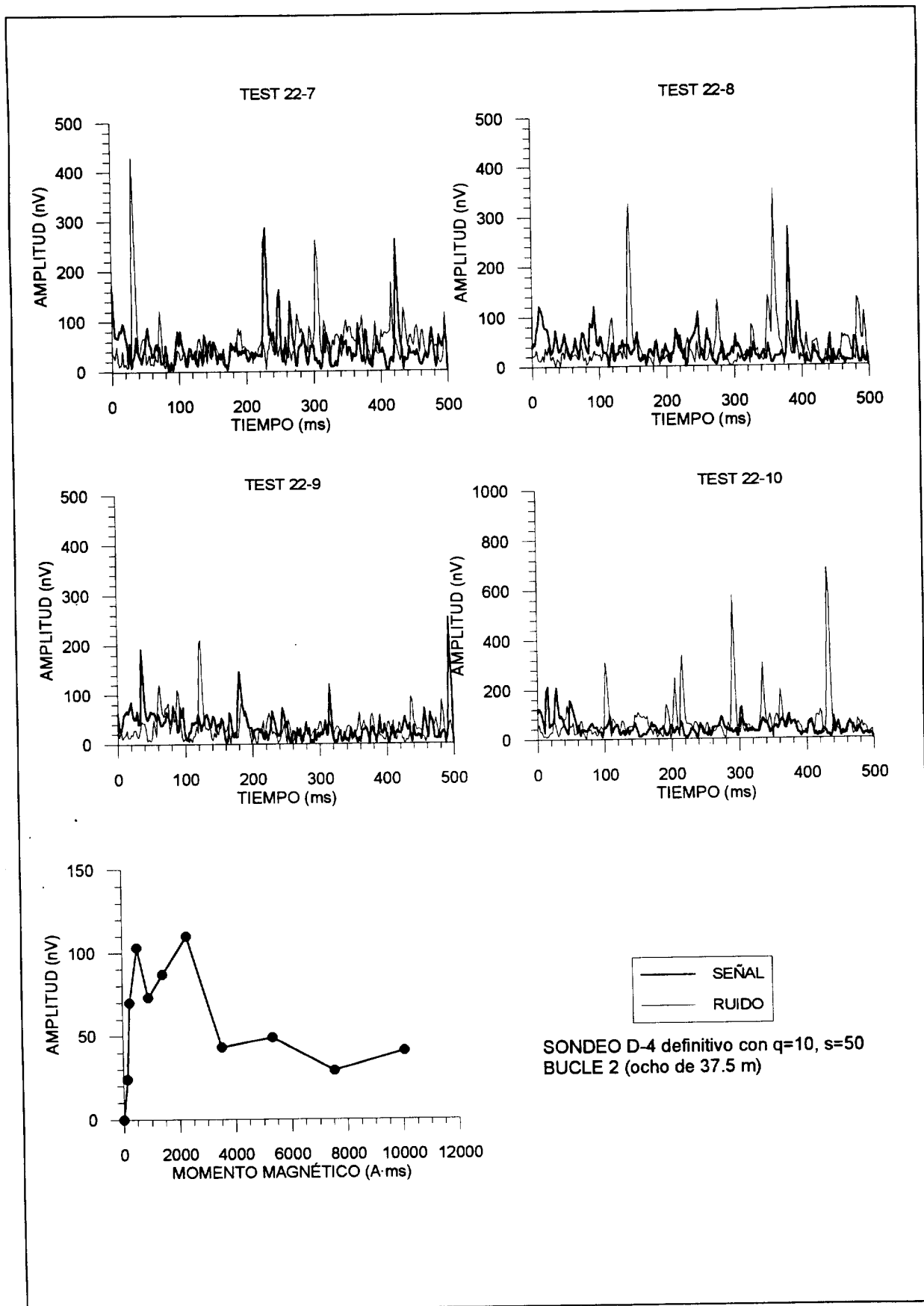


Fig. 23b

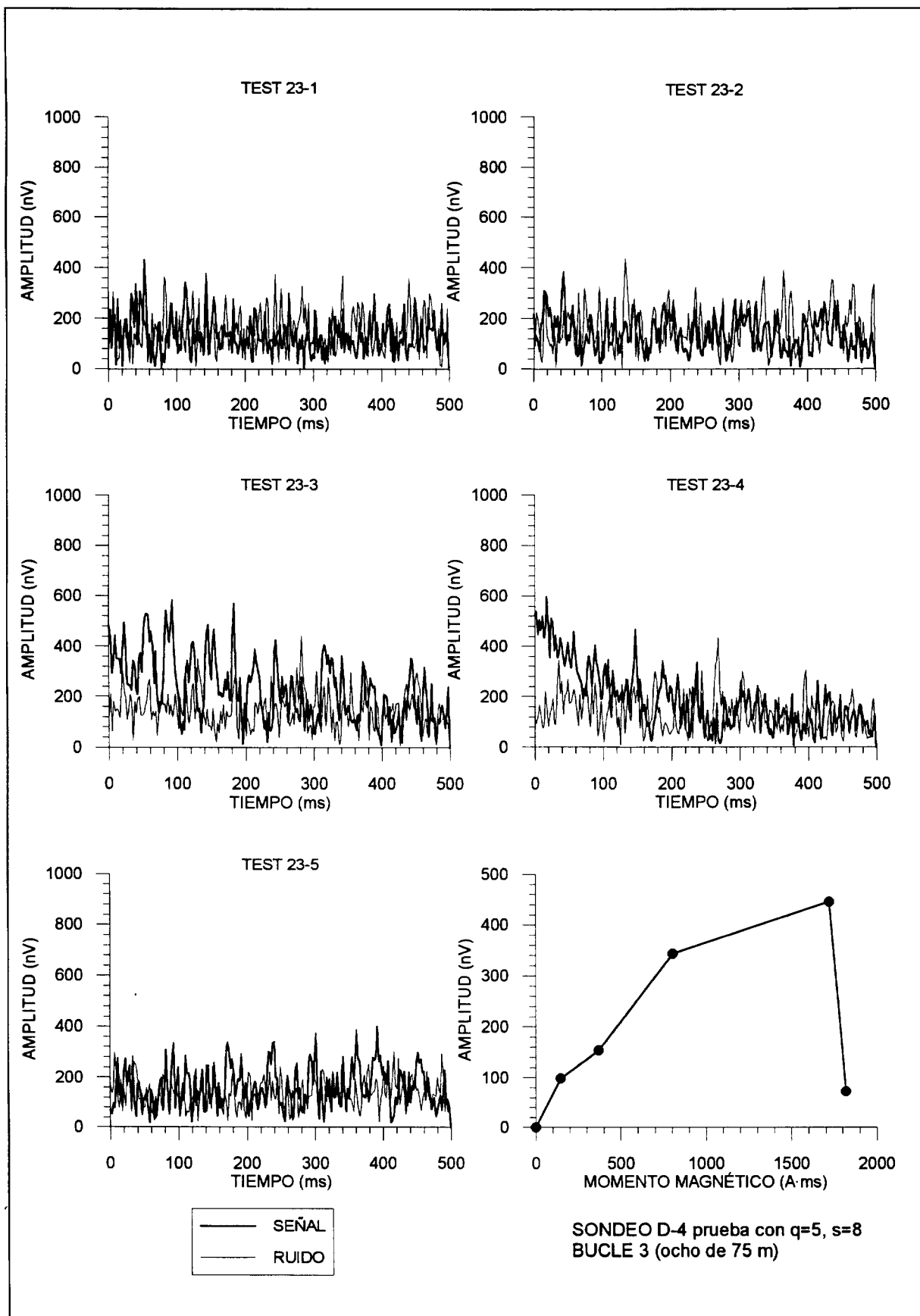


Fig. 24

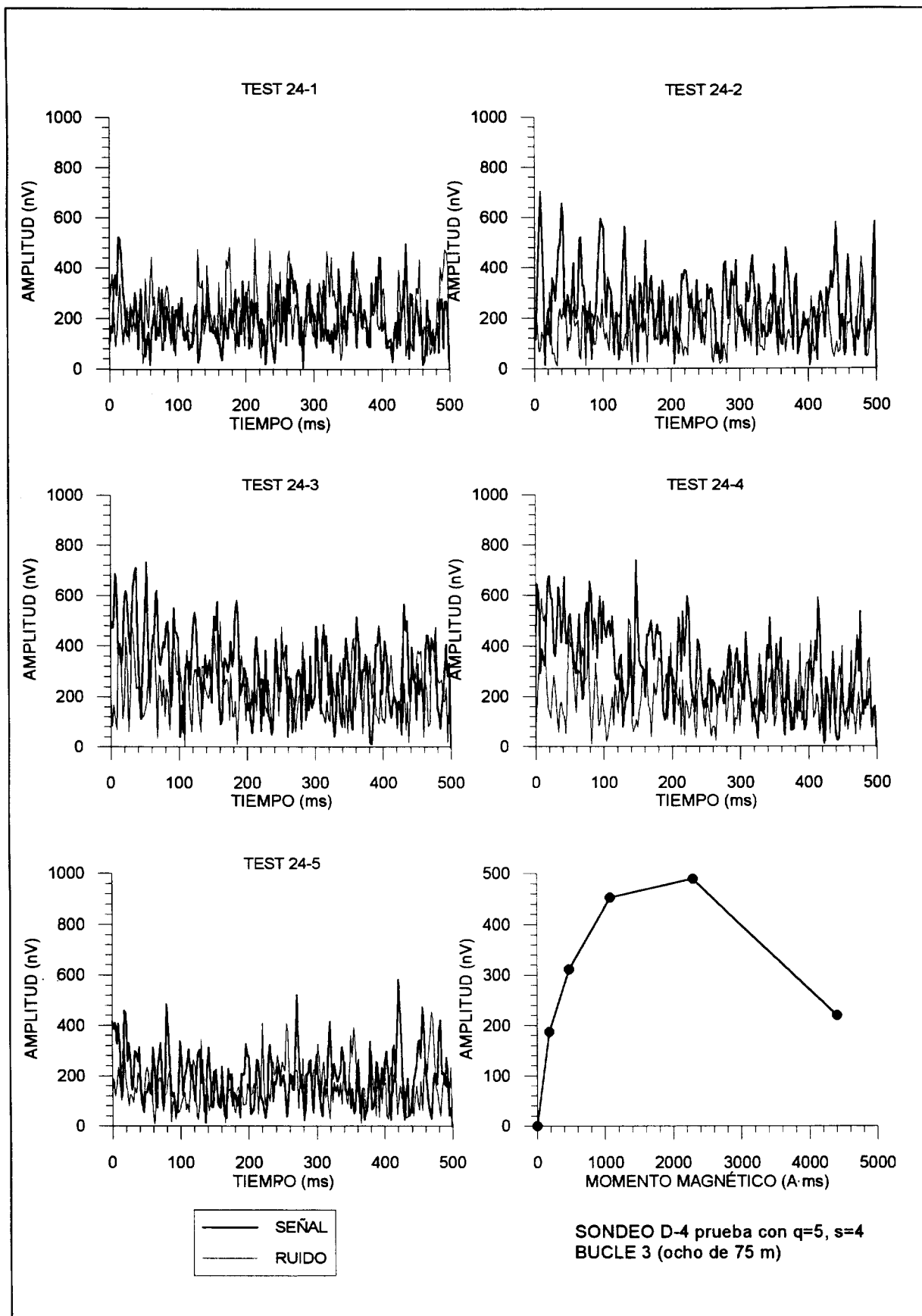


Fig. 25

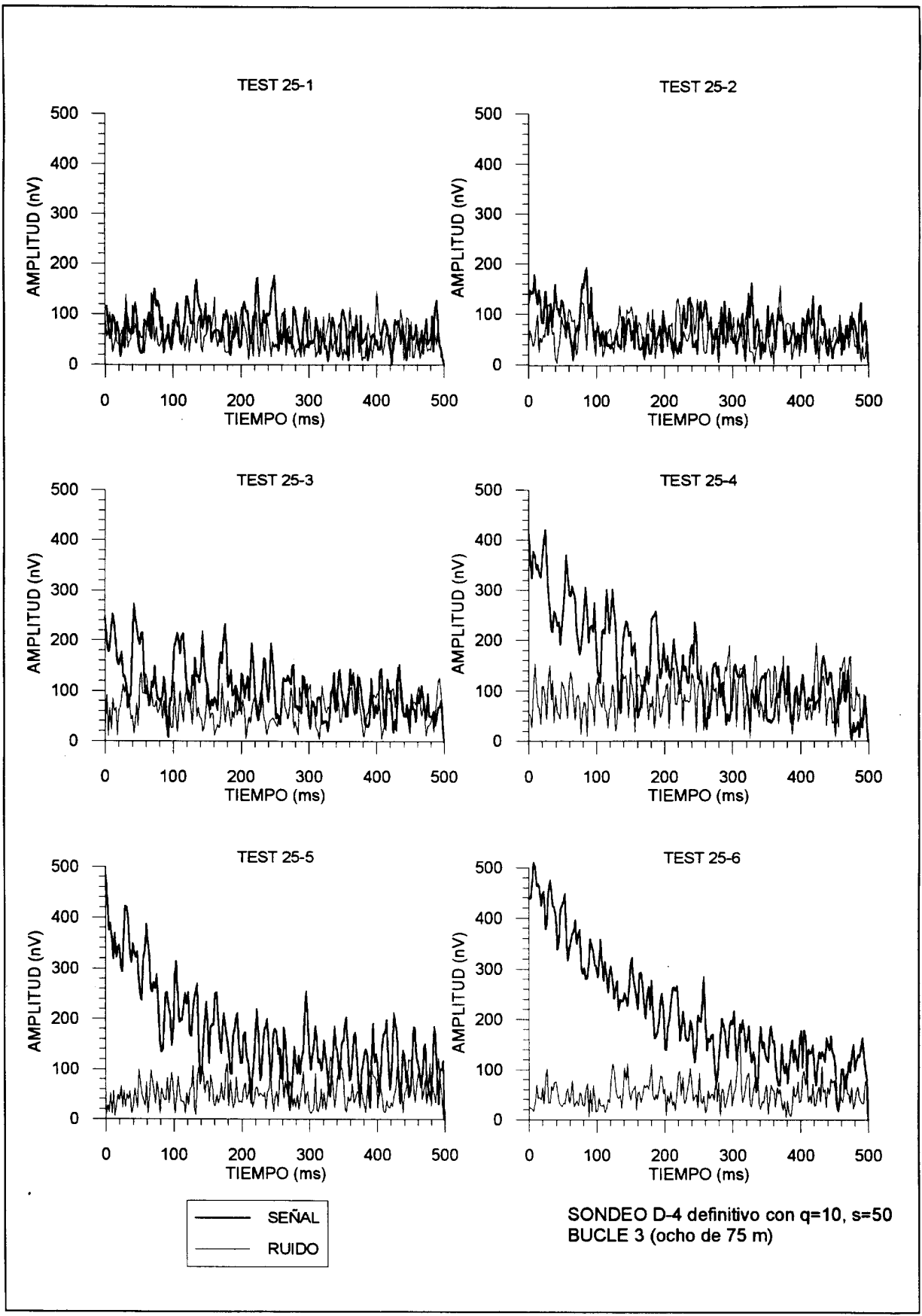


Fig. 26a

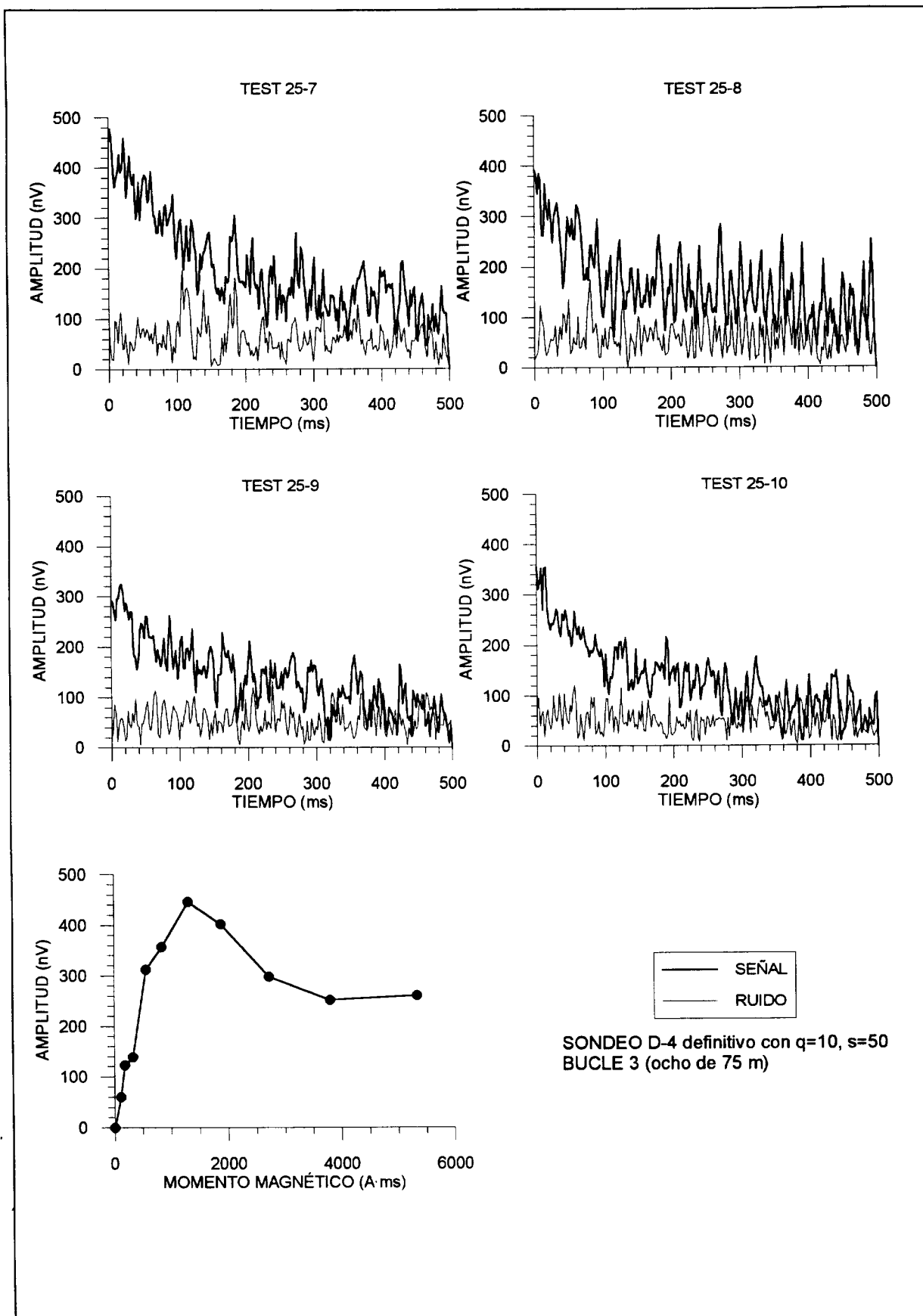


Fig. 26b

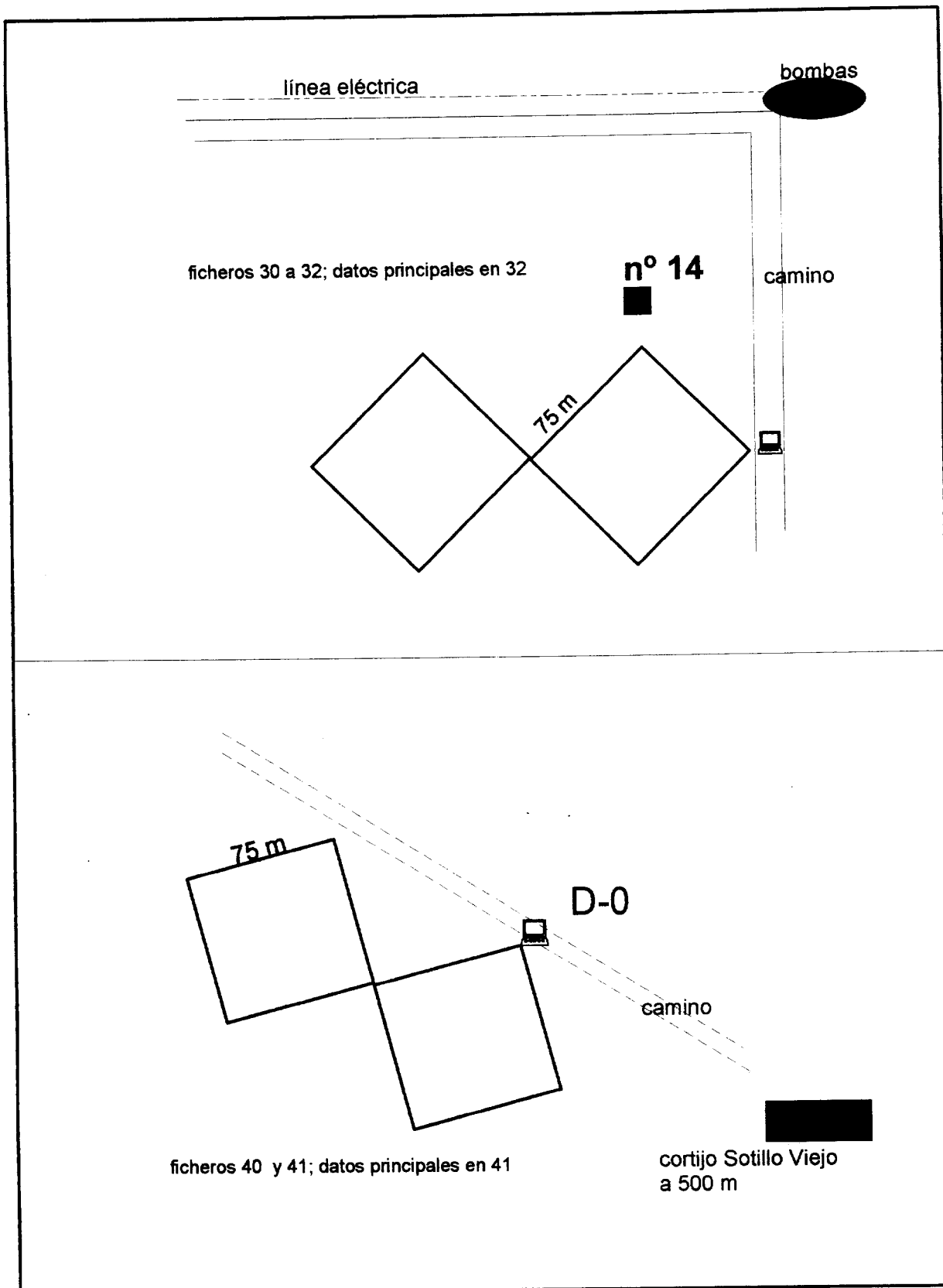


Fig. 27 Esquema de dispositivos y ficheros asociados en los sondeos 14 y D0 (Sotillo)

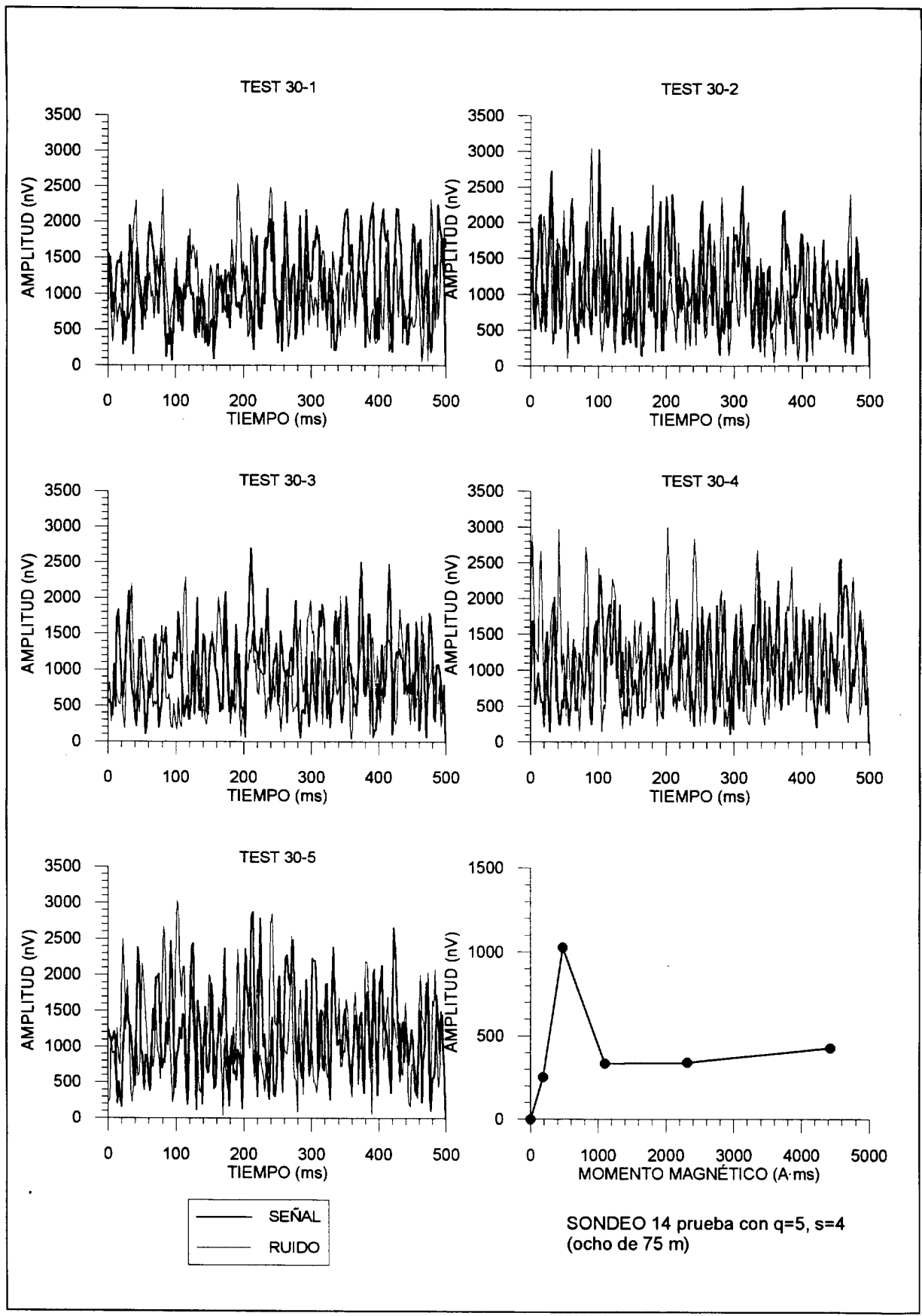


Fig. 28

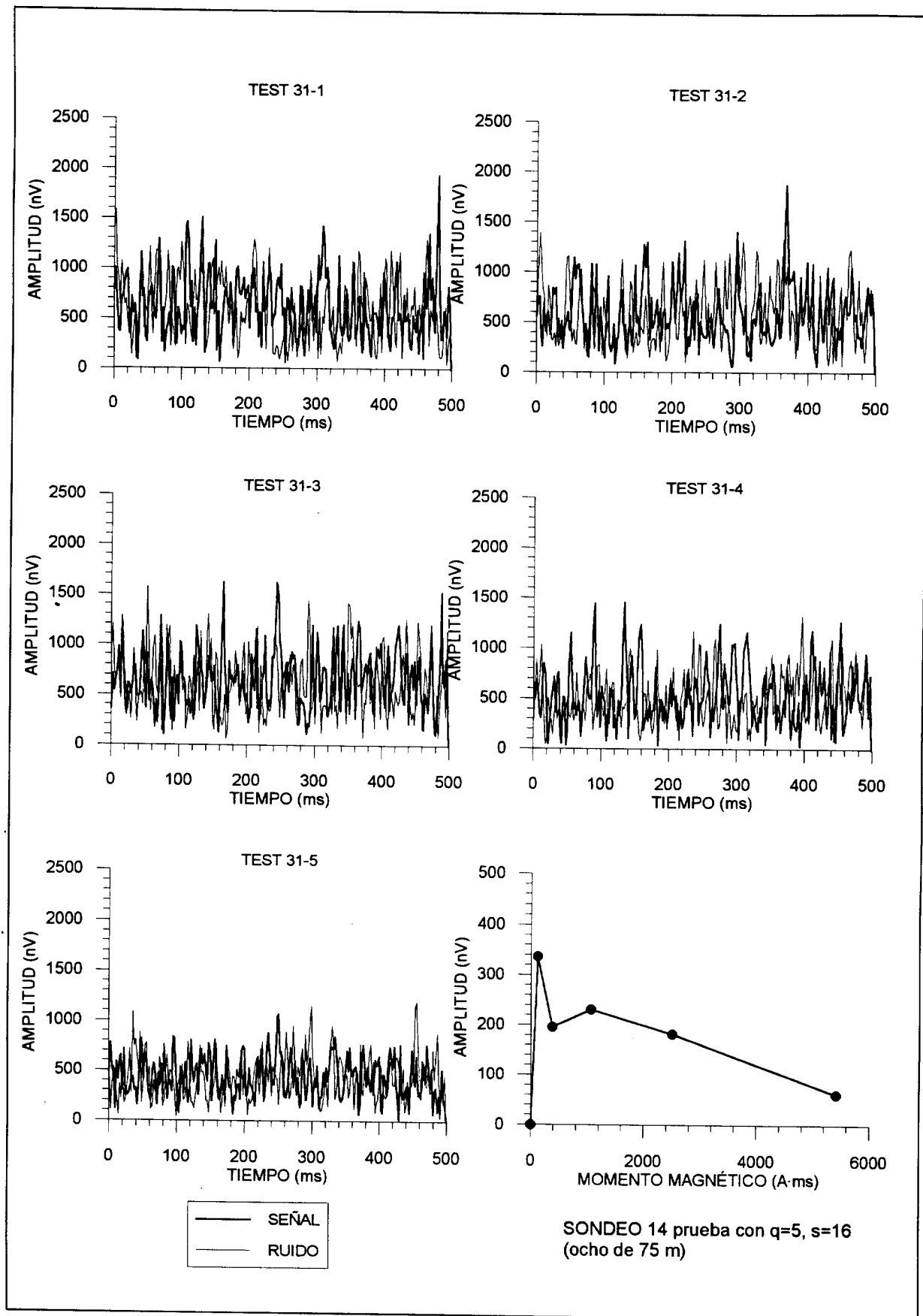


Fig. 29

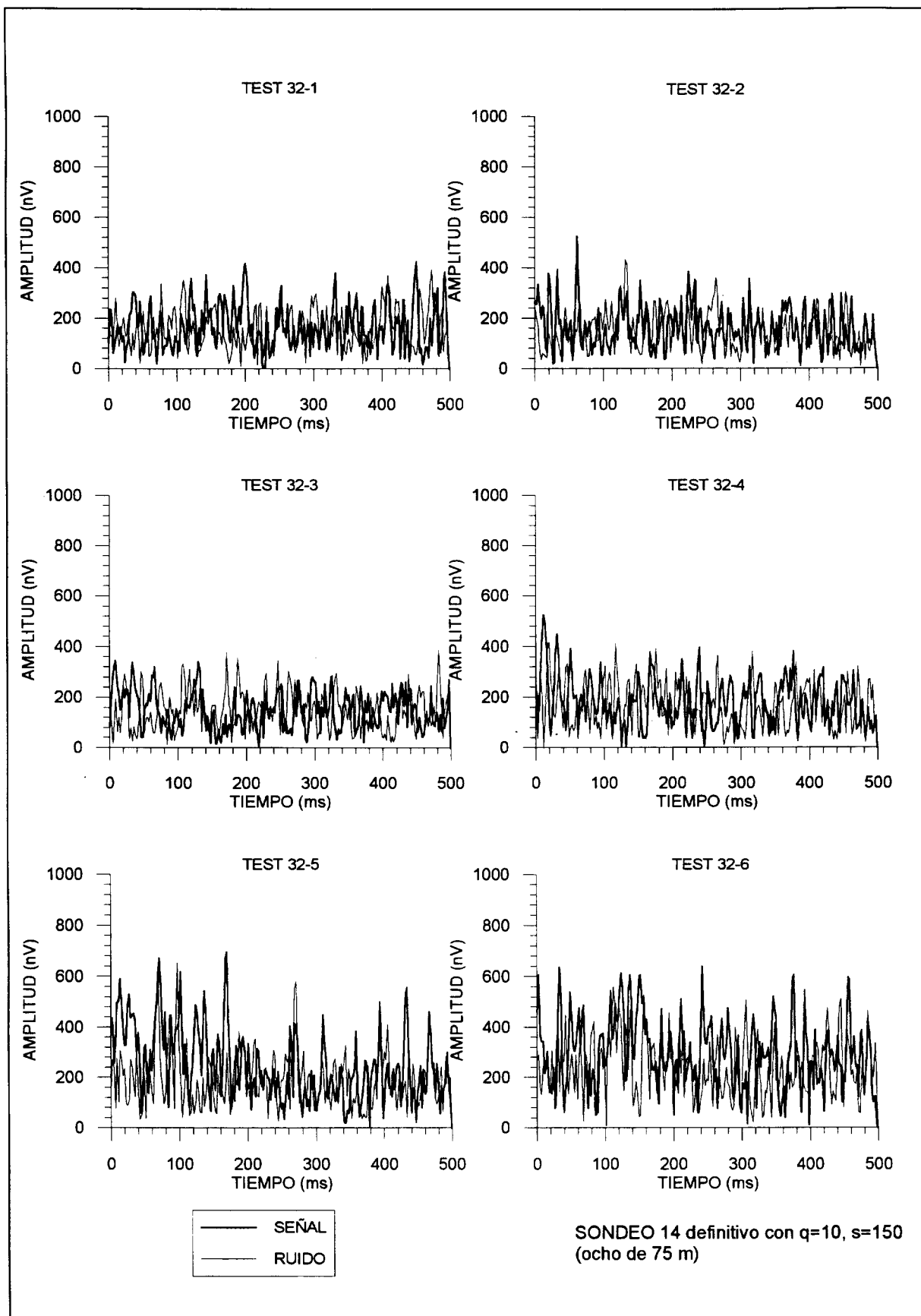


Fig. 30a

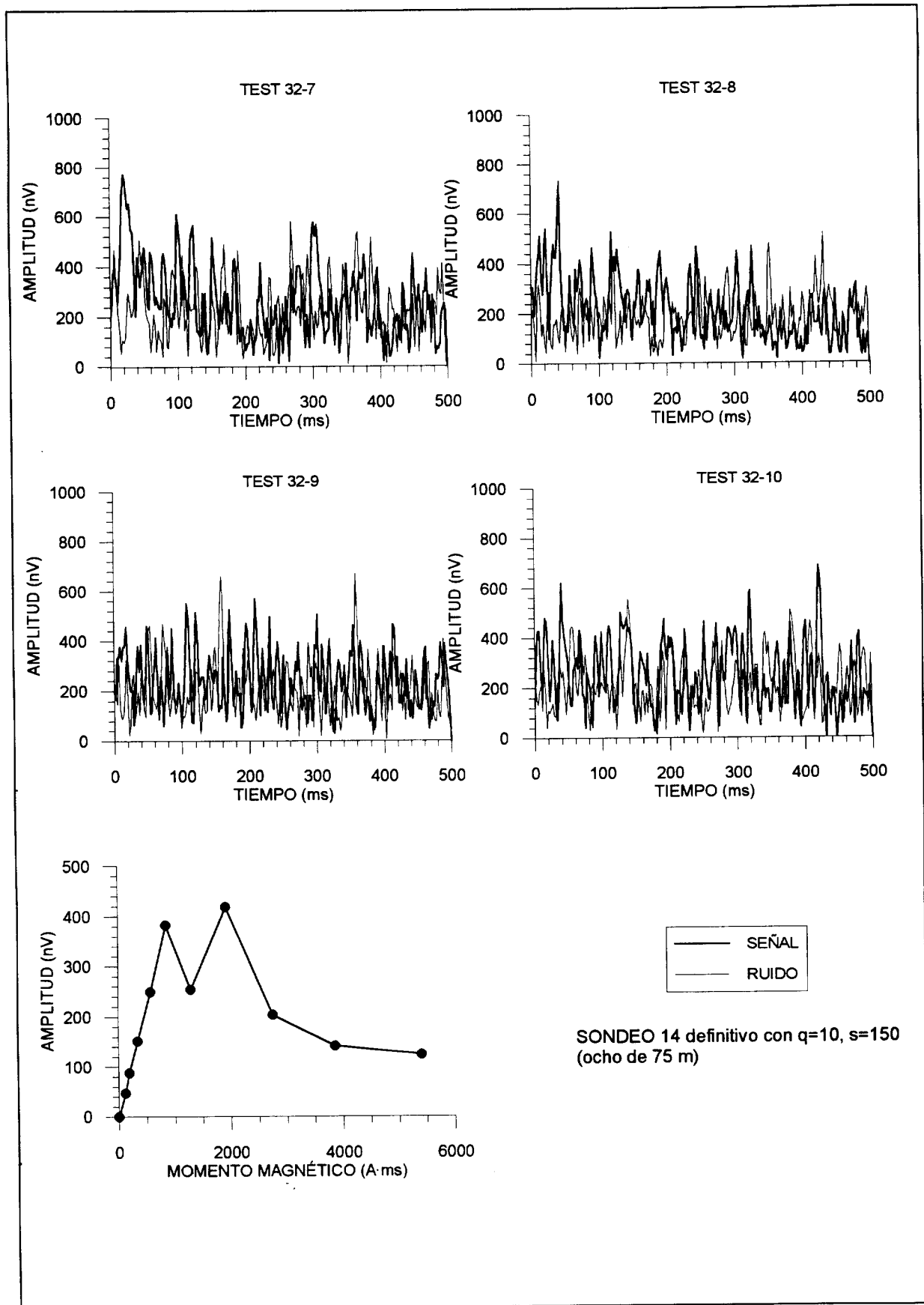


Fig. 30b

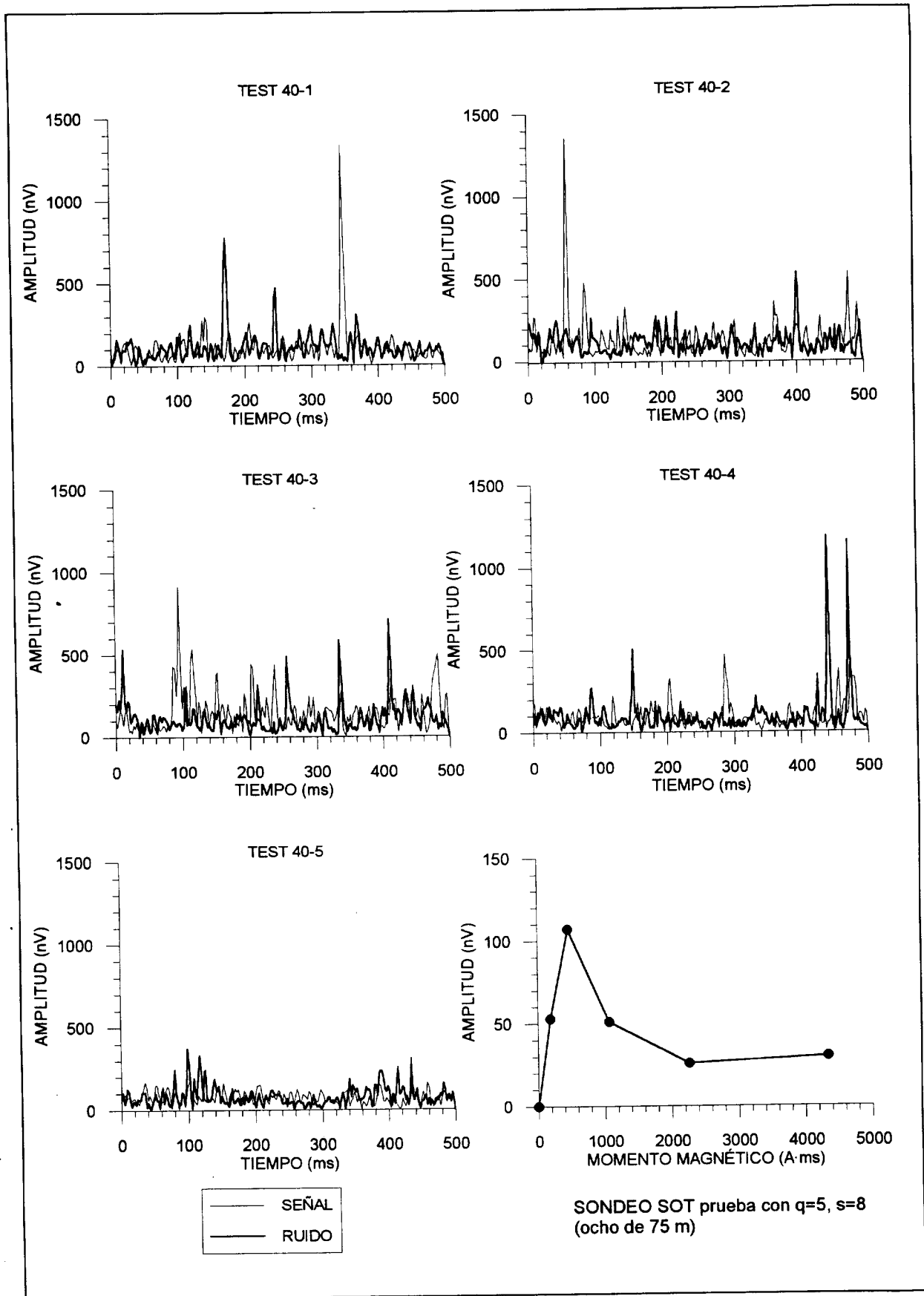


Fig. 31

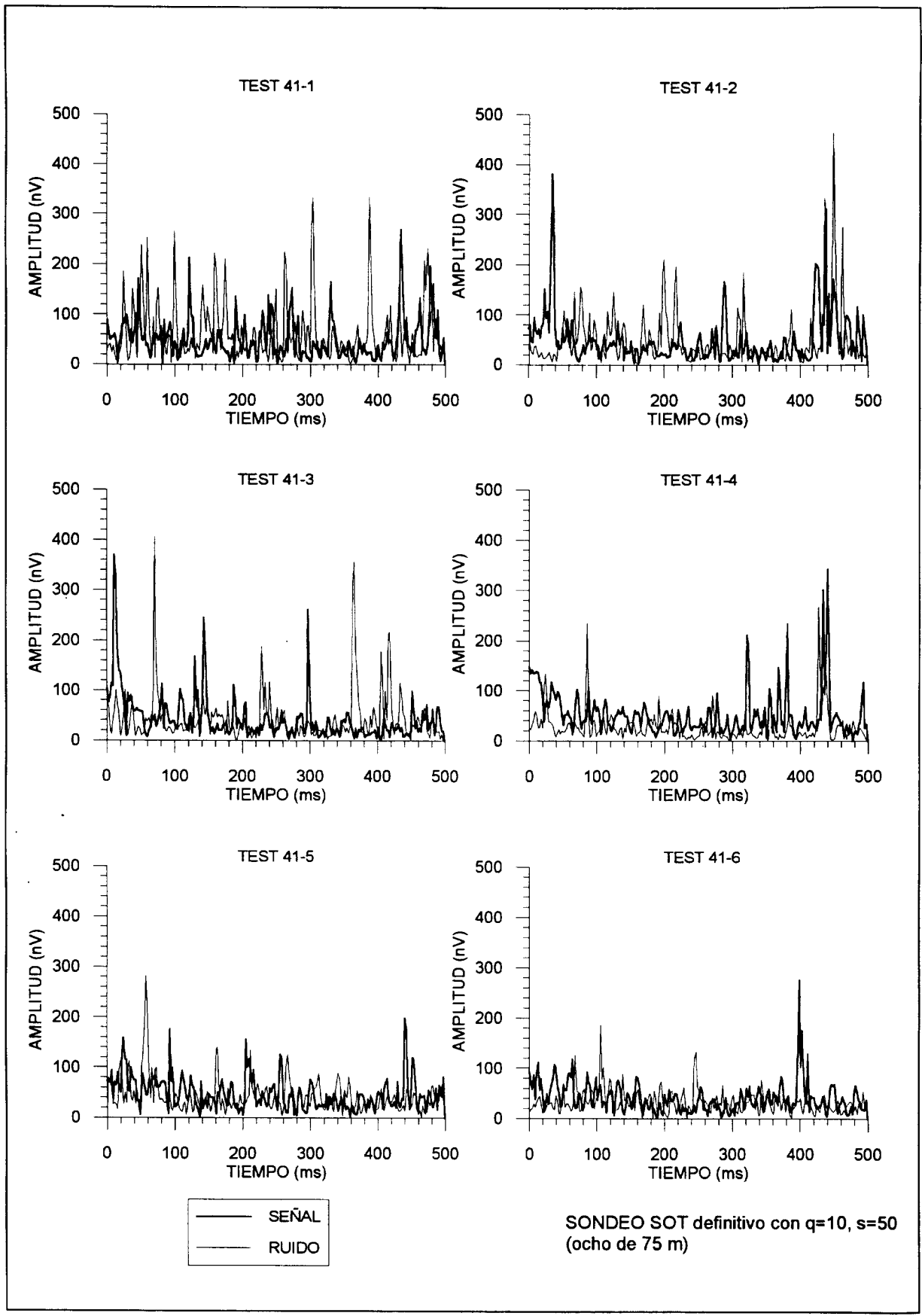


Fig. 32a

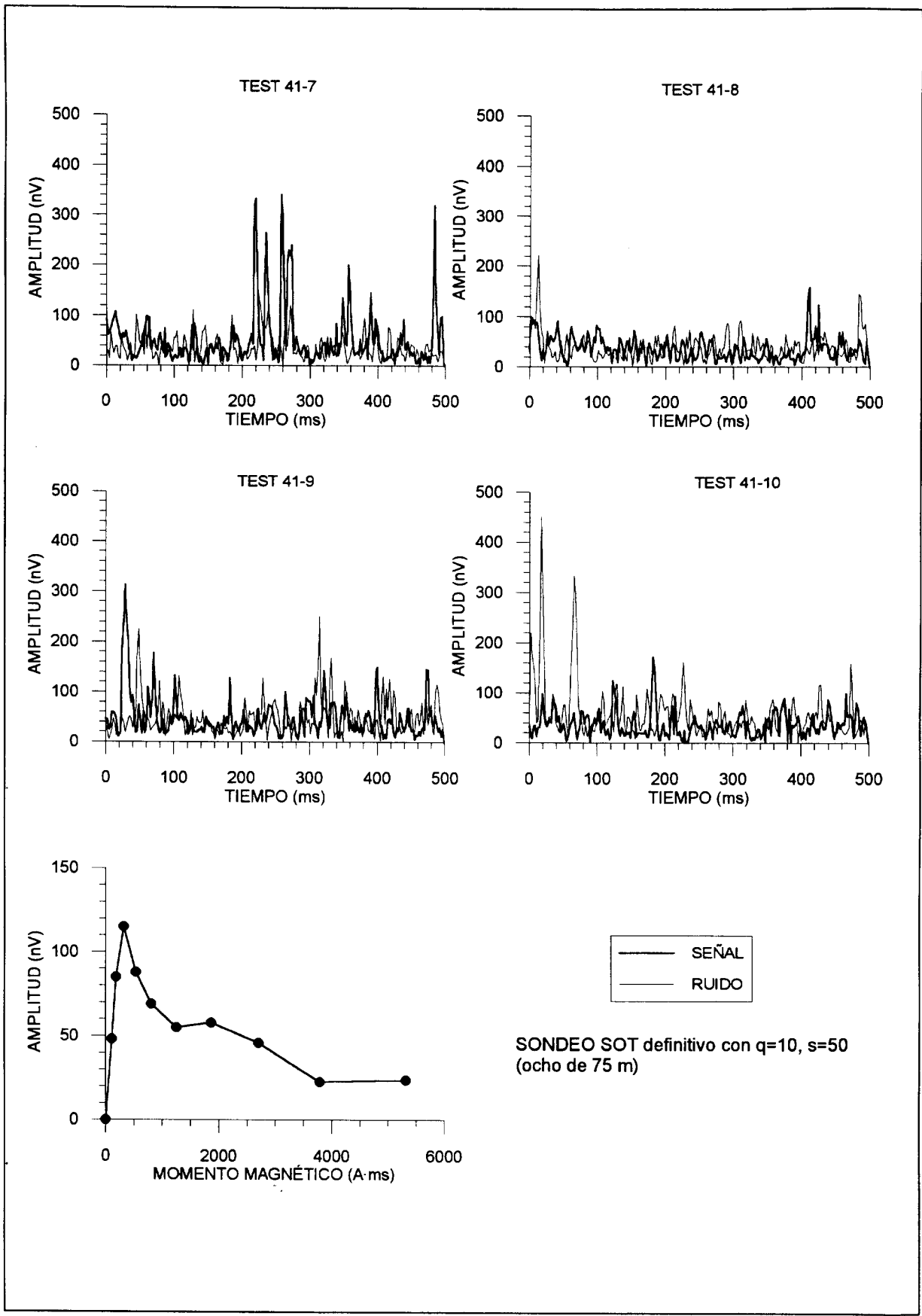


Fig. 32b

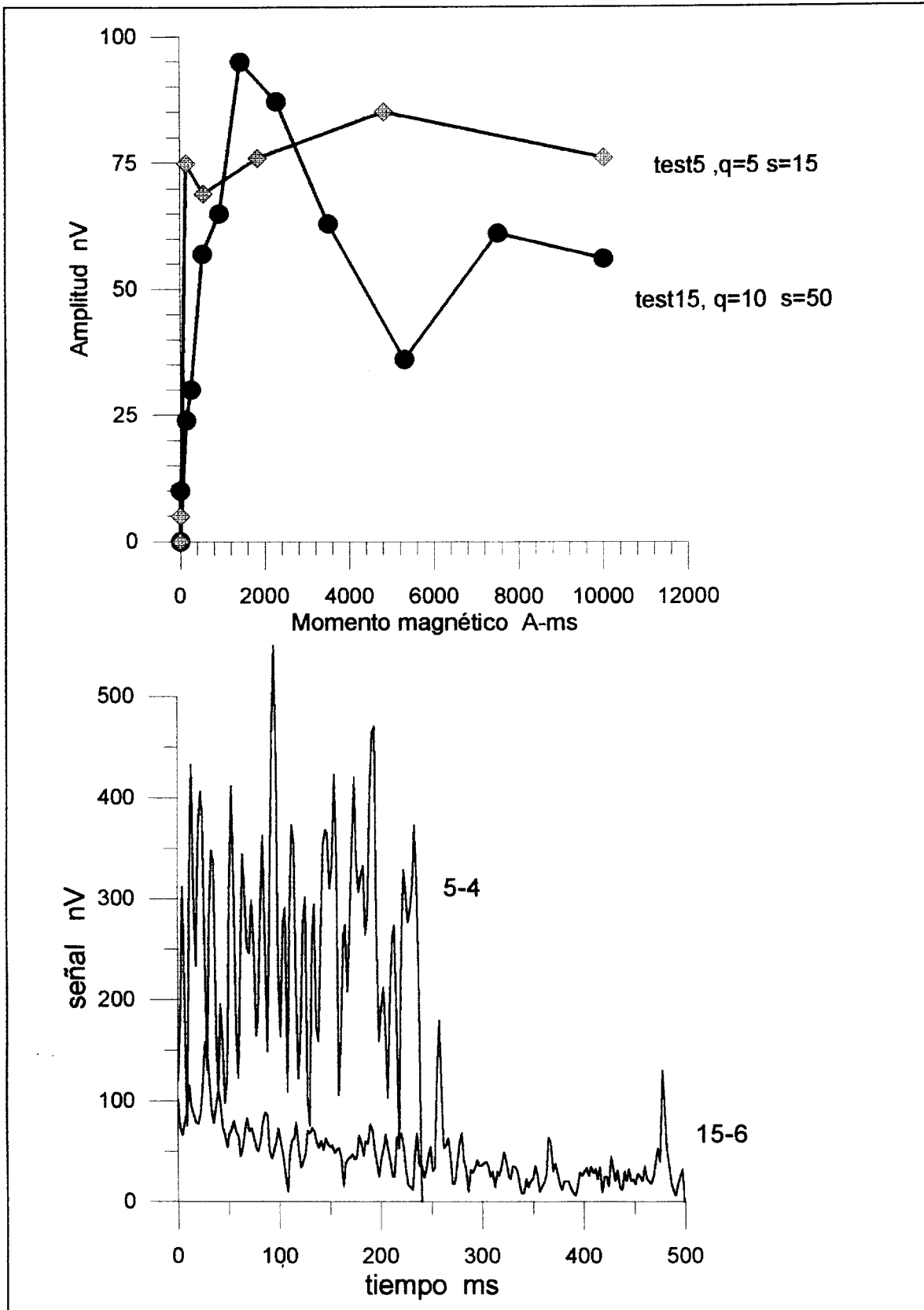


fig. 33 Comparación de resultados para un mismo tipo de antena con diferente orientación. Sondeo I-1. Bucle en ocho de 37.5 m. Test15 con orientación paralela a línea eléctrica.

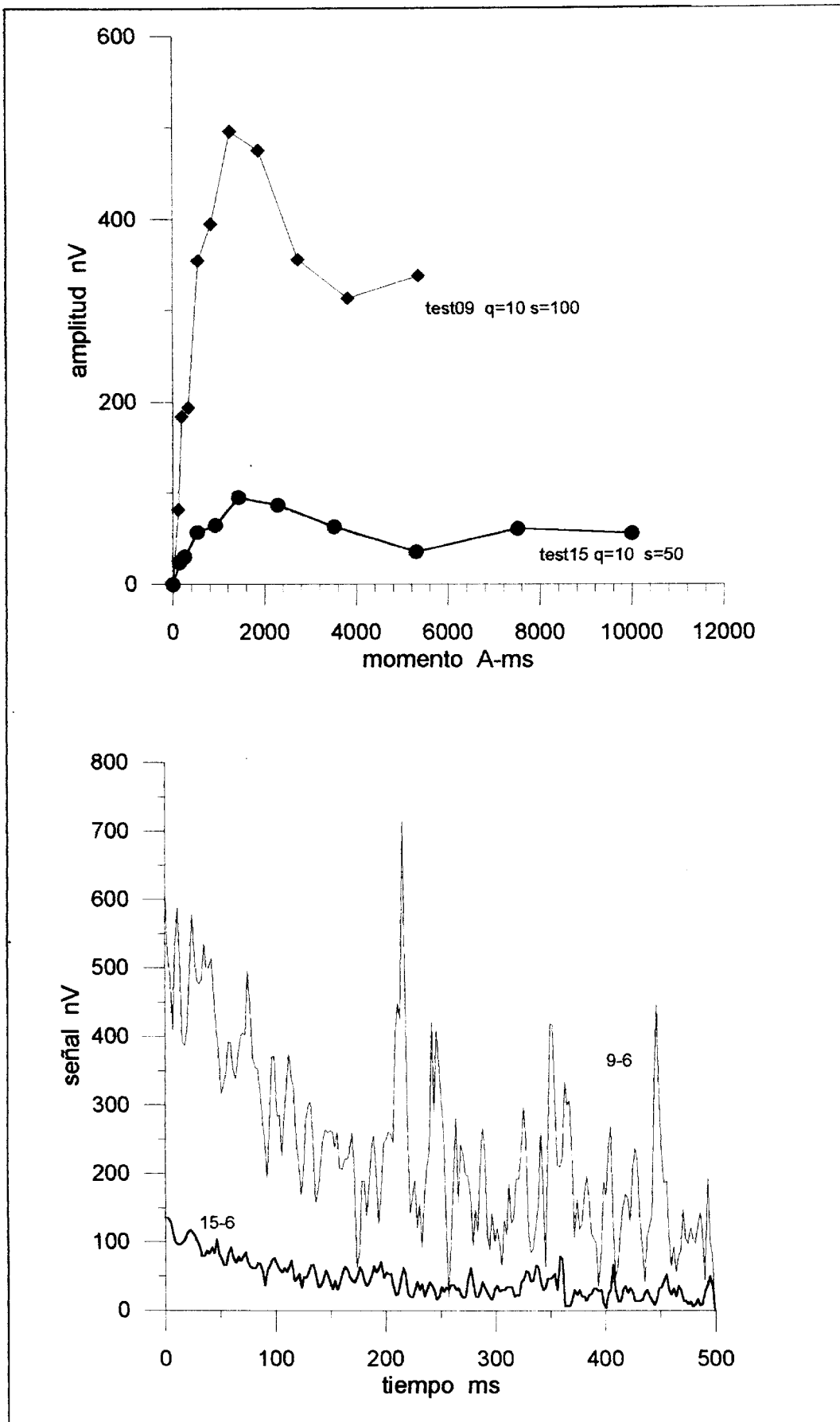


Fig. 34 Comparación de resultados para la misma configuración de antena con distinto tamaño. Sondeo I-1. Bucle en ocho de 37.5 m para test15. Bucle en ocho de 75 m para test9.

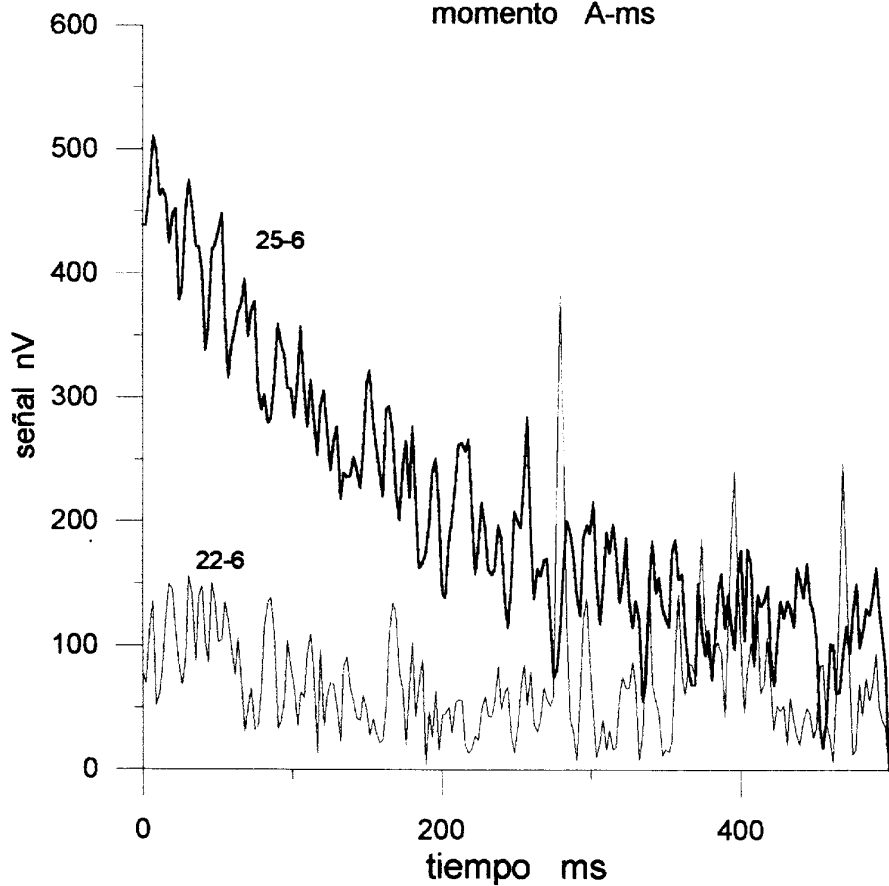
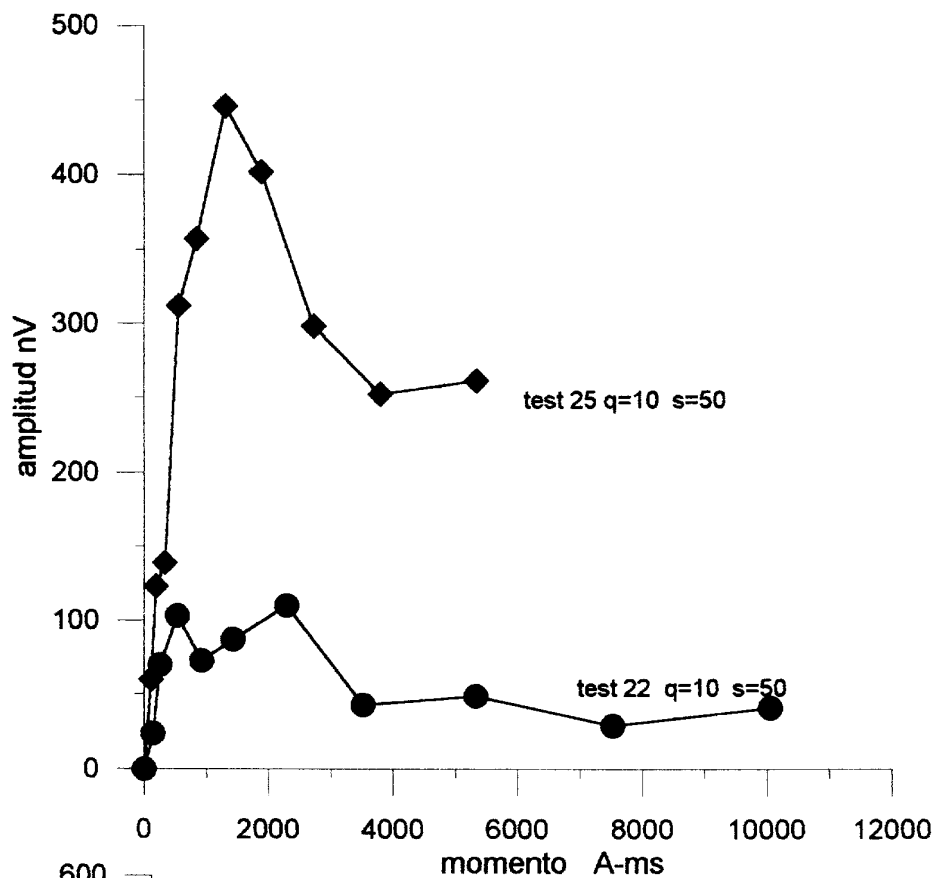


Fig. 35 Comparación de resultados para la misma configuración de antena con distinto tamaño. Sondeo D-4. Bucle en ocho de 37.5 m para test22; bucle en ocho de 75 m para test 25.

Test site: Arcos, site1	File: test_09
Date: 19.05.98	Time: 19.20
Signal/Noise = 5.22	Stacking number = 100
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

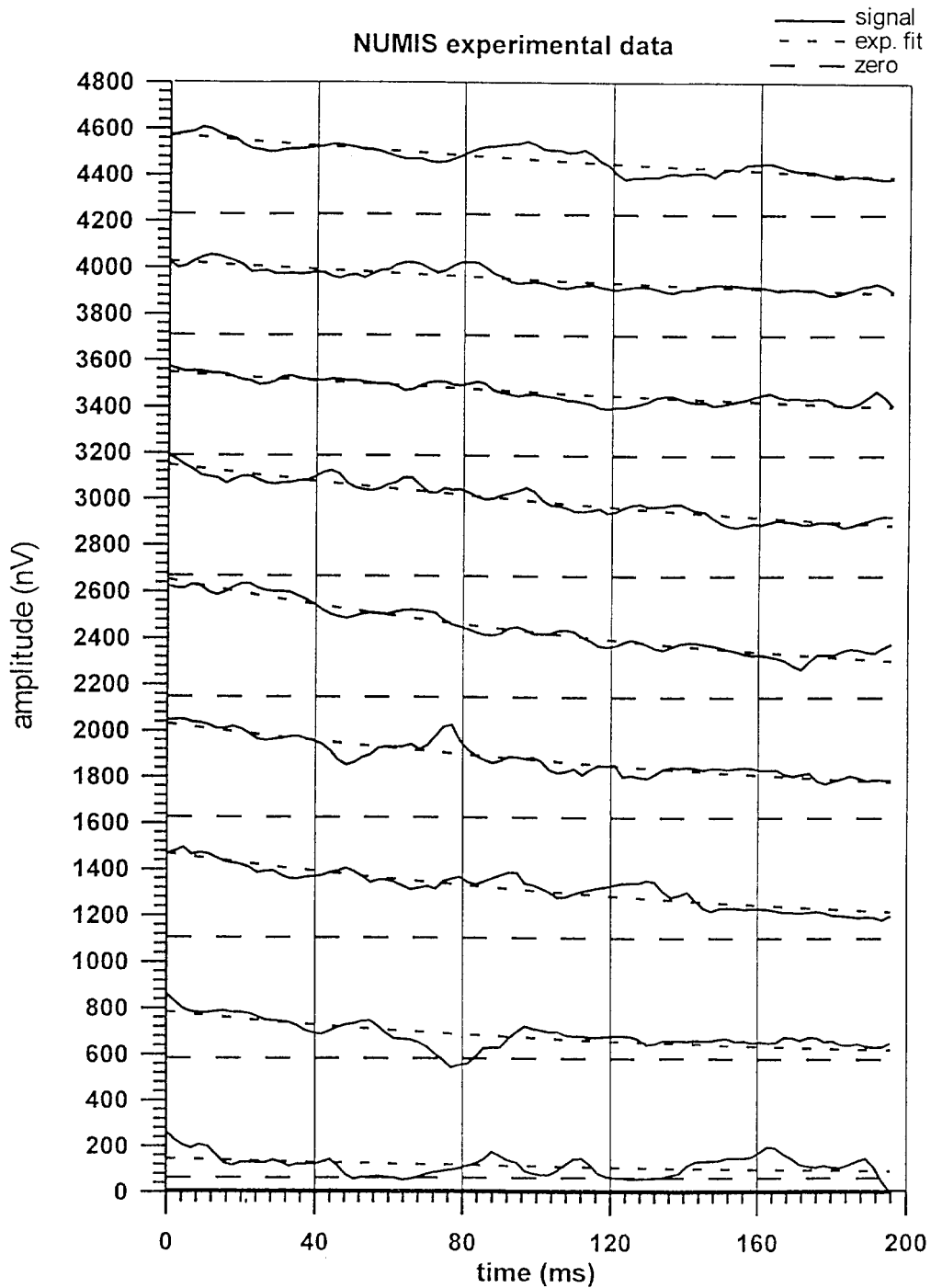


Fig. 36a Sondeo I-1

Test site: Arcos, site1	File: test_09
Date: 19.05.98	Time: 19.20
Signal/Noise = 5.22	Stacking number = 100
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

NUMIS experimental data

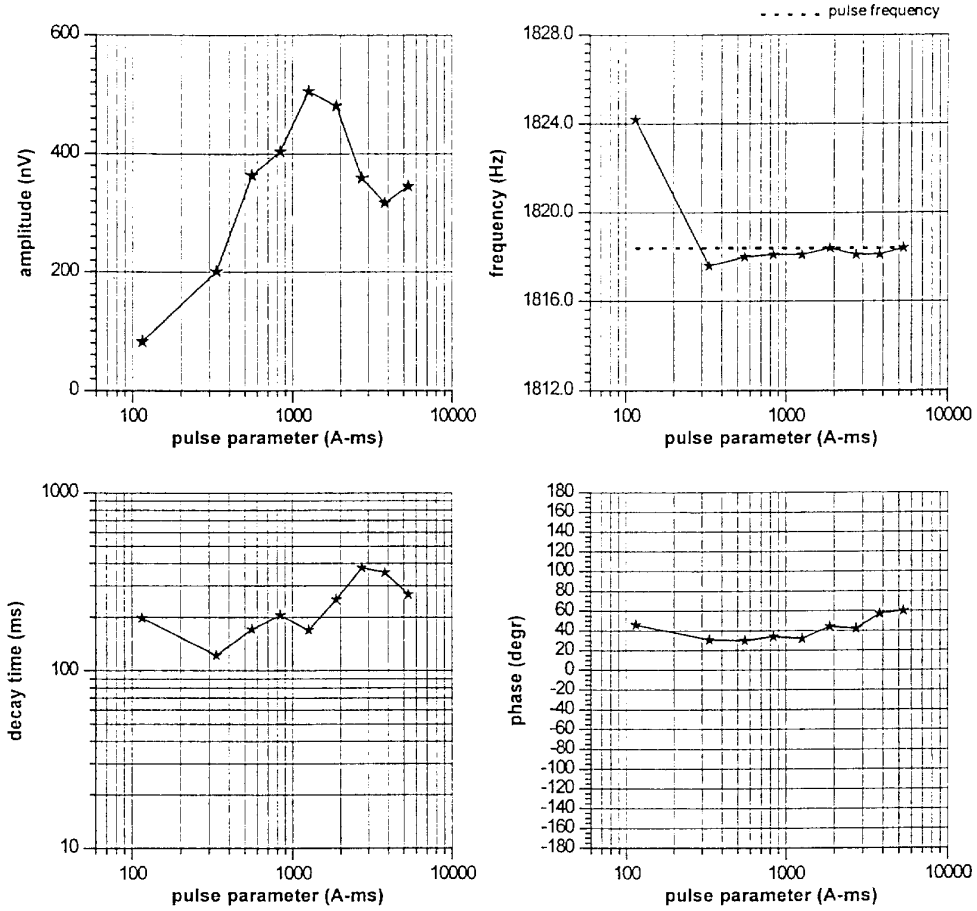
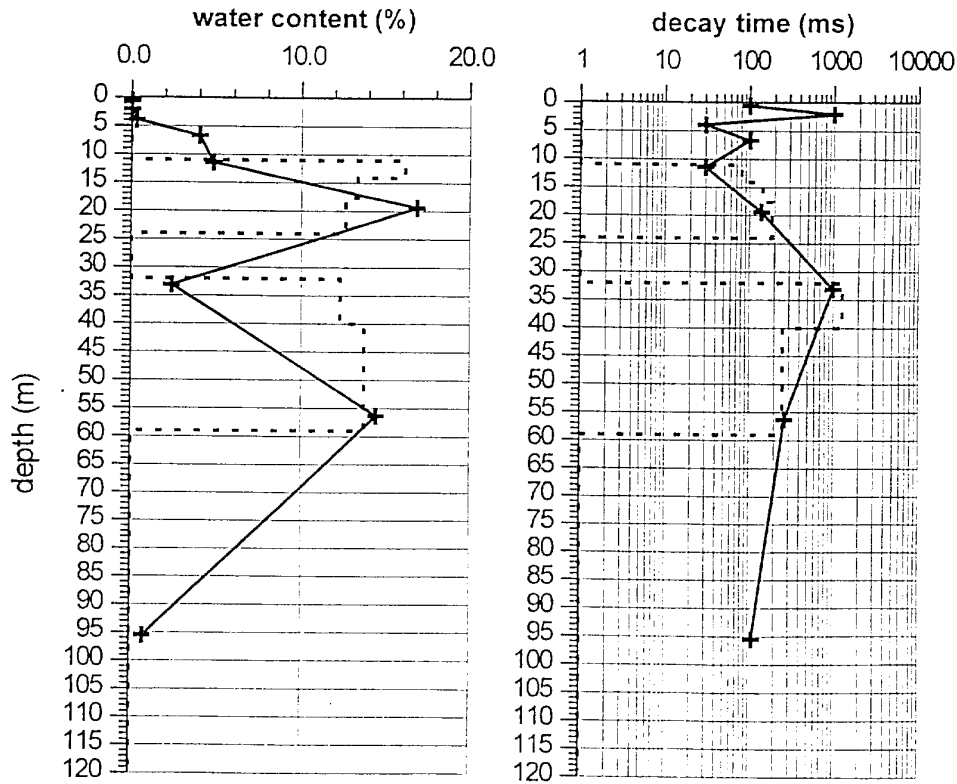
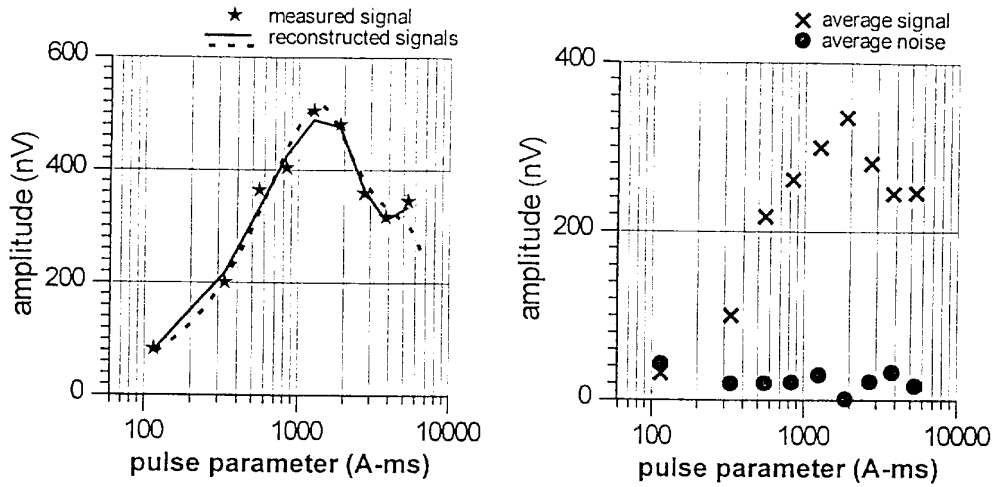


Fig. 36b Sondeo I-1

Test site: Arcos, site1	File: test_09
Date: 19.05.98	Time: 19.20
Signal/Noise = 5.22	Stacking number = 100
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

NUMIS inversion results



— parameter of regularization = 500
 fitting error (%) = 4.41
 - - - parameter of regularization = 200
 fitting error (%) = 6.6

Fig. 36c Sondeo I-1

- ACUIFERO DE LOS SOTILLOS: INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA -
 COLUMNA LITOLÓGICA Y ENTUBADO DEL SONDEO MECÁNICO
 N° 30 ó I-1 (RANCHO EL GATO)

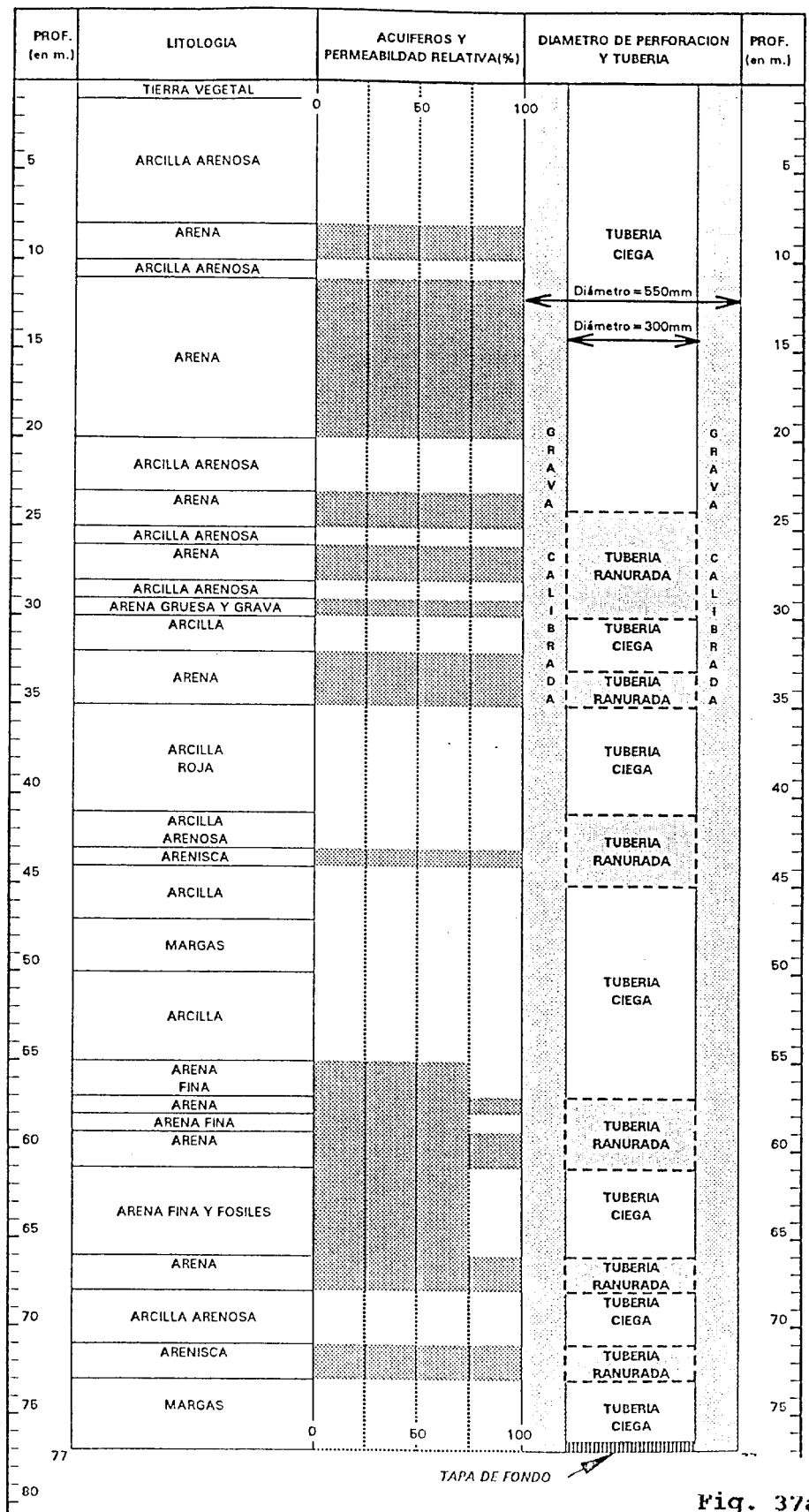


Fig. 37a Sondeo 1-1

- ACUIFERO DE LOS SOTILLOS: INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA -
 COLUMNA LITOLÓGICA Y ENTUBADO DEL SONDEO MECÁNICO
 N° 30 ó 1-1 (RANCHO EL GATO)

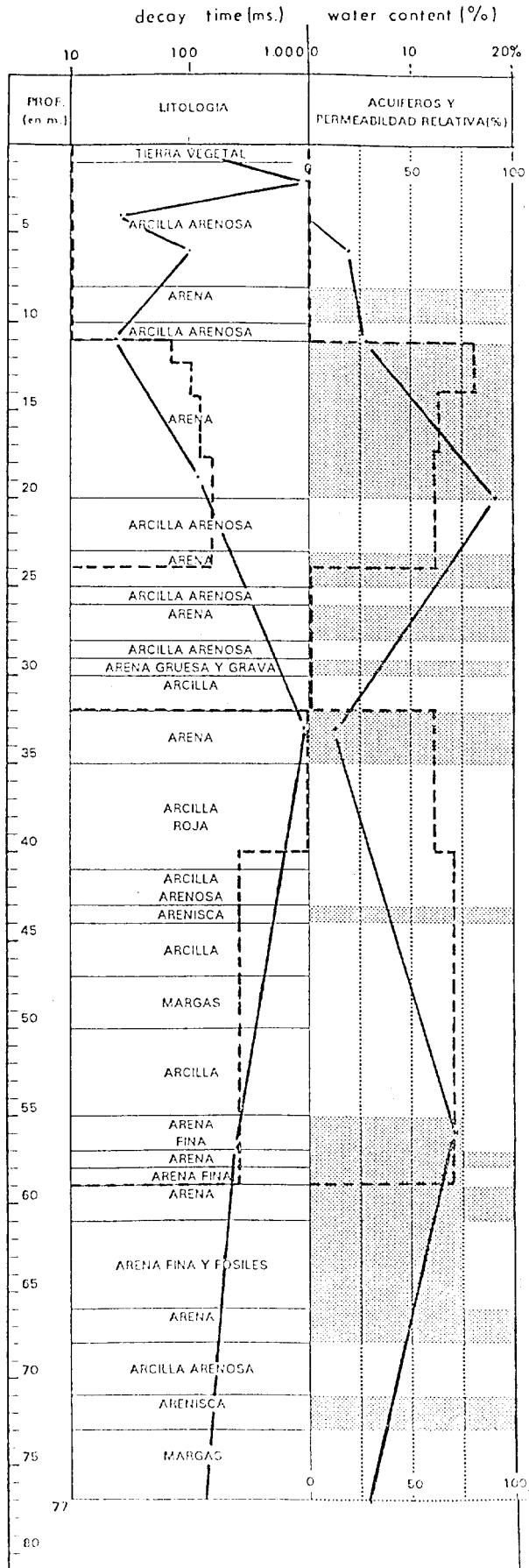


Fig. 37b

test. 09

INTERPRETACION

———— p.r.=500
 - - - - p.r.=200

Test site: Arcos, site1	File: test_15
Date: 20.05.98	Time: 13.45
Signal/Noise = 2.61	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 40 m	

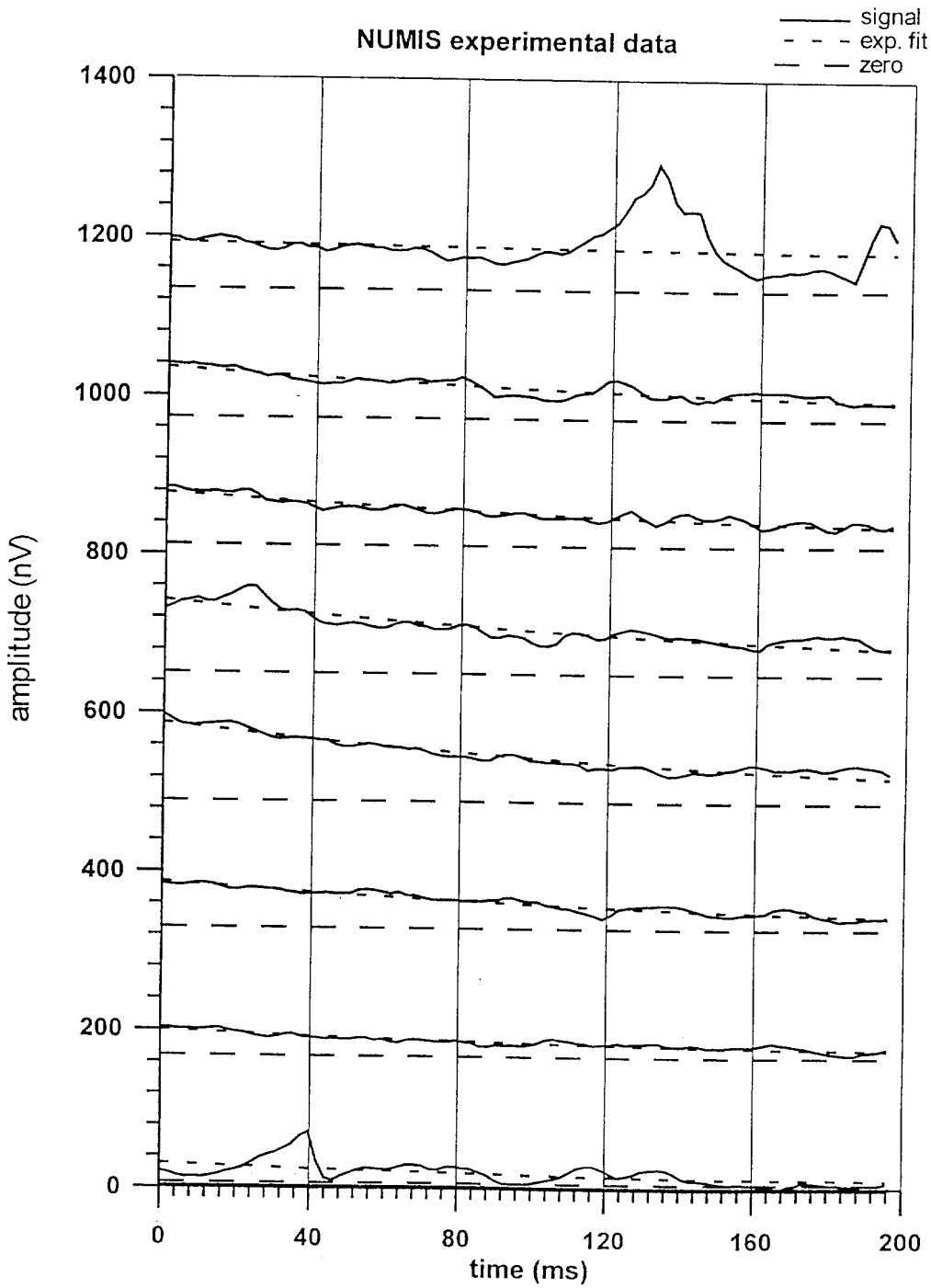


Fig. 38a Sondeo I-1

Test site: Arcos, site1	File: test_15
Date: 20.05.98	Time: 13.45
Signal/Noise = 2.61	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 40 m	

NUMIS experimental data

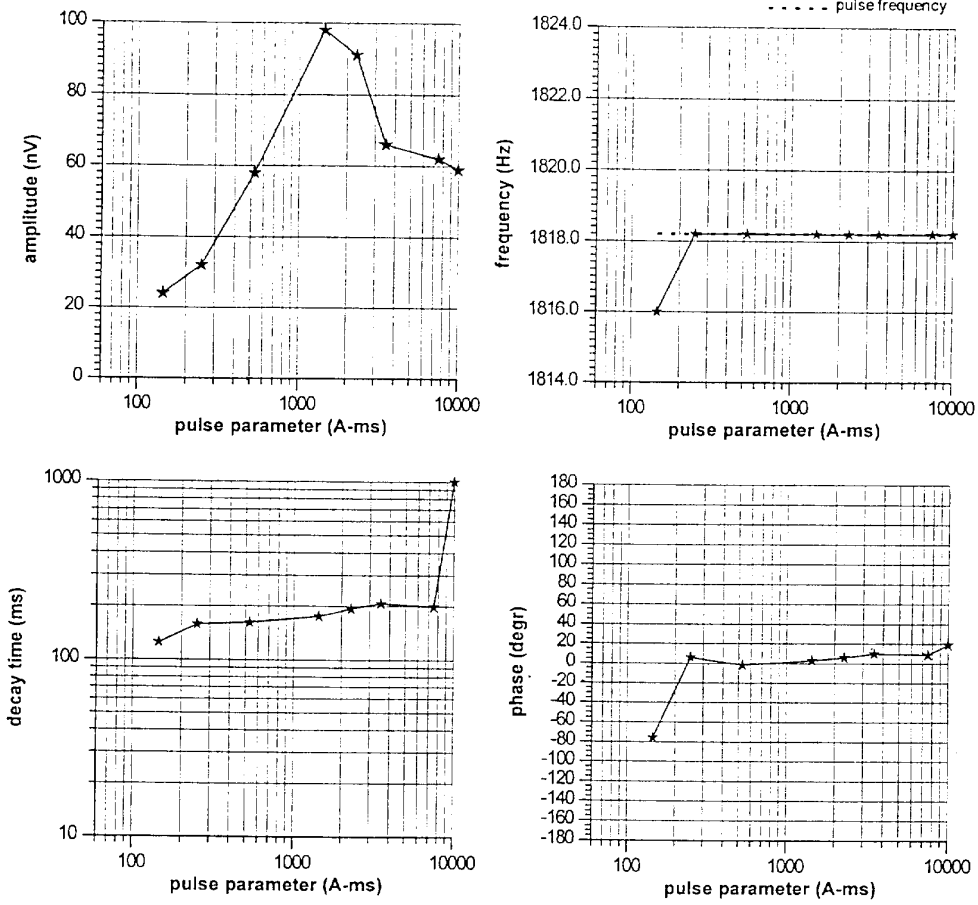
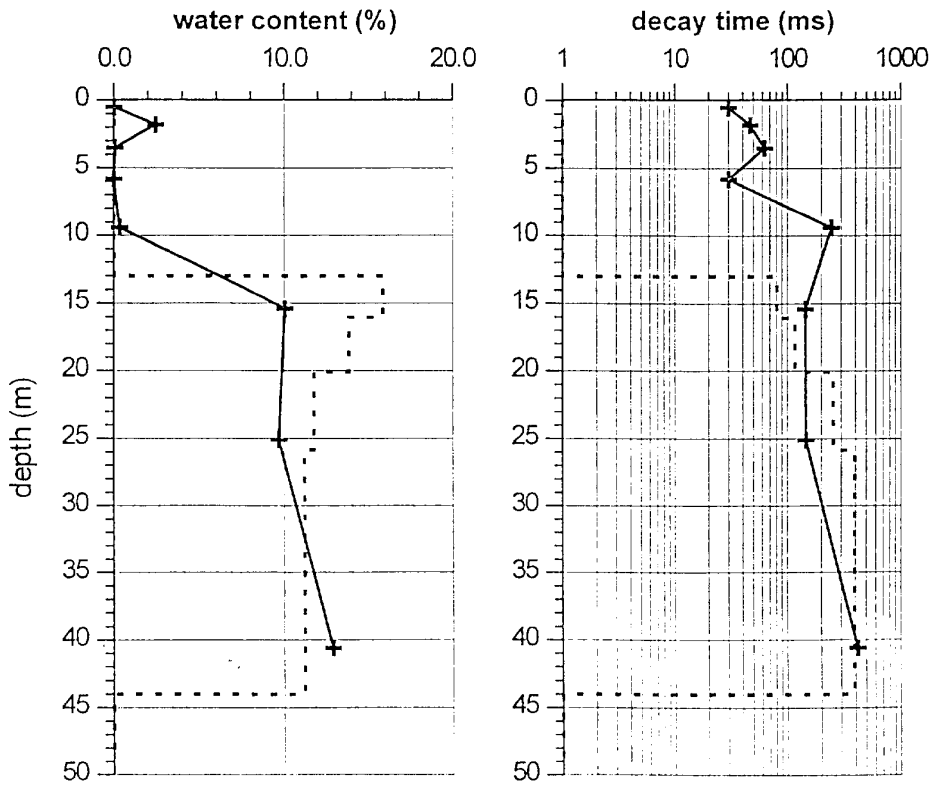
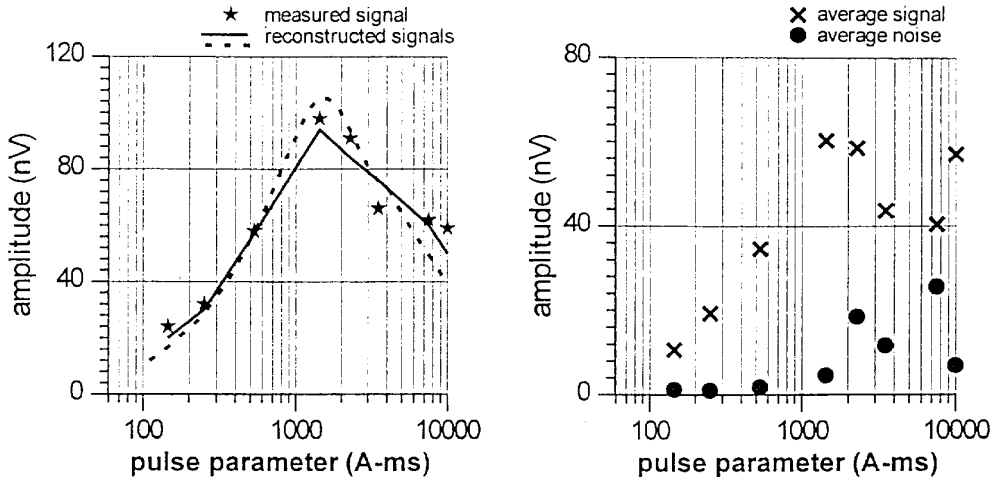


Fig. 38b Sondeo I-1

Test site: Arcos, site1	File: test_15
Date: 20.05.98	Time: 13.45
Signal/Noise = 2.61	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 40 m	

NUMIS inversion results



— parameter of regularization = 500
 fitting error (%) = 8.49
 - - - parameter of regularization = 100
 fitting error (%) = 15.5

Fig. 38c Sondeo I-1

ACUIFERO DE LOS SOTILLOS: INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA -
 COLUMNA LITOLÓGICA Y ENTUBADO DEL SONDEO MECÁNICO
 N° 30 ó 1-1 (RANCHO EL GATO)

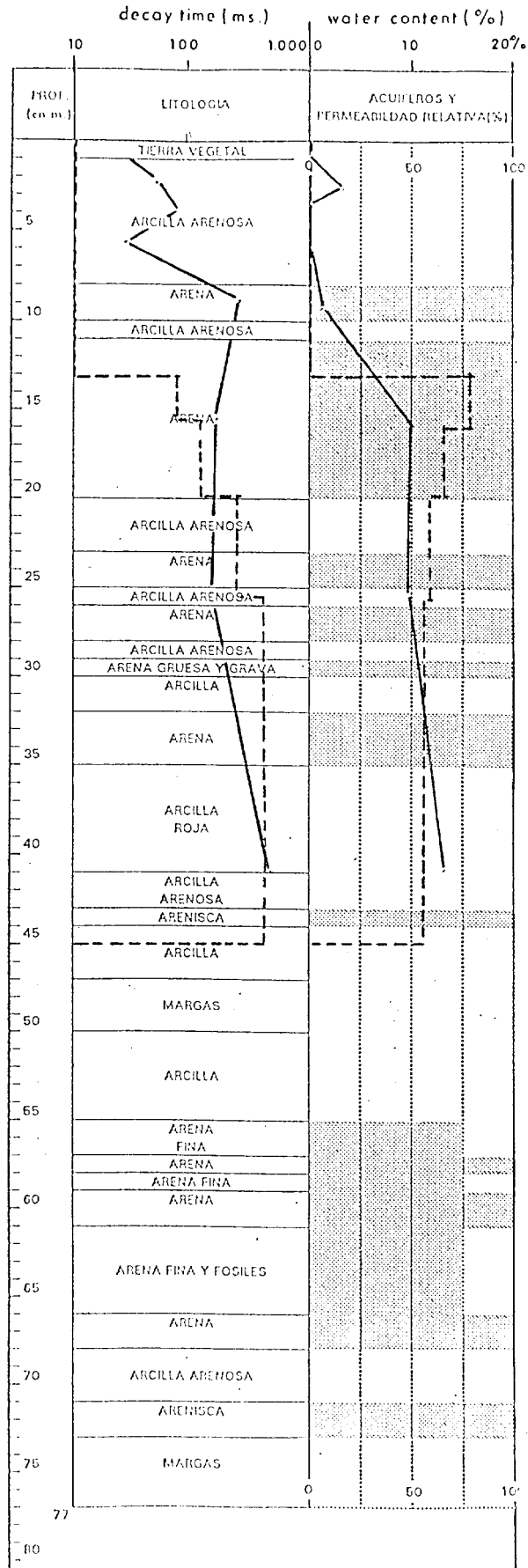


Fig. 39

test. 15
 INTERPRETACION:
 — p.r.=500
 - - - p.r.=100

Test site: Arcos, site2	File: test_25
Date: 21.05.98	Time: 10.20
Signal/Noise = 4.54	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

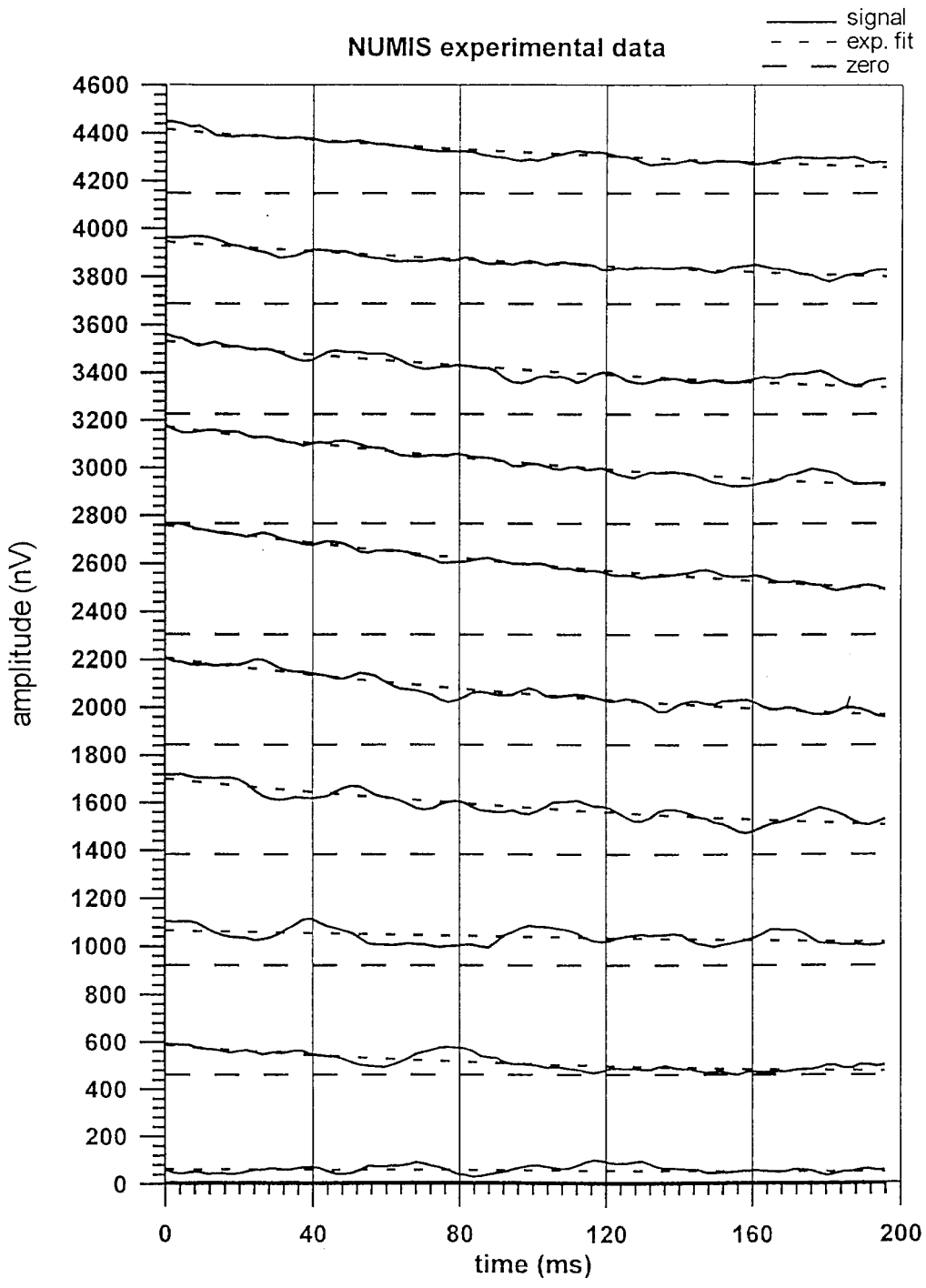


Fig. 40a Sondeo D-4

Test site: Arcos, site2	File: test_25
Date: 21.05.98	Time: 10.20
Signal/Noise = 4.54	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

NUMIS experimental data

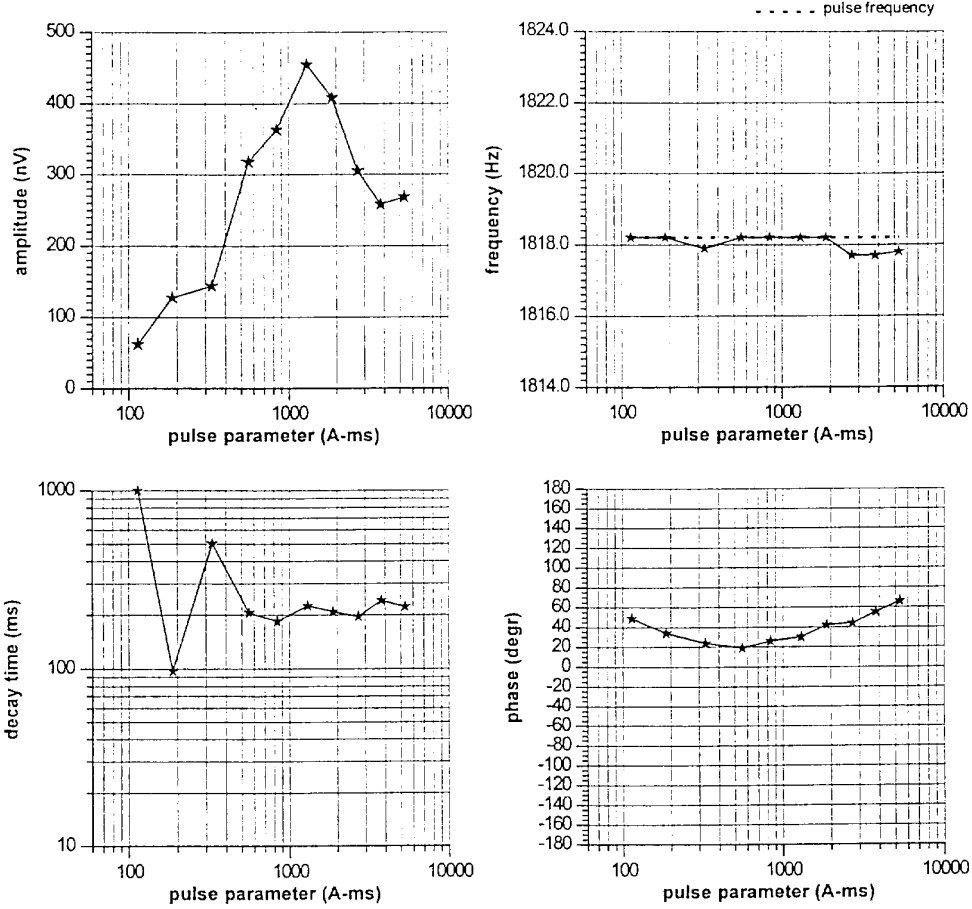
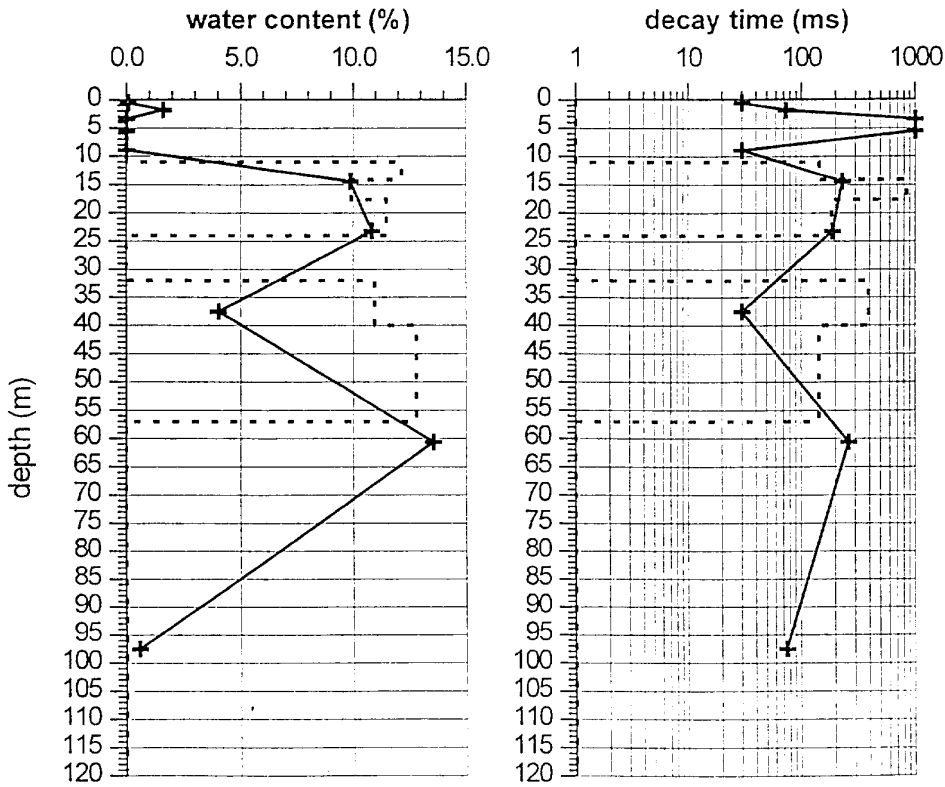
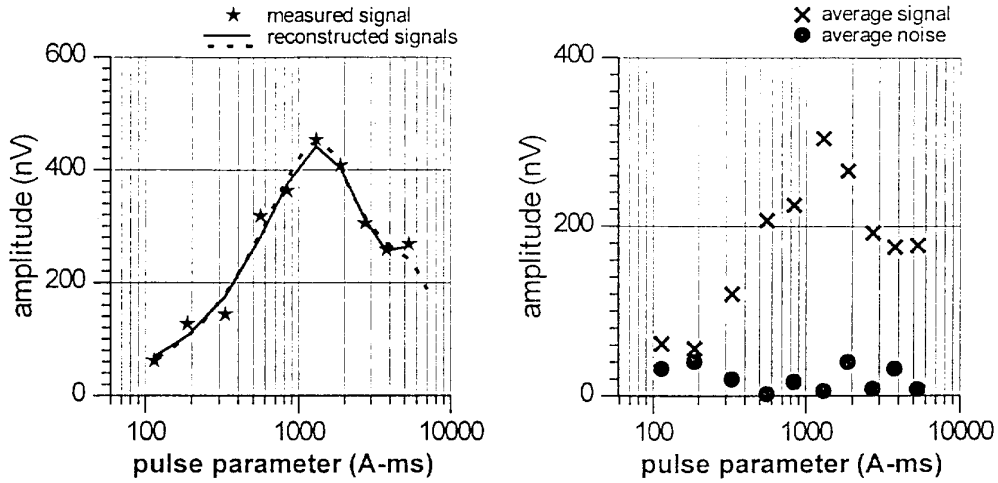


Fig. 40b Sondeo D-4

Test site: Arcos, site2	File: test_25
Date: 21.05.98	Time: 10.20
Signal/Noise = 4.54	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

NUMIS inversion results



— parameter of regularization = 500
 fitting error (%) = 6.13
 - - - parameter of regularization = 200
 fitting error (%) = 7.04

Fig. 40c Sondeo D-4

- ACUÍFERO DE LOS SOTILLOS: INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA -
 COLUMNA LITOLÓGICA Y ENTUBADO DEL SONDEO MECÁNICO
 N° 18 6 D-4 (SOTILLO VIEJO-A)

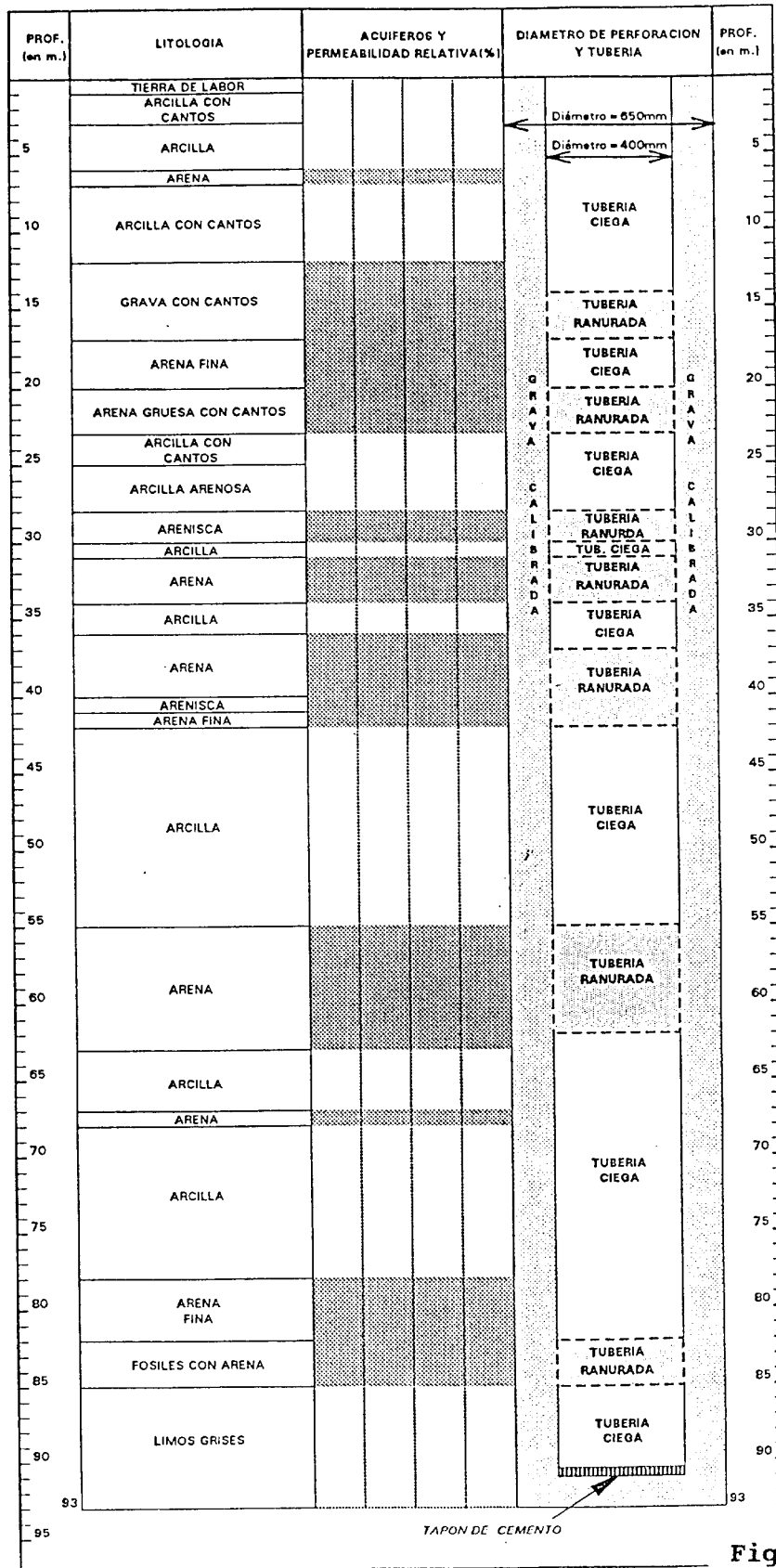


Fig. 41a Sondeo D-4

Test site: Arcos, site2	File: test_22
Date: 20.05.98	Time: 18.00
Signal/Noise = 1.94	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 40 m	

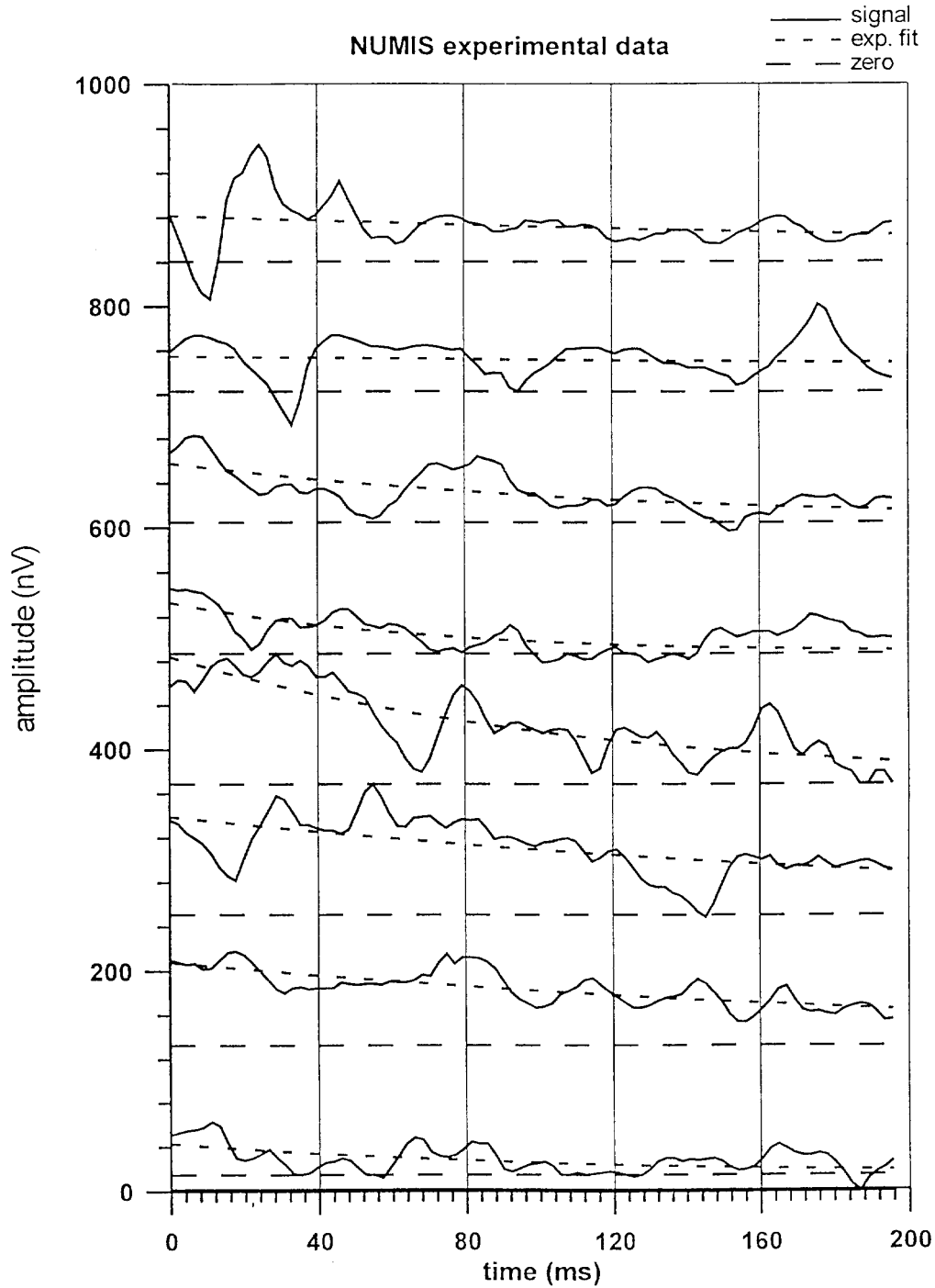


Fig. 42a Sondeo D-4

Test site: Arcos, site2	File: test_22
Date: 20.05.98	Time: 18.00
Signal/Noise = 1.94	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 40 m	

NUMIS experimental data

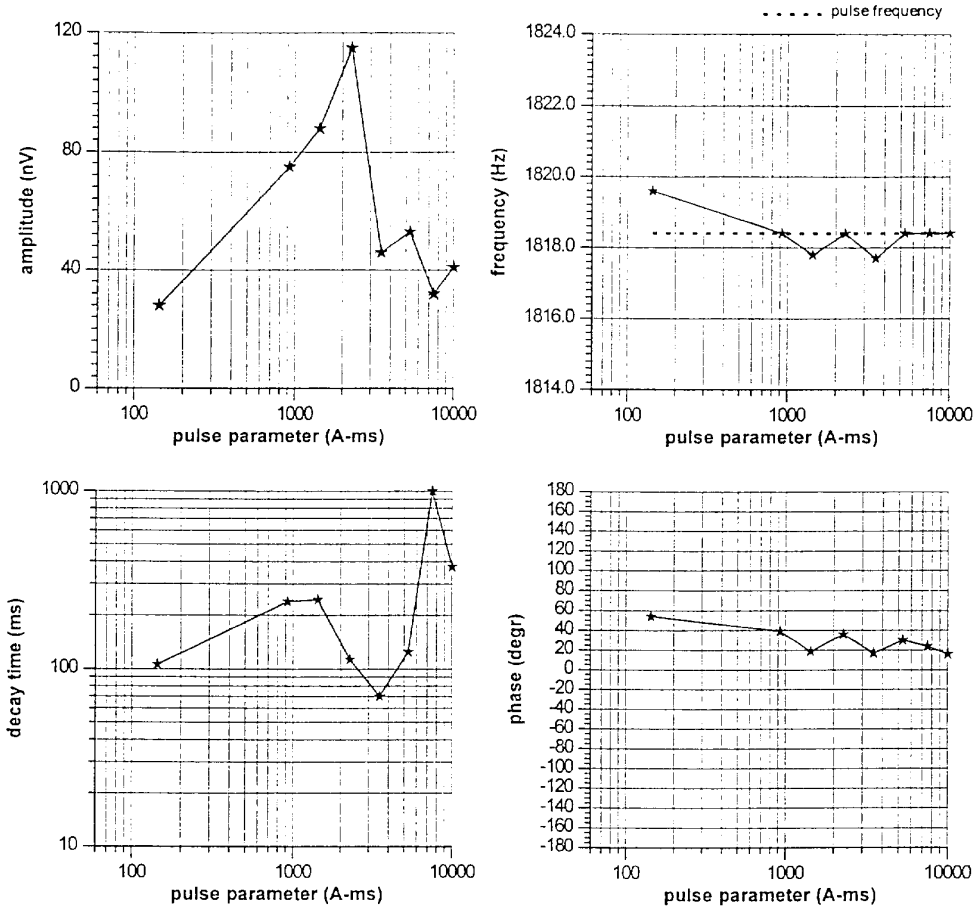
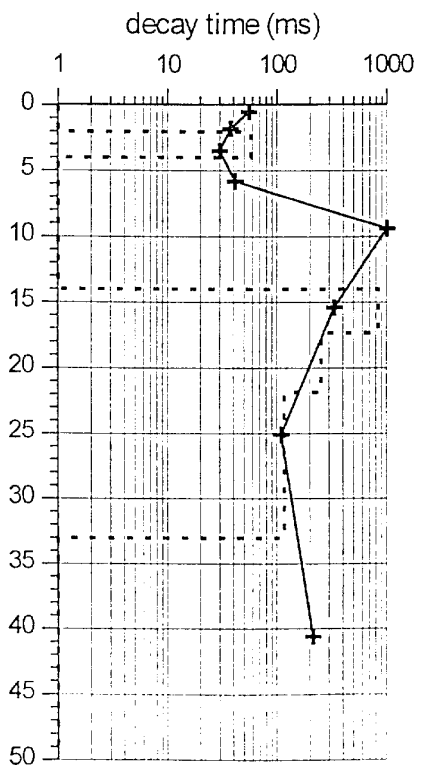
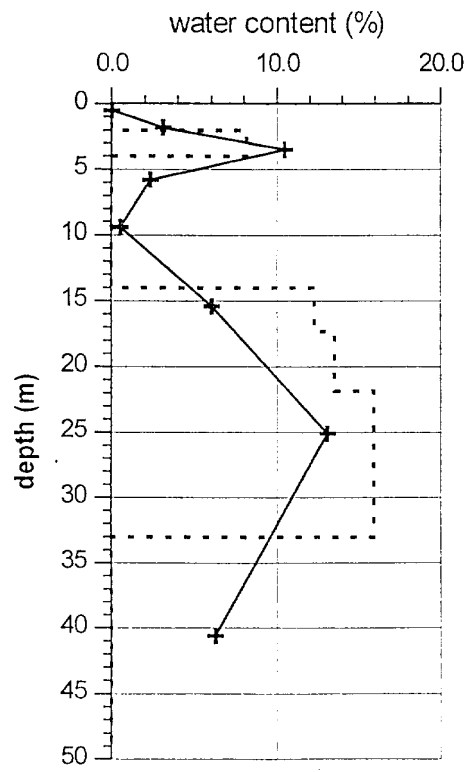
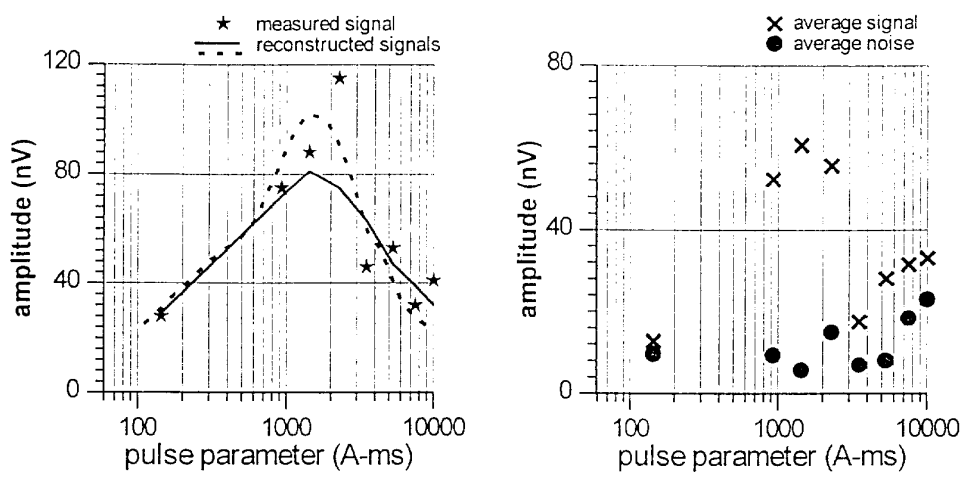


Fig. 42b Sondeo D-4

Test site: Arcos, site2	File: test_22
Date: 20.05.98	Time: 18.00
Signal/Noise = 1.94	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 40 m	

NUMIS inversion results



— parameter of regularization = 2000
 fitting error (%) = 24.0
 - - - parameter of regularization = 200
 fitting error (%) = 20.0

Fig. 42c Sondeo D-4

Test site: Arcos, site3	File: test_32
Date: 21.05.98	Time: 14.30
Signal/Noise = 2.09	Stacking number = 150
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

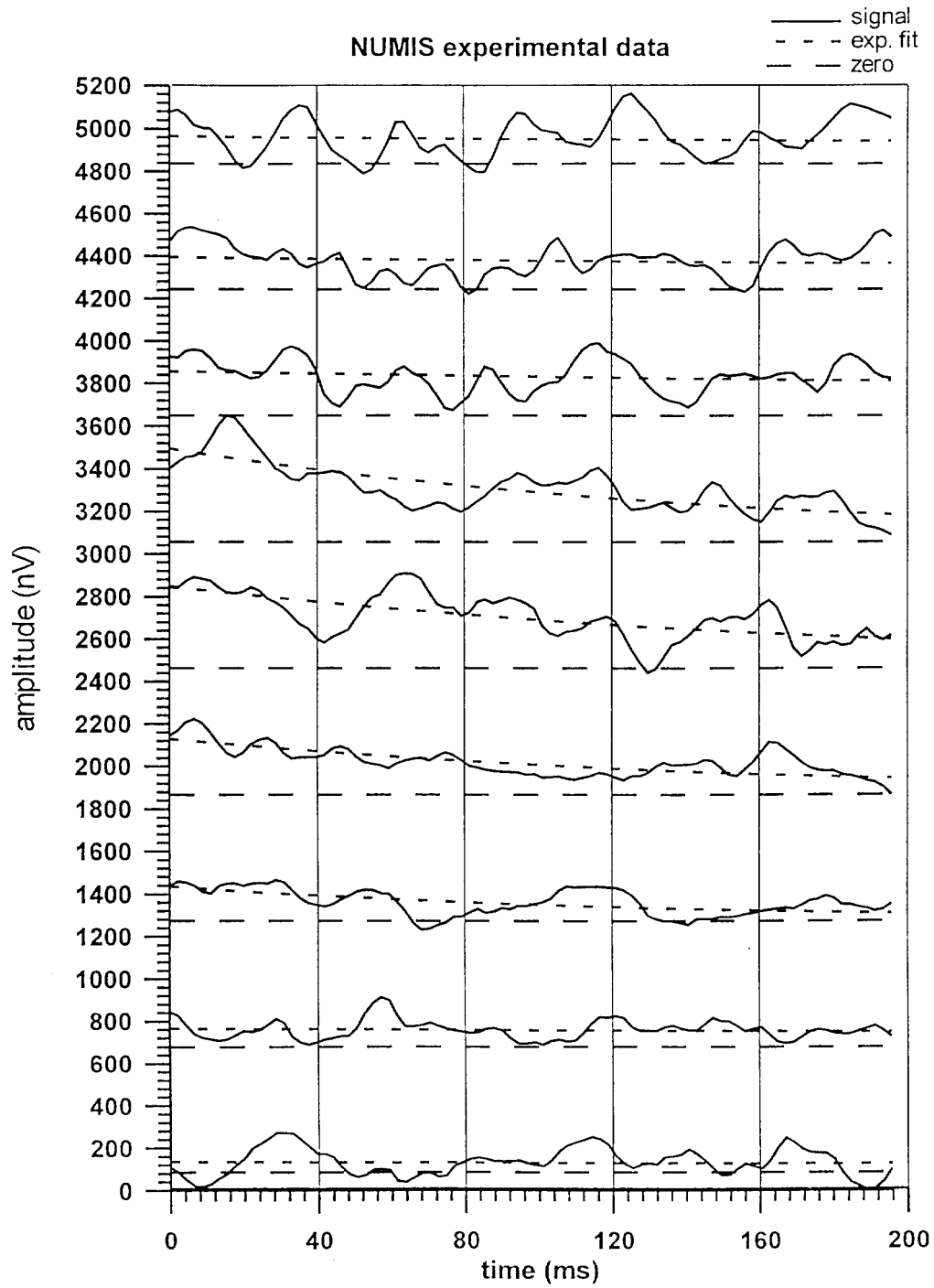


Fig. 44a Sondeo 14

Test site: Arcos, site3	File: test_32
Date: 21.05.98	Time: 14.30
Signal/Noise = 2.09	Stacking number = 150
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

NUMIS experimental data

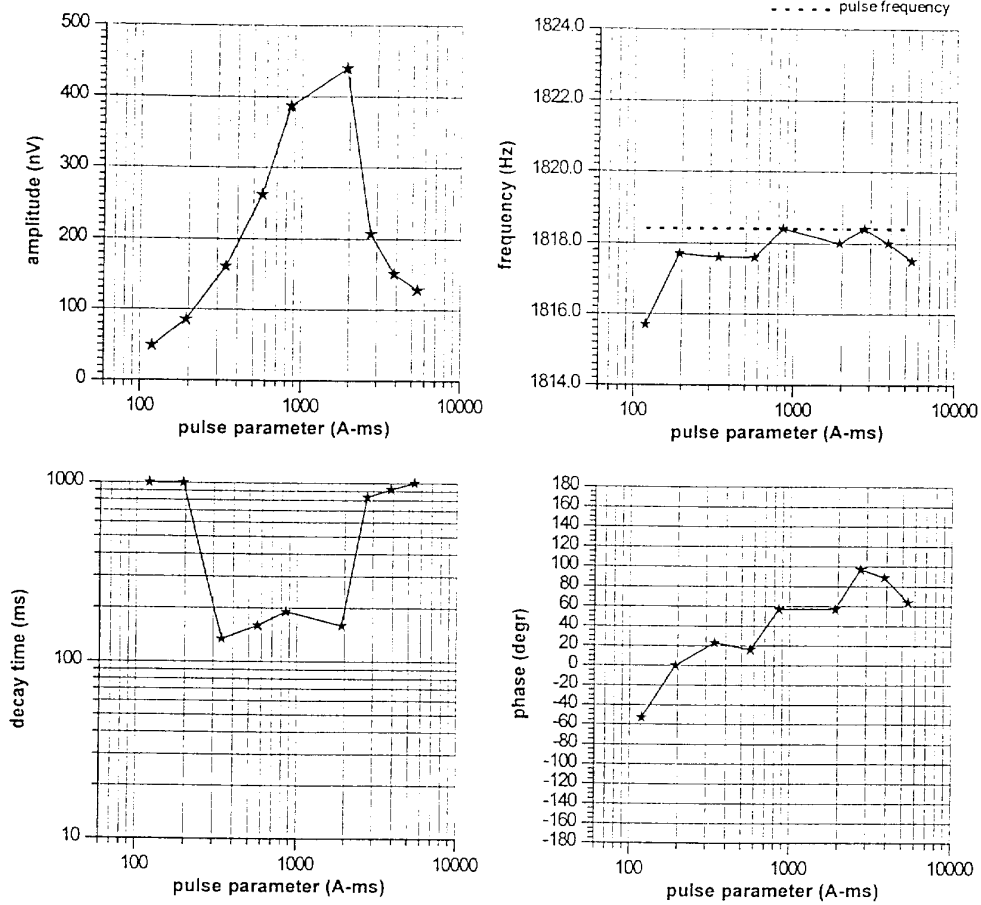
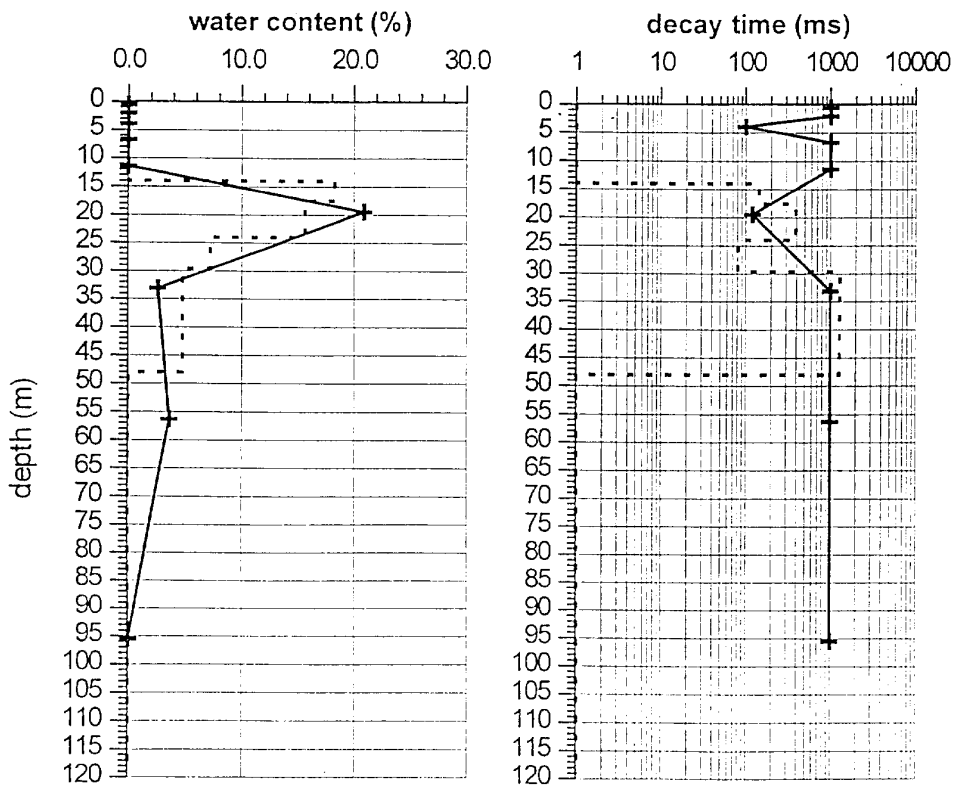
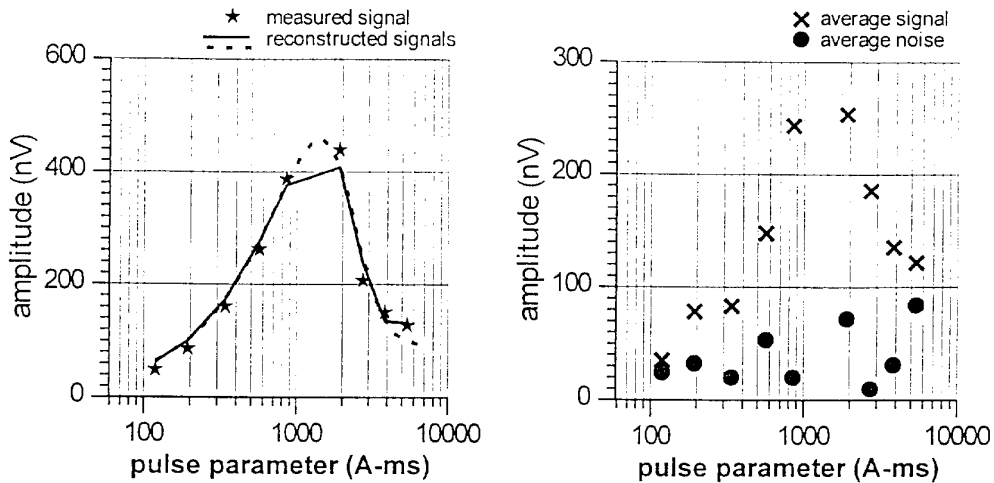


Fig. 44b Sondeo 14

Test site: Arcos, site3	File: test_32
Date: 21.05.98	Time: 14.30
Signal/Noise = 2.09	Stacking number = 150
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

NUMIS inversion results



— parameter of regularization = 500
fitting error (%) = 7.5
- - - parameter of regularization = 200
fitting error (%) = 9.3

Fig. 44c Sondeo 14

- ACUIFERO DE LOS SOTILLOS: INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA -
 COLUMNA LITOLÓGICA Y ENTUBADO DEL SONDEO MECÁNICO
 Nº 14 (Abandonado y utilizado como piezómetro Centro) (SOTILLO VIEJO-B)

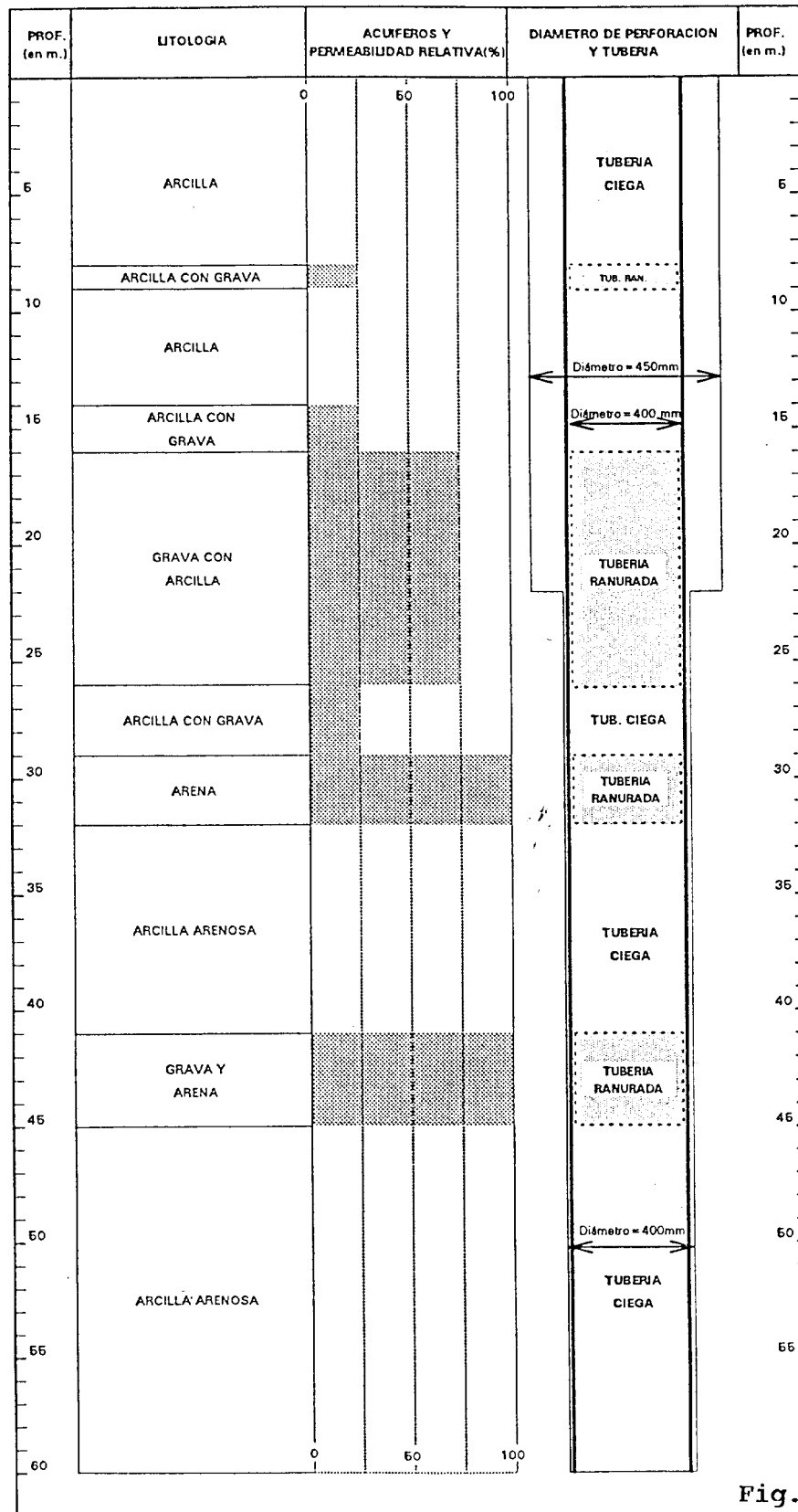


Fig. 45a Sondeo 14

- ACUIFERO DE LOS SOTILLOS: INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA -
 COLUMNA LITOLÓGICA Y ENTUBADO DEL SONDEO MECÁNICO
 N° 14 (Abandonado y utilizado como piezómetro Centro) (SOTILLO VIEJO-B)

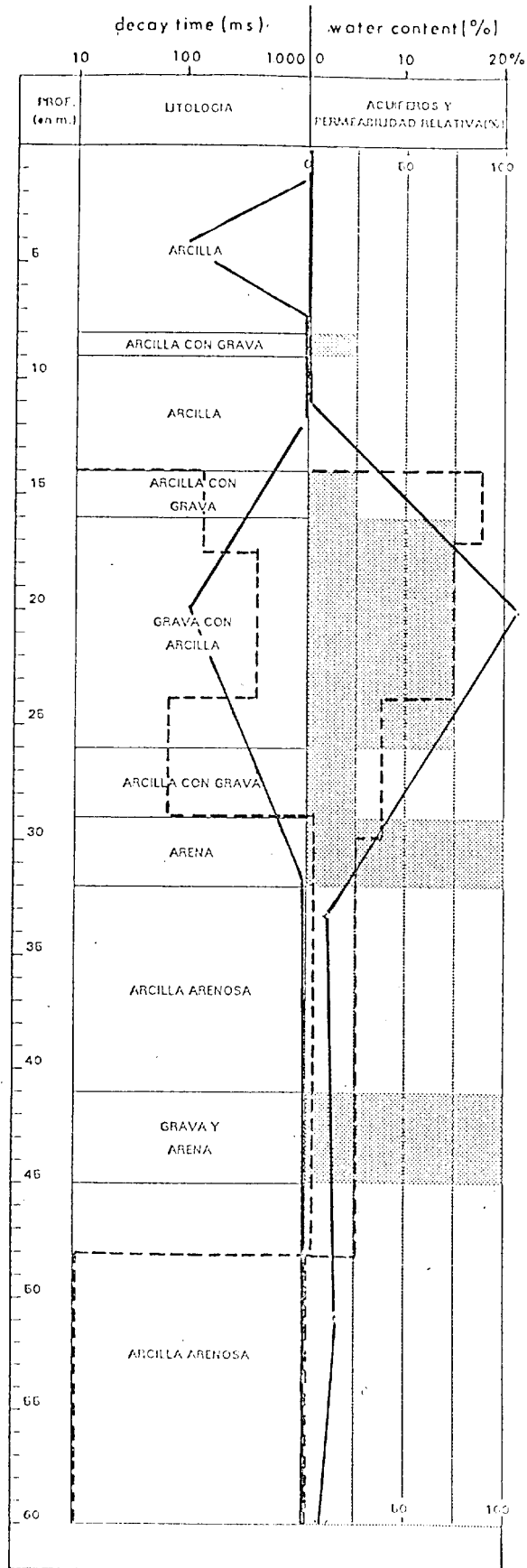


Fig. 45b

test. 32

INTERPRETACION

— p.r. = 500
 - - - p.r. = 200

Test site: Arcos, site4	File: test_41
Date: 21.05.98	Time: 20.20
Signal/Noise = 2.80	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

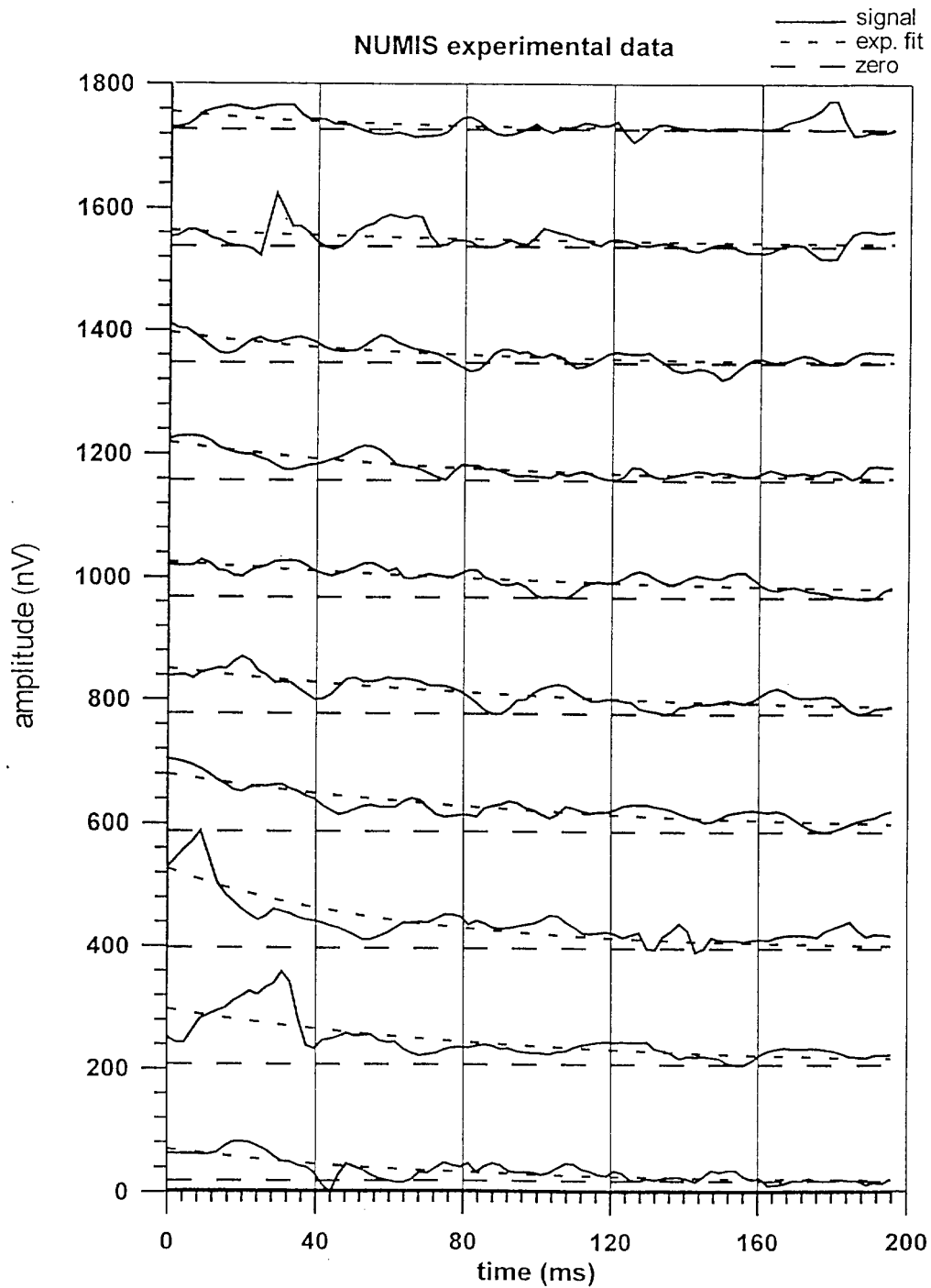


Fig. 46a Sondeo D-0

Test site: Arcos, site4	File: test_41
Date: 21.05.98	Time: 20.20
Signal/Noise = 2.80	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

NUMIS experimental data

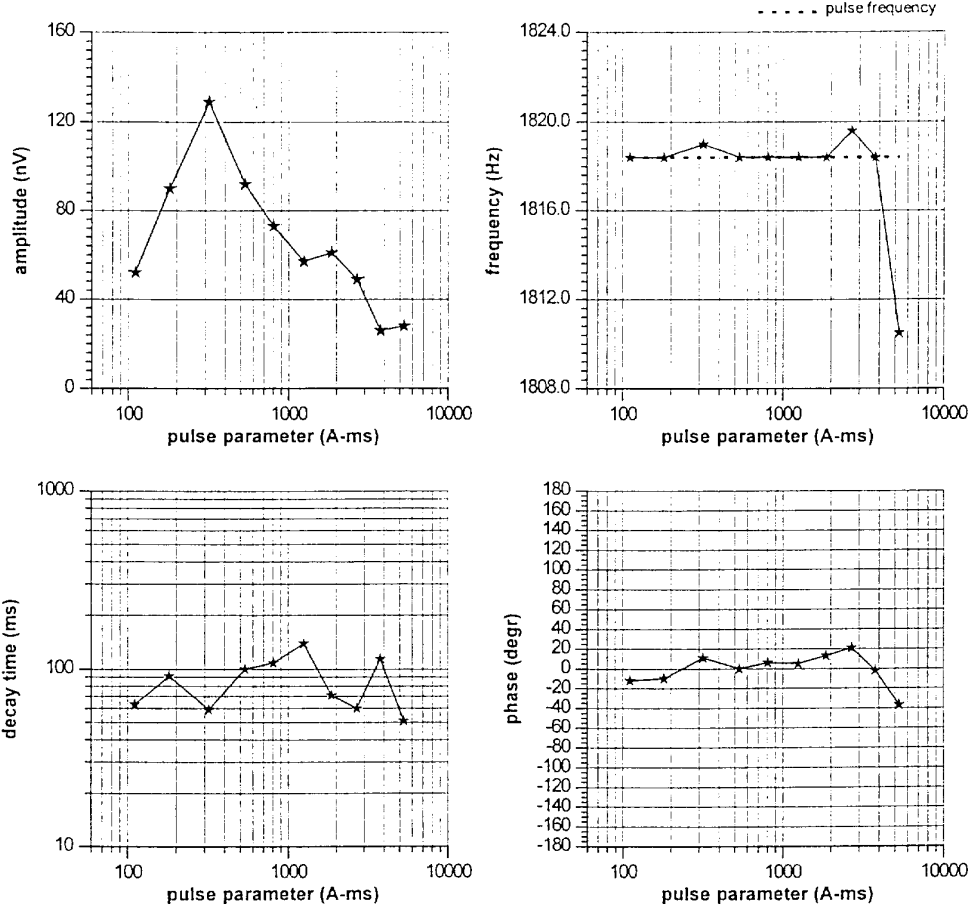
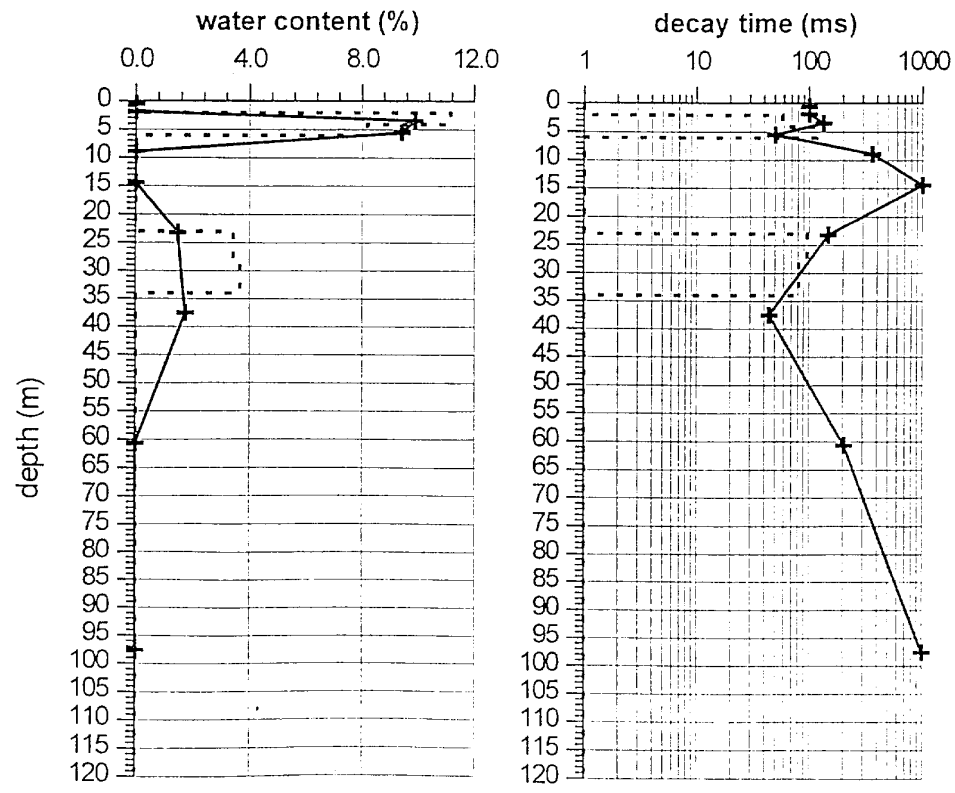
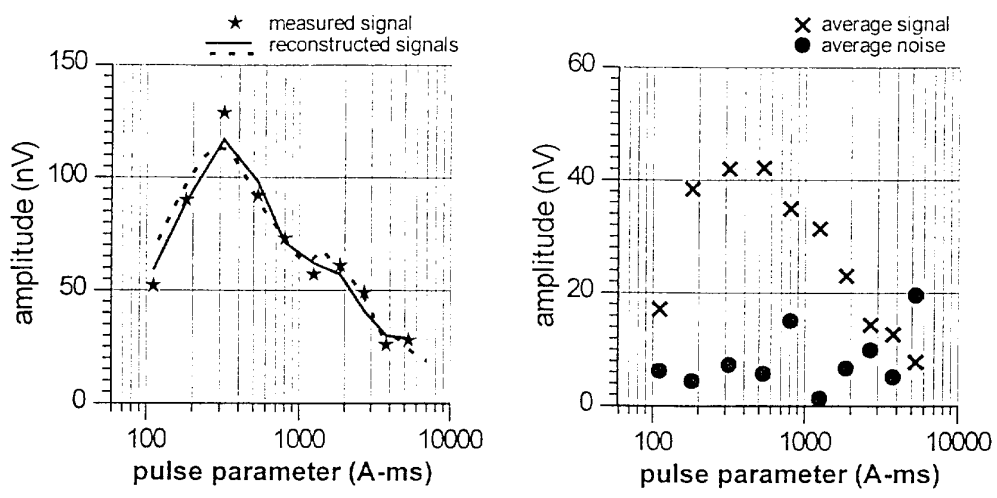


Fig. 46b Sondeo D-0

Test site: Arcos, site4	File: test_41
Date: 21.05.98	Time: 20.20
Signal/Noise = 2.80	Stacking number = 50
Processing window = 198.0 ms	Time constant of filtering = 10 ms
Tx/Rx loop: huit square 80 m	

NUMIS inversion results



— parameter of regularization = 500
 fitting error (%) = 8.4
 - - - parameter of regularization = 200
 fitting error (%) = 7.9

Fig. 46c Sondeo D-0