

**ESTUDIO MEDIANTE SONDEOS  
ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DE  
TIEMPOS CON FINES HIDROGEOLÓGICOS  
EN ESTEPA (SEVILLA).**

**MARZO 2006**



MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN  
Y CIENCIA



Instituto Geológico  
y Minero de España



<b>INFORME</b>	<b>Identificación:</b> H 2.016.06
	<b>Fecha:</b> Marzo de 2006
<b>TÍTULO:</b> Estudio mediante sondeos eletromagnéticos en el dominio de los tiempos con fines hidrogeológicos	
<b>PROYECTO:</b> APOYO PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS Y EXPLOTACIÓN SOSTENIBLE DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE ESTEPA. Convenio IGME-Junta de Andalucía	
<b>RESUMEN (continuar al dorso en caso necesario):</b> Con este trabajo se pretendía conocer la idoneidad del método de prospección electromagnética aplicado para estudiar la profundidad del acuífero Jurásico de la Sierra de Estepa (Sevilla) en varios emplazamientos en los que sondeos mecánicos previamente perforados atravesaron en su totalidad el acuífero.	
<b>Revisión</b>	<b>Autores:</b> Sergio Martos Rosillo, Miguel Martín Machuca, Isla Fernandez Rodriguez, Emilio Mora Pérez y Diego García Mantero
<b>Nombre:</b> Miguel Martín Machuca	<b>Responsable:</b> Miguel Martín Machuca
<b>Unidad:</b> Hidrogeología y Aguas	
<b>Fecha:</b> Marzo de 2006	

# ÍNDICE

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>3</b>
<b>3. Resultados y conclusiones</b>	<b>6</b>
<b>APÉNDICE A: Breve explicación del método</b>	<b>12</b>
<b>APÉNDICE B: Instrumentación</b>	<b>14</b>
<b>APÉNDICE C: Modelos</b>	<b>19</b>
<b>APÉNDICE D: Figuras</b>	<b>22</b>
<b>APÉNDICE E: Reportaje fotográfico</b>	<b>36</b>

**La Dirección Técnica, Supervisión, Trabajo de Campo y Redacción del informe han sido realizados por:**

**Dirección Técnica y Supervisión:**

D. Miguel Martín Machuca. Ingeniero de Minas. IGME

D. Sergio Martos Rosillo. Geólogo. IGME

**Trabajo de campo y Redacción:**

D<sup>a</sup>. Isla Fernández Rodríguez. Geofísica. Geognosia S.L.L.

D. Emilio Mora Pérez. Operador especializado. Geognosia S.L.L.

D: Diego García Mantero. Peón Geofísico. Geognosia S.L.L.

**1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.**

## **1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.**

Se pretende conocer si el método electromagnético en el dominio de tiempos es adecuado para estudiar los acuíferos de una zona cercana, mediante la comparación de los resultados de 3 SEDT con sondeos mecánicos de los que se tiene la columna litológica.

El estudio está planteado para alcanzar profundidades máximas de unos 400 metros. La geología presente son calizas sobre el triásico. Con este estudio se pretende definir dicho contacto además, si fuera posible, diferenciar distintas zonas por su grado de fracturación o características en el paquete calizo.

## **2.- METODOLOGÍA.**

## **2.- METODOLOGÍA.**

Para la realización de este estudio electromagnético en el dominio de tiempos se empleó un equipo para prospección electromagnética de la marca ZONGE ENGINEERING AND RESEARCH ORGANIZATION que constaba de un receptor GDP-32, un transmisor ZT-30 y demás equipos y accesorios necesarios para la realización de este tipo de estudios (para más detalle ver Apéndice B).

La realización del trabajo de campo siguió estos pasos:

- Se decide en la primera posición (X: 332715, Y: 4125470) que tamaño de bucle es el necesario para llegar a la profundidad requerida por el cliente a priori (unos 400 metros) para lo cual se empieza midiendo con un bucle de 100mx100m, utilizando 3 frecuencias de emisión (4Hz, 8Hz y 16Hz) como método de control de ruidos externos. Aunque con este tamaño llegamos a 400 metros con frecuencia de emisión de 16Hz, consideramos que es preferible utilizar el tamaño de 200mx200m ya que se llega muy justo a los 400 metros de profundidad y esto puede implicar que aunque en esta posición lleguemos a la profundidad requerida, no sea así en el resto de posiciones.
- Se mide en la misma posición 1 con un bucle transmisor de 200mx200m, obteniendo en este caso datos limpios hasta cerca de 700 metros, y siendo compatible la información obtenida con ambos tamaños de bucle emisor.
- Se mide con bucle de tamaño 200mx200m en la posición 2 (X: 333215, Y: 4125860) con las tres mismas frecuencias, resultando ser con la que obtenemos mejores datos 16 Hz, y llegando en este caso a una profundidad de unos 550 metros.
- Se mide en la posición 3 (X: 33675, Y: 4127685), con un bucle de tamaño 125mx125m, ya que no cabe uno más grande, o si cabe estaría muy inclinado por topografía, algo que no es aconsejable ya que puede fasear los datos medidos. En este caso se mide con cuatro frecuencias de emisión 1Hz, 4Hz, 8Hz y 16Hz, obteniendo los datos más limpios a 8 Hz y llegando a una profundidad de unos 500 metros.

- La visualización de los datos en el campo permite determinar con cierta precisión si los datos medidos son lo suficientemente limpios para llegar a una profundidad determinada, pero la determinación de la profundidad del estudio puede variar respecto a la estimada en campo con el receptor de manera notable después de depurar los datos y modelarlos con algoritmos más precisos que los que usa el receptor.

Una vez realizada la toma de datos en campo se pasa al procesado e interpretación de los perfiles en gabinete. Dentro de esta etapa podemos destacar:

- Se depuraron los datos y se modelaron las medidas tomadas en el centro del bucle. Se modelan todas las diferentes frecuencias y se decide para cual de ellas tenemos los datos más limpios.

**3.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES.**

90-130 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 500 Ohm-m hasta 700 Ohm-m
130-180 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 700 Ohm-m hasta 900 Ohm-m
180-230 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 900 Ohm-m hasta 500 Ohm-m
230-330 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 500 Ohm-m a 15 Ohm-m
330-390 metros	capa con unos 15 Ohm-m
390-500 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 15 Ohm-m hasta 70 Ohm-m
500-550 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 70 Ohm-m hasta 150 Ohm-m
550-620 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 150 Ohm-m a 170 Ohm-m
620 metros -	capa con unos 170 Ohm-m

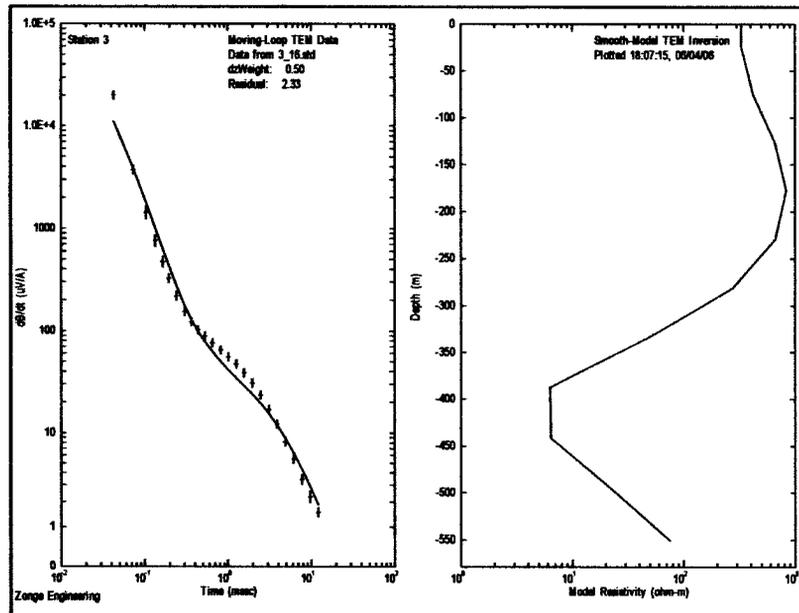
En este bucle obtenemos datos limpios hasta unos 700 metros de profundidad.

Si nos fijamos en la curva de caída (gráfica de la izquierda), en la que se representa los datos medidos con una cruz y el modelo calculado con una línea continua, podemos observar que no tiene un ajuste perfecto, esto nos lleva a poder afirmar que algunos de los contactos podrían estar a una profundidad un poco menor que la estimada en el modelo. Por lo que como conclusión a este bucle tendríamos que: si se ve el contacto inferior de las calizas que se encuentra a unos 250 metros de profundidad y que dentro de las calizas podemos diferenciar varias capas.

**Posición 2. X: 333215, Y: 4125860**

**TAMAÑO DE BUCLE 200mx200m**

**Frecuencia de emisión: 16Hz**



Este punto se mide con una valla en uno de los laterales del bucle.

0-80 metros	capa con unos 300 Ohm-m
80-130 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 300 Ohm-m hasta 600 Ohm-m
130-175 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 600 Ohm-m hasta 800 Ohm-m
175-230 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 800 Ohm-m hasta 600 Ohm-m
230-290 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 600 Ohm-m a 200 Ohm-m
290-390 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 200 Ohm-m a 7 Ohm-m
390-440 metros	capa con unos 7 Ohm-m
440 metros -	capa con tendencia al aumento de la resistividad.

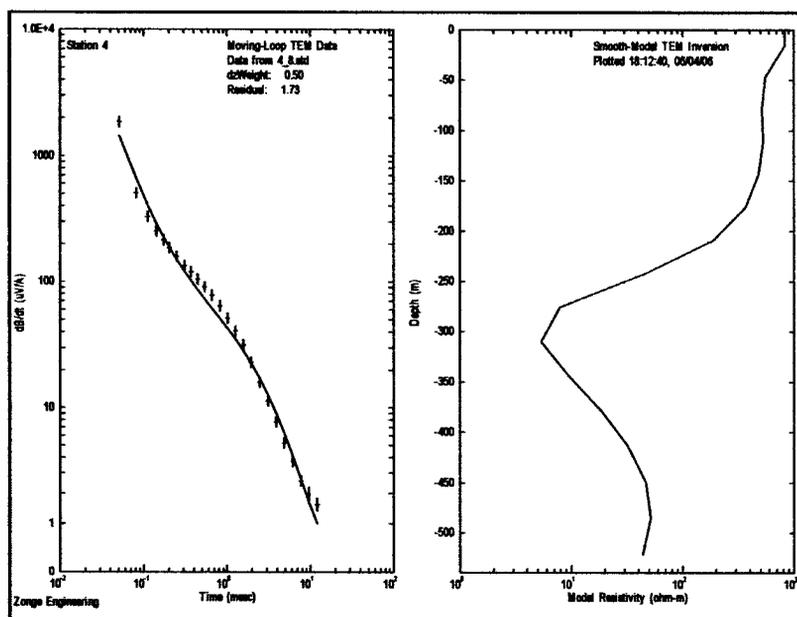
En este bucle obtenemos datos limpios hasta unos 550 metros de profundidad.

Este es el mismo caso que en el bucle anterior en el que si nos fijamos en la curva de caída (gráfica de la izquierda), en la que se representa los datos medidos con una cruz y el modelo calculado con una línea continua, podemos observar que no tiene un ajuste perfecto, esto nos lleva a poder afirmar que algunos de los contactos podrían estar a una profundidad un poco menor que la estimada en el modelo. Por lo que como conclusión a este bucle tendríamos que: si se ve el contacto inferior de las calizas que se encontraría un poco por encima de donde comienza la tendencia a la disminución clara de la resistividad (a unos 290 metros de profundidad) y que dentro de las calizas podemos diferenciar varias capas.

**Posición 3. X: 332675, Y: 4127685**

**TAMAÑO DE BUCLE 125mx125m**

**Frecuencia de emisión: 8Hz**



0-50 metros      capa o conjunto de capas que varían desde 800 Ohm-m hasta 500 Ohm-m

50-150 metros      capa con unos 500 Ohm-m

150-175 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 500 Ohm-m hasta 350 Ohm-m
175-220 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 350 Ohm-m hasta 200 Ohm-m
220-270 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 200 Ohm-m a 8 Ohm-m
270-310 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 8 Ohm-m hasta 5 Ohm-m
310-450 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 5 Ohm-m hasta 50 Ohm-m
450-480 metros	capa con unos 50 Ohm-m
480 metros -	capa con tendencia a la disminución de la resistividad.

En este bucle obtenemos datos limpios hasta unos 500 metros de profundidad.

De nuevo ocurre lo que en bucles anteriores que si nos fijamos en la curva de caída (gráfica de la izquierda), en la que se representa los datos medidos con una cruz y el modelo calculado con una línea continua, podemos observar que no tiene un ajuste perfecto, esto nos lleva a poder afirmar que algunos de los contactos podrían estar a una profundidad un poco menor que la estimada en el modelo. Por lo que como conclusión a este bucle tendríamos que: si se ve el contacto inferior de las calizas que se encuentra a unos 220 metros de profundidad y que dentro de las calizas podemos diferenciar varias capas.

**APÉNDICE A: Breve explicación del método**

El SEDT (Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempo) es un método electromagnético en el dominio de tiempos, esto quiere decir que se mide en diferentes ventanas o aperturas de la antena en el tiempo. El equipo necesario consiste en un transmisor que inyecta corriente en un bucle (una antena hecha con un cuadrado de cable) de distintas dimensiones (dependiendo de la profundidad a la que se quiere llegar en el estudio, el área a cubrir y los niveles de ruido ambiental) y un receptor (una antena).

La corriente que se inyecta en el bucle es una corriente en forma de ciclo alternando la polaridad. Las medidas en el receptor se miden durante el tiempo en que no se esta inyectando corriente, de forma que solo están presentes los campos secundarios. Se crea un campo magnético por la inyección de corriente en el bucle, y durante el tiempo en que no hay corriente se mide con la antena receptora el voltaje generado por la difusión de la energía inducida.

Normalmente los intervalos de tiempo de caída en que no se inyecta corriente varían desde 30 microsegundos a cientos de milisegundos para exploraciones profundas.

Es fundamental sincronizar el transmisor y el receptor, para realmente medir solo en los intervalos de tiempo en que no se esta inyectando corriente en el bucle.

La topografía del terreno si es abrupta puede afectar negativamente a las medidas, ya que se asume que el bucle transmisor y la antena receptora se sitúan sobre superficies paralelas. En este estudio la topografía es bastante llana en todos los casos, por lo que no tenemos este problema.

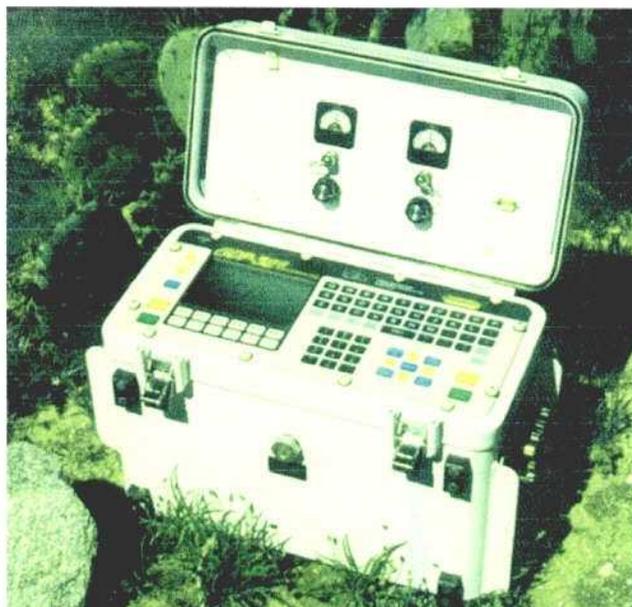
La configuración de campo que se utilice va a variar los resultados finales de las medidas tomadas en el campo. En este caso se utilizaron bucles como transmisores entre 100x100 metros y 200x200 metros.

**APÉNDICE B: Instrumentación**

## ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS. ZONGE ENGINEERING AND RESEARCH ORGANIZATION

### RECEPTOR MULTIFUNCIÓN GDP-32<sup>II</sup>.

El ZONGE GDP-32II es la cuarta generación de receptores GDP de la marca ZONGE ENGINEERING AND RESEARCH ORGANIZATION. Es un receptor multicanal en el dominio de tiempos o frecuencias para campos eléctricos y magnéticos de fuente natural o controlada.



**Figura 15. Receptor de Zonge (GPD32)**

Para la sincronización temporal emplea un sistema de oscilador de cuarzo de alta precisión con reloj que mantiene unos tiempos muy estables de referencia con rangos de deriva típica de menos de 5  $\mu\text{s/hr}$  (aproximadamente 0.03  $\text{mr/hr}$  de deriva de fase en 1 Hz). Opcionalmente el oscilador puede incorporar un sistema global de posicionamiento (GPS) para reducir los errores temporales. Un reloj idéntico en un controlador de transmisor (XMT-32) puede ser sincronizado con uno o más receptores GDP y usado para conducir un transmisor, eliminando así la necesidad de una conexión física que proporcione la referencia de fase.

El receptor GDP-32II puede adquirir datos para más de 16 canales analógicos independientes. Cada señal de entrada está condicionada por la ganancia aplicada a la señal y por un circuito de filtrado, después del cuál es muestreado y convertido a formato digital. El receptor GDP-32II lleva incorporados programas que permiten al operador revisar los datos numérica y gráficamente en el campo. Un error medio (SEM) es calculado para cada medida así como la resistividad aparente para las distintas antenas y programas de adquisición. Las curvas de caída en el dominio de tiempos y el espectro en el dominio de frecuencias pueden visualizarse gráficamente. Así mismo se puede mostrar la barra de error para un conjunto de medidas repetidas.

Otras características del GDP-32II son:

Es un receptor duro y hermético transportable por un operador.

Posee un procesador de 66 MHz y 586 MPU (opcional hasta 133 MHz).

Es un sistema de banda ancha en el dominio de tiempos y de frecuencias ( $0.001 \leq f \leq 8192$  Hz).

Al ser un sistema multifunción permite realizar distinto tipo de estudios: resistividad, PI en Dominio de Tiempos o de Frecuencias, Resistividad Compleja, MTAFC, MT/AMT, SEDT/nanoSEDT,...).

Permite un gran almacenamiento de datos, más de 4 GB de disco duro.

Sistema "Ethernet" para el volcado de datos (0.5 a 1.2 MB/sg).

Sistema de operación remota mediante el puerto serie.

Fuente de calibración interna con Programas que permiten la calibración de los datos.

Control automático de ganancia y de Potencial Espontáneo.

### **ANTENA TEM-3**

Con los avances en los equipos receptores se ha hecho necesario el incremento en la calidad de los sensores para el campo magnético. ZONGE fabrica un completo rango de bobinas de inducción basadas en detectores de campo magnético adaptados a las condiciones de cada

aplicación. Poco ruido, poca potencia y estabilidad térmica son importantes objetivos para los sensores magnéticos aplicados a la exploración geofísica.

Alguna característica de la antena TEM-3 son:

$F_0 > 20$  kHz

$\text{dB/dt respuesta } A_e = 10.000 \text{ m}^2$ .



**Figura 17. Antena TEM-3 de Zonge.**

### **TRANSMISOR ZT-30**

ZONGE ha desarrollado 4 transmisores que utilizan fuentes de corriente continua como fuentes primarias de energía (además de los transmisores GGT que utilizan un motor como generador). Tres de estos transmisores fueron desarrollados para estudios SEDT y el cuarto para estudios de PI o resistividad a pequeña escala.

El ZT-30 utiliza fuente corriente continua (24-120 V) generando corrientes que pueden superar los 30 A. Dos o más baterías de coche pueden conectarse en serie de forma que pueden utilizarse como fuente de energía para estudios SEDT con un transmisor ZT-30. El ZT-30 puede también utilizarse como transmisor para estudios de PI/resistividad que necesiten poca

energía en estudios en los que la intensidad no requiera ser regulada (PI en Dominio de Tiempos) o en los que la forma de la curva de corriente pueda ser medida directamente.

El ZT-30 es pequeño y de fácil transporte por una persona. Es un transmisor apropiado para estudios SEDT con objetivos a profundidades menores de 500 metros.



**Figura 16. Transmisor ZT30 y controlados de corriente XMT.**

**APÉNDICE C: Modelos**

Los modelos de inversión suavizados convierten los datos medidos (dB/dt) en perfiles de resistividad respecto a la profundidad. Los datos observados de tiempos y dB/dt se utilizan en cada estación para determinar el modelo de partida o inicial que es un modelo de capas horizontales.

El espesor de las capas se determina calculando la profundidad de penetración del campo fuente para cada ventana de tiempos. La resistividad de cada capa se ajusta iterativamente hasta que la diferencia entre el modelo y los datos observados se ajusta al error determinado, siempre que sea consistente con un contraste suavizado. El contraste suavizado limita la variación de resistividad entre las distintas capas.

Existen dos parámetros en los modelos que determinan el tipo de resultado, estos son el peso que se le da al modelo inicial y el peso que se le da al suavizado. El peso del modelo inicial puede variar entre 0.001 y 100, siendo los valores más altos los que calculan modelos más parecidos al modelo inicial y los más bajos al contrario.

Cuanto más alto es el peso del suavizado, menos contrastes son permitidos en el modelo., si el valor es muy bajo los cambios serán muy bruscos.

En todos los casos se debe jugar con estos parámetros para crear modelos con errores bajos pero reales geológicamente.

El resultado de un modelo de suavizado es un conjunto de resistividades estimadas que varían suavemente con la profundidad. La variación lateral es calculada invirtiendo sucesivamente las estaciones a lo largo de un perfil. Los resultados para una línea completa se presentan en una pseudo-sección con los contornos de resistividades.

Para calcular los contornos se localiza por convenio, las resistividades en el punto medio de cada capa, formando una columna por debajo de cada estación.

Los modelos de suavizado no requieren modelos iniciales, estos se calculan a partir de los propios datos observados.

Los datos observados se preparan para la inversión con el programa TEMAVG, que lo que hace es cambiar el formato de los datos de volcado del receptor para que pueda ser leído por los programas de inversión de ZONGE. Todos los parámetros de la campaña, junto con los propios de los datos, pueden modificarse en el paso previo a la inversión, además de asociar los datos con sus coordenadas y borrar los datos de las ventanas de tiempos con ruido o mala repetibilidad.

Los modelos han sido creados por:

Scott MacInnes

Mykle Raymond

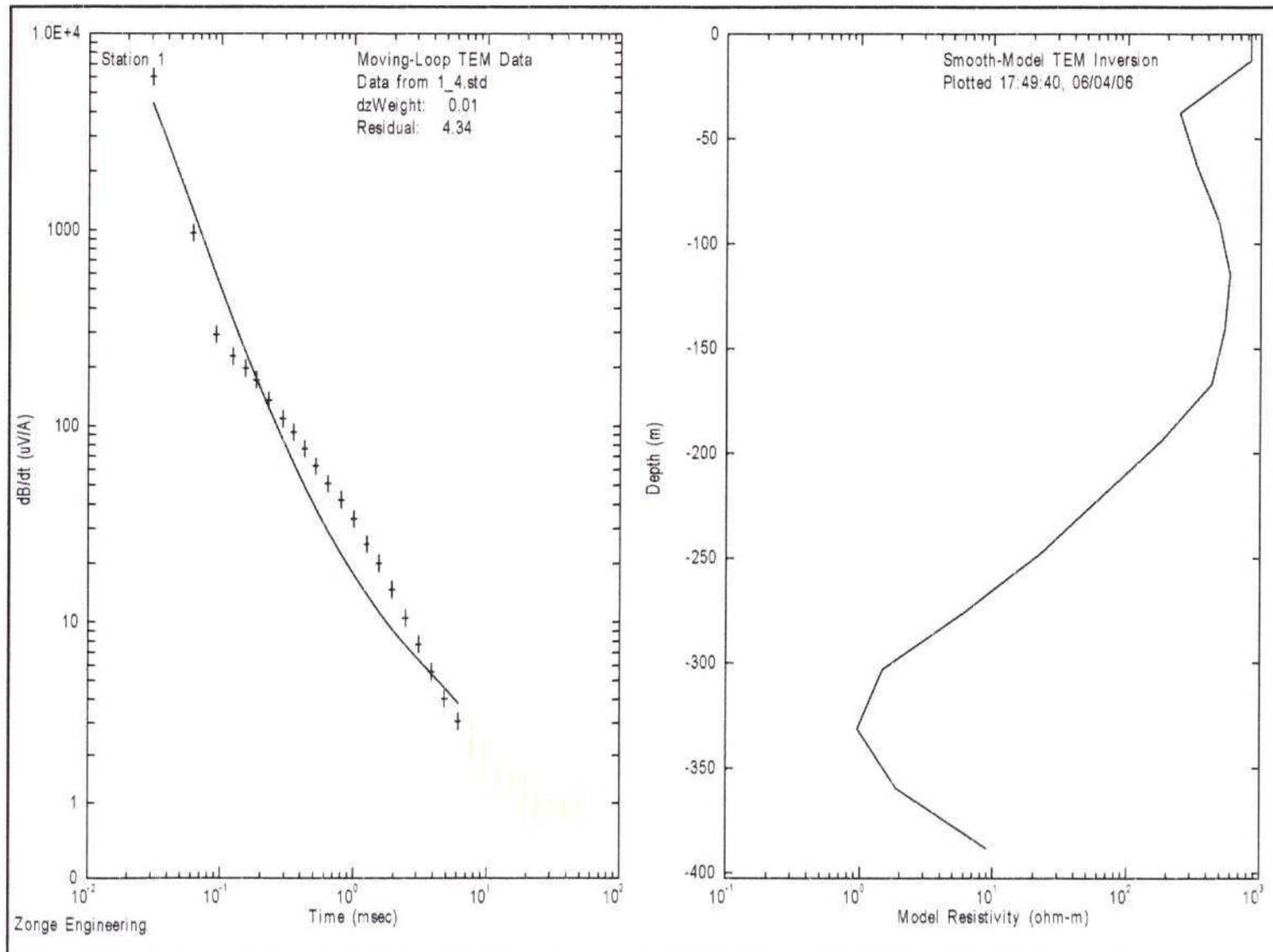
April 2001

Zonge Engineering and Research Organization, Inc

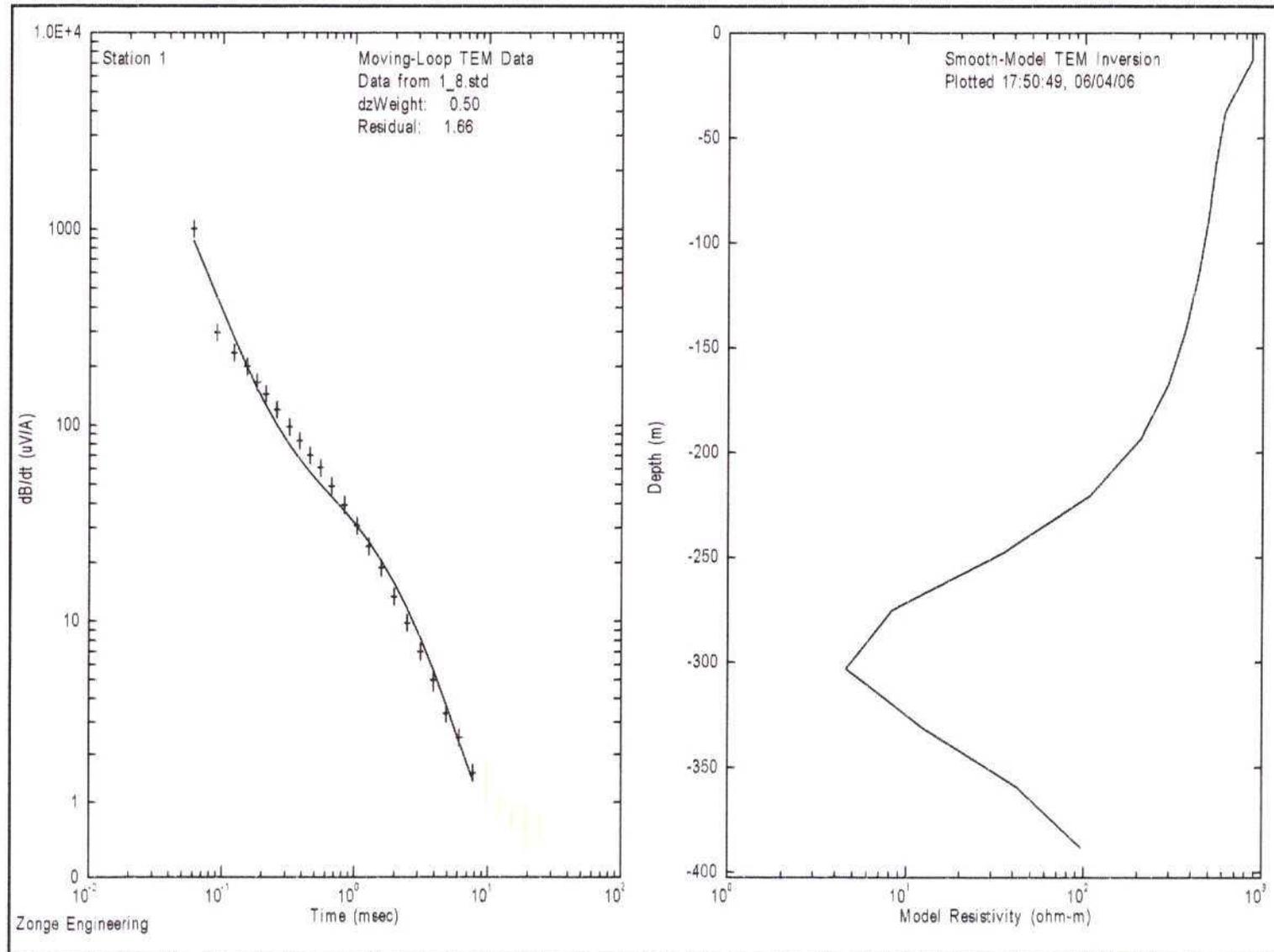
**APÉNDICE D: Figuras**



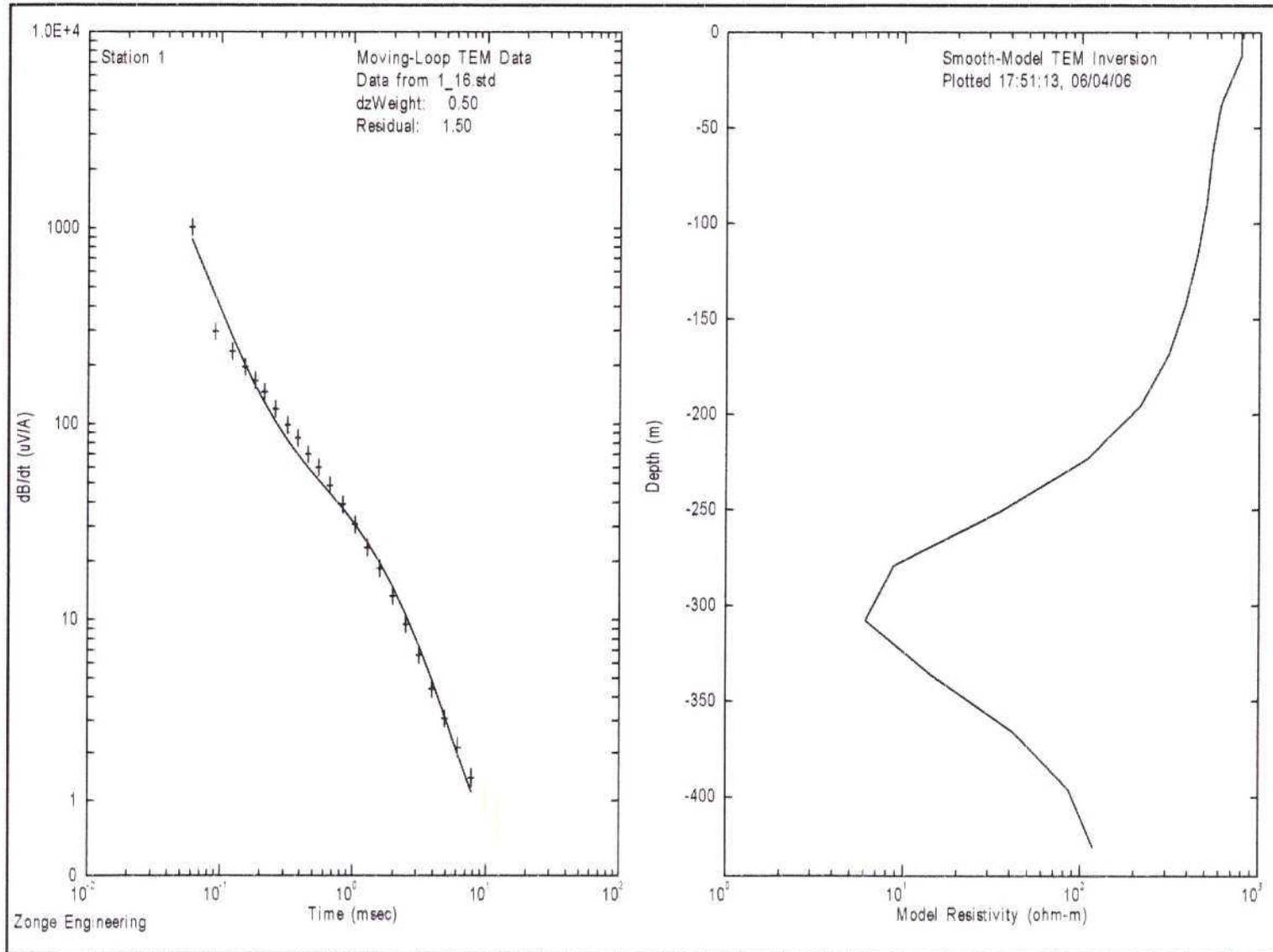
# POSICIÓN 1. BUCLE DE 100mX100m. Frecuencia de emisión 4Hz



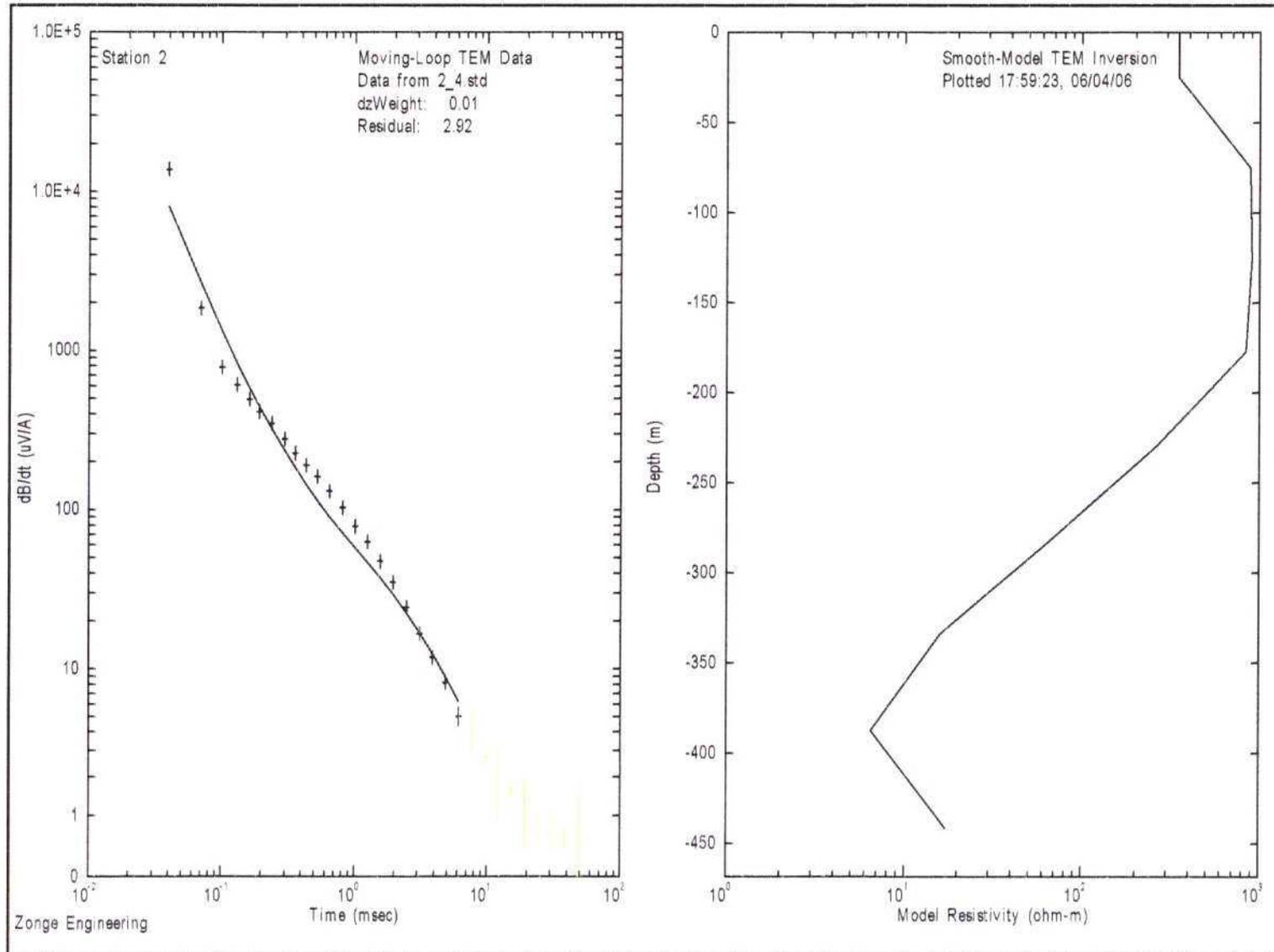
# POSICIÓN 1. BUCLE DE 100mX100m. Frecuencia de emisión 8Hz



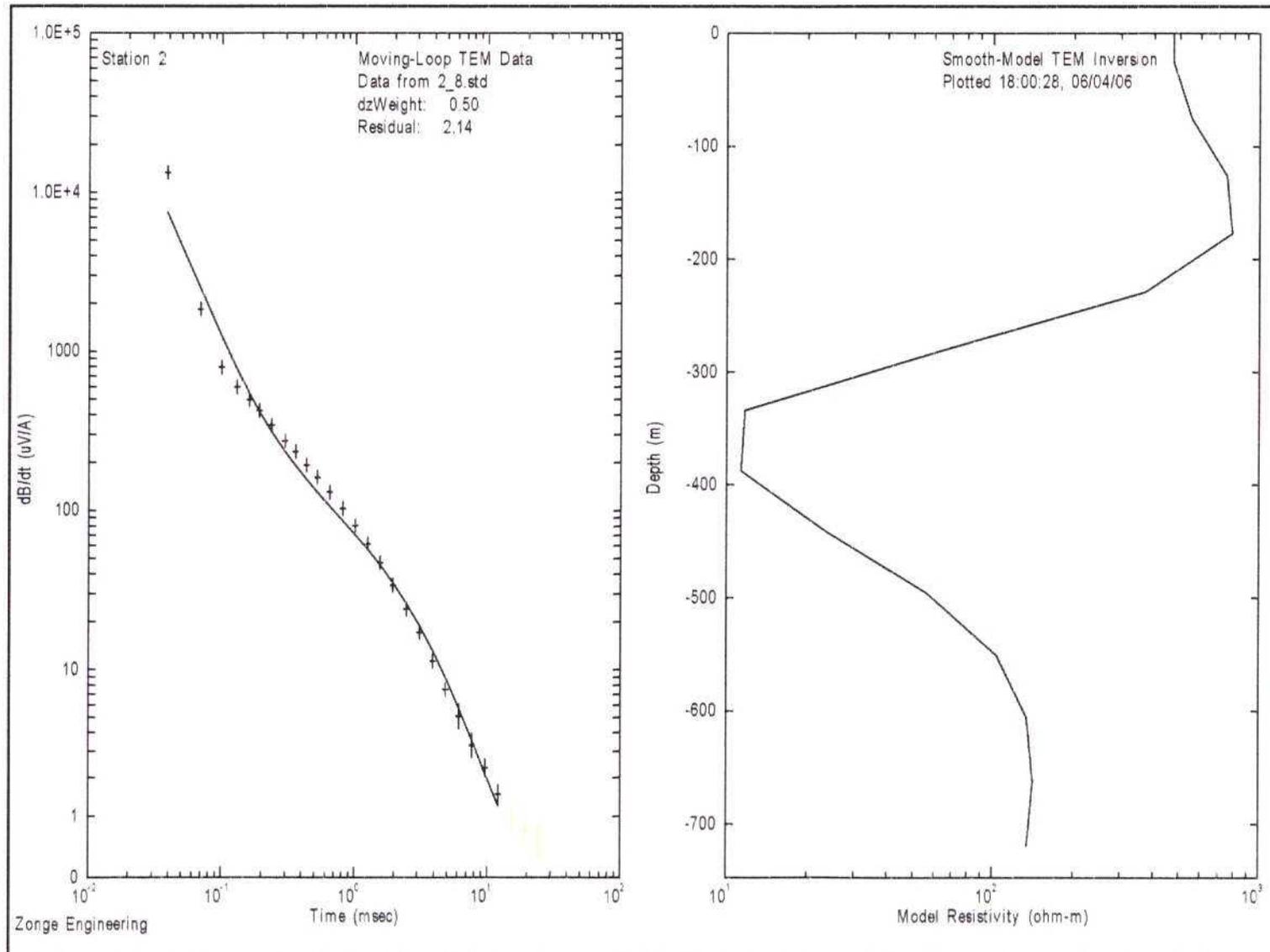
# POSICIÓN 1. BUCLE DE 100mX100m. Frecuencia de emisión 16Hz



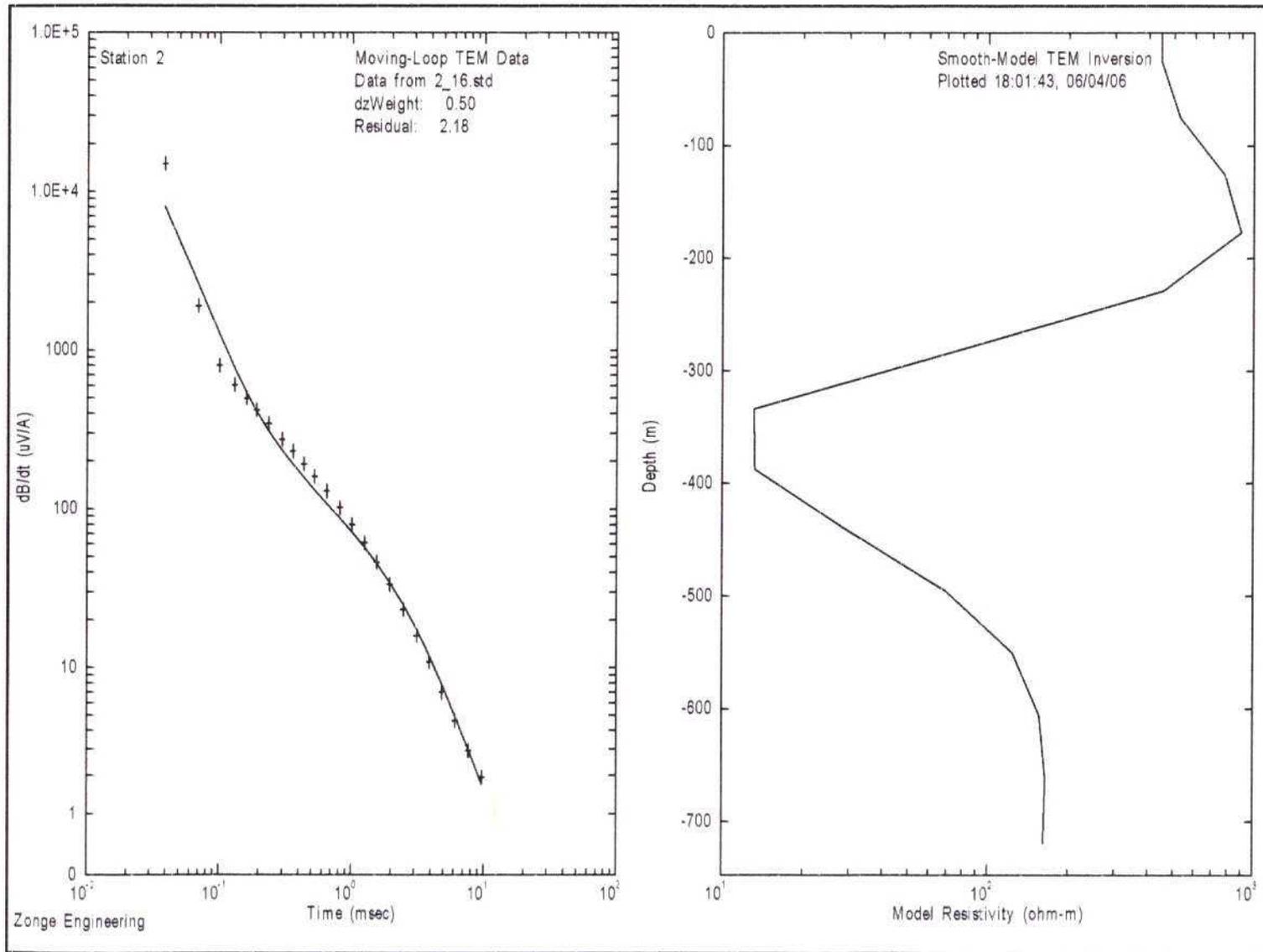
# POSICIÓN 1. BUCLE DE 200mX200m. Frecuencia de emisión 4Hz



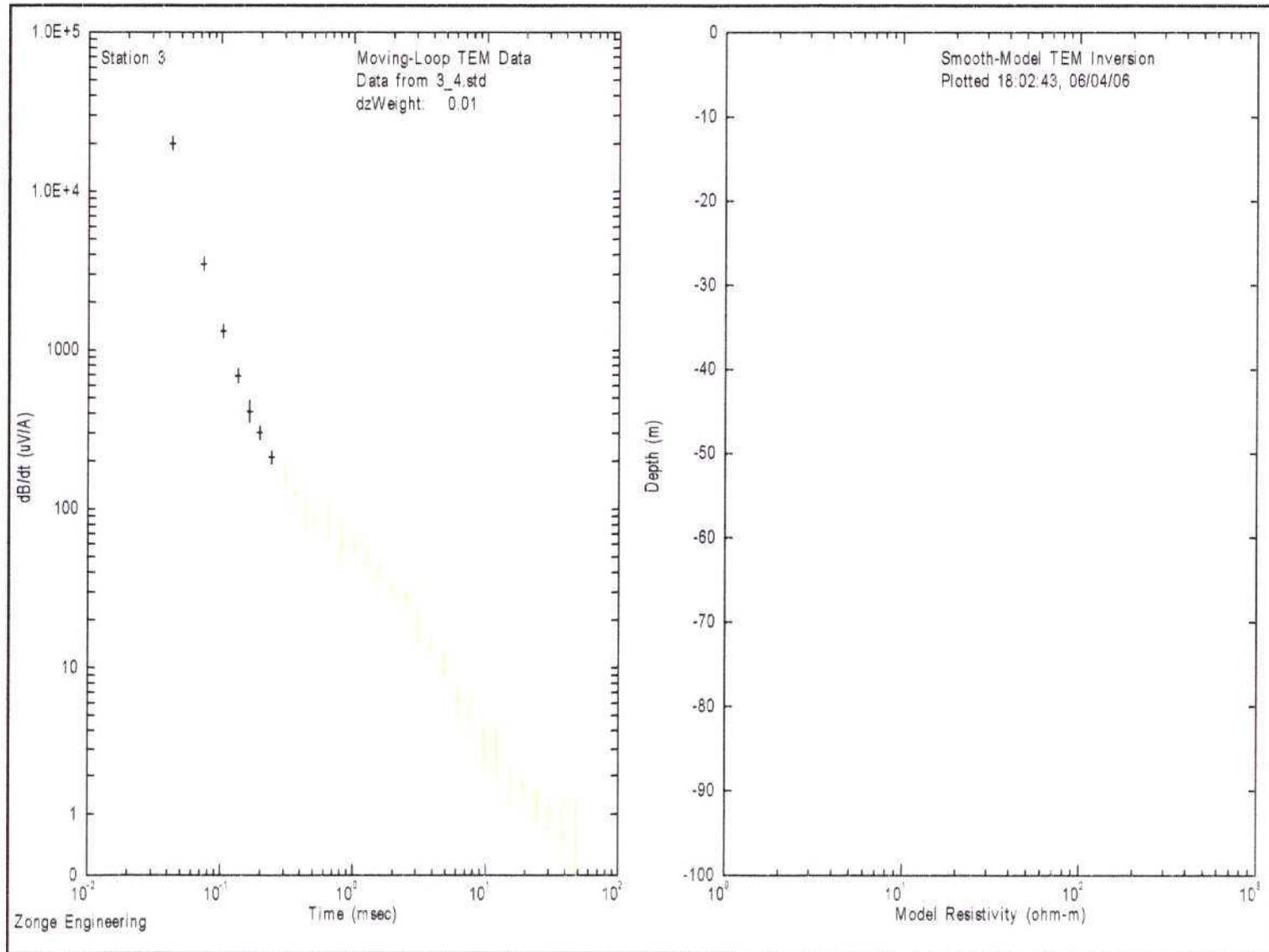
# POSICIÓN 1. BUCLE DE 200mX200m. Frecuencia de emisión 8Hz



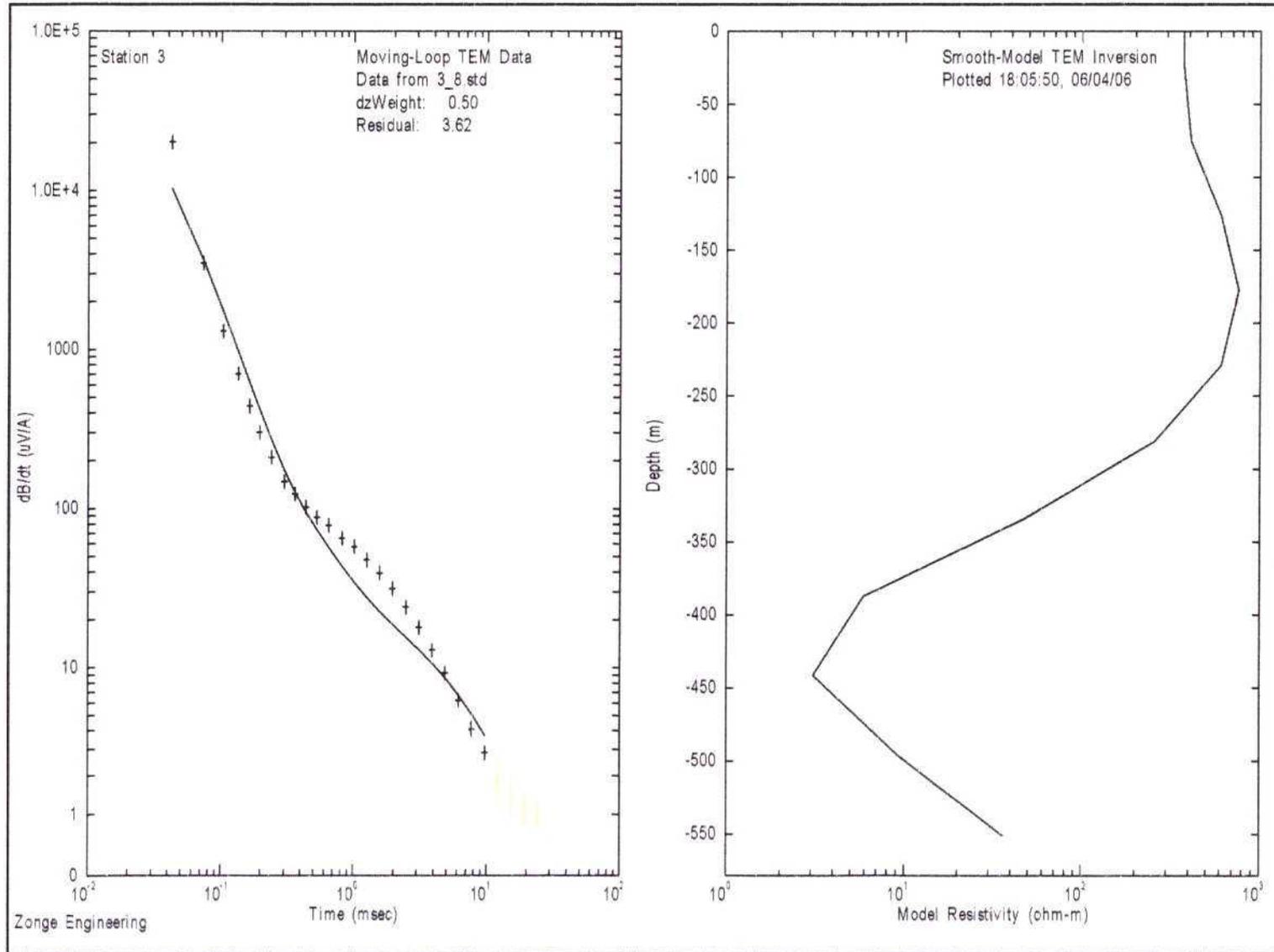
# POSICIÓN 1. BUCLE DE 200mX200m. Frecuencia de emisión 16Hz



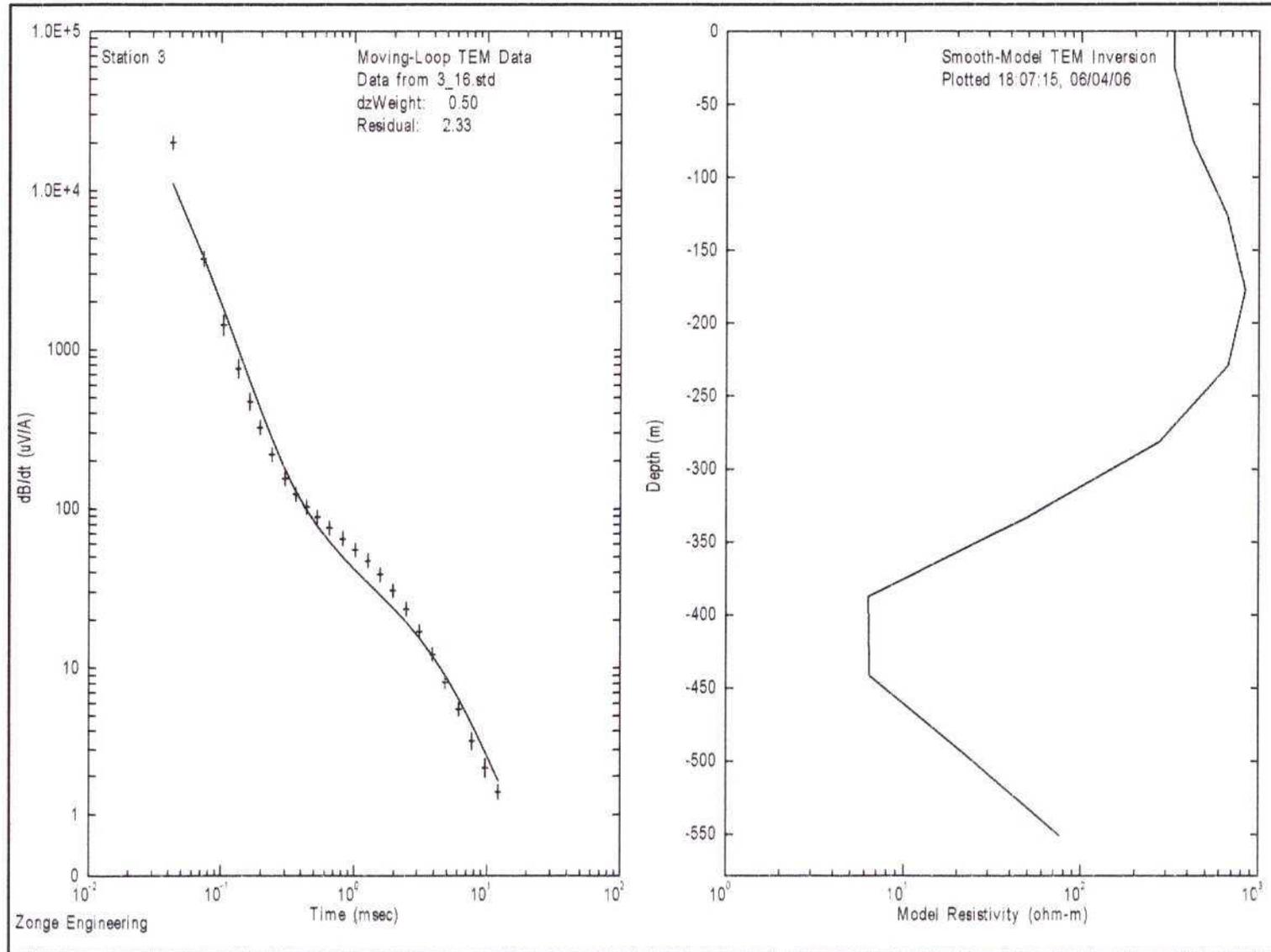
# POSICIÓN 2. BUCLE DE 200mX200m. Frecuencia de emisión 4Hz



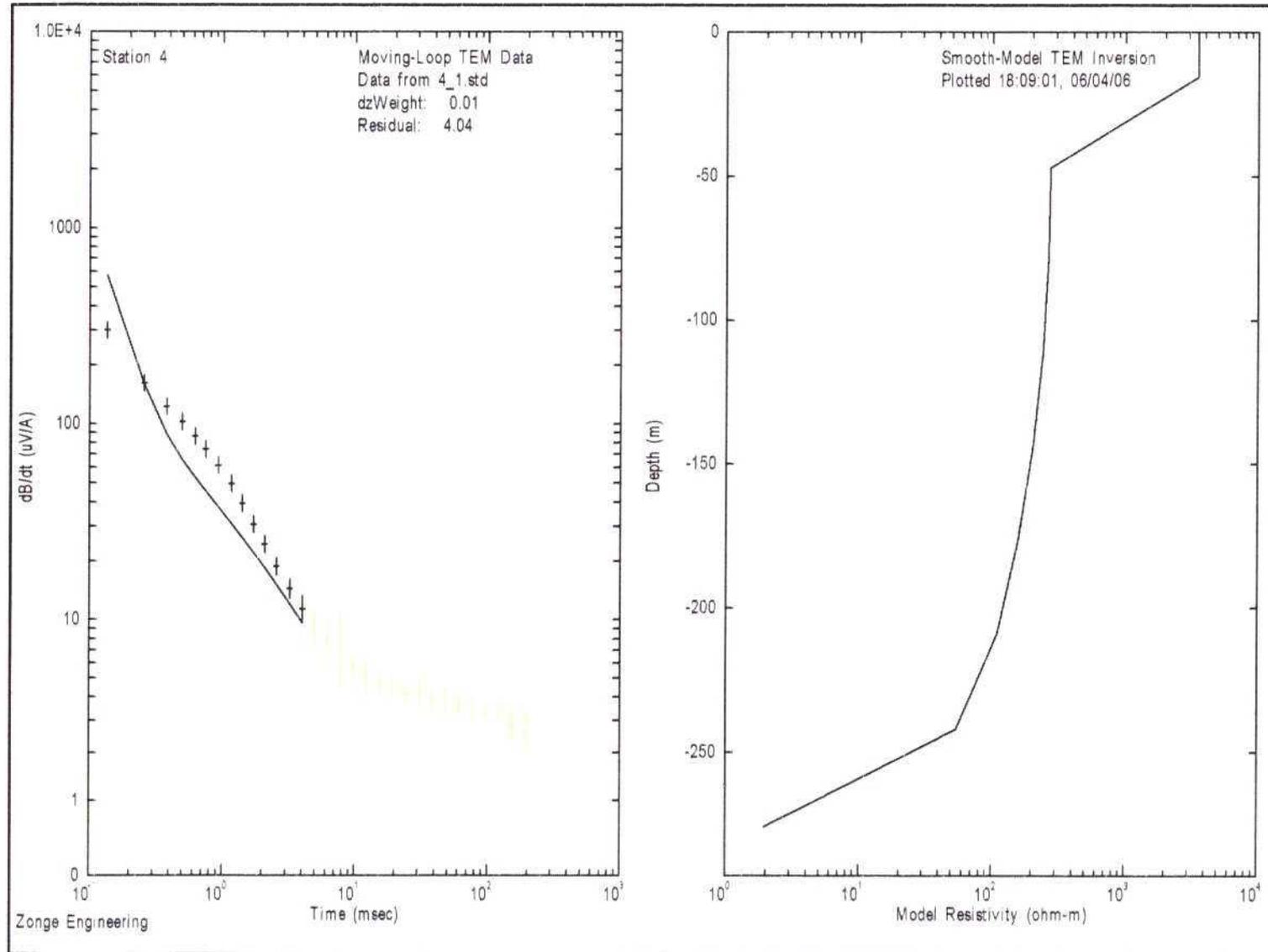
# POSICIÓN 2. BUCLE DE 200mX200m. Frecuencia de emisión 8Hz



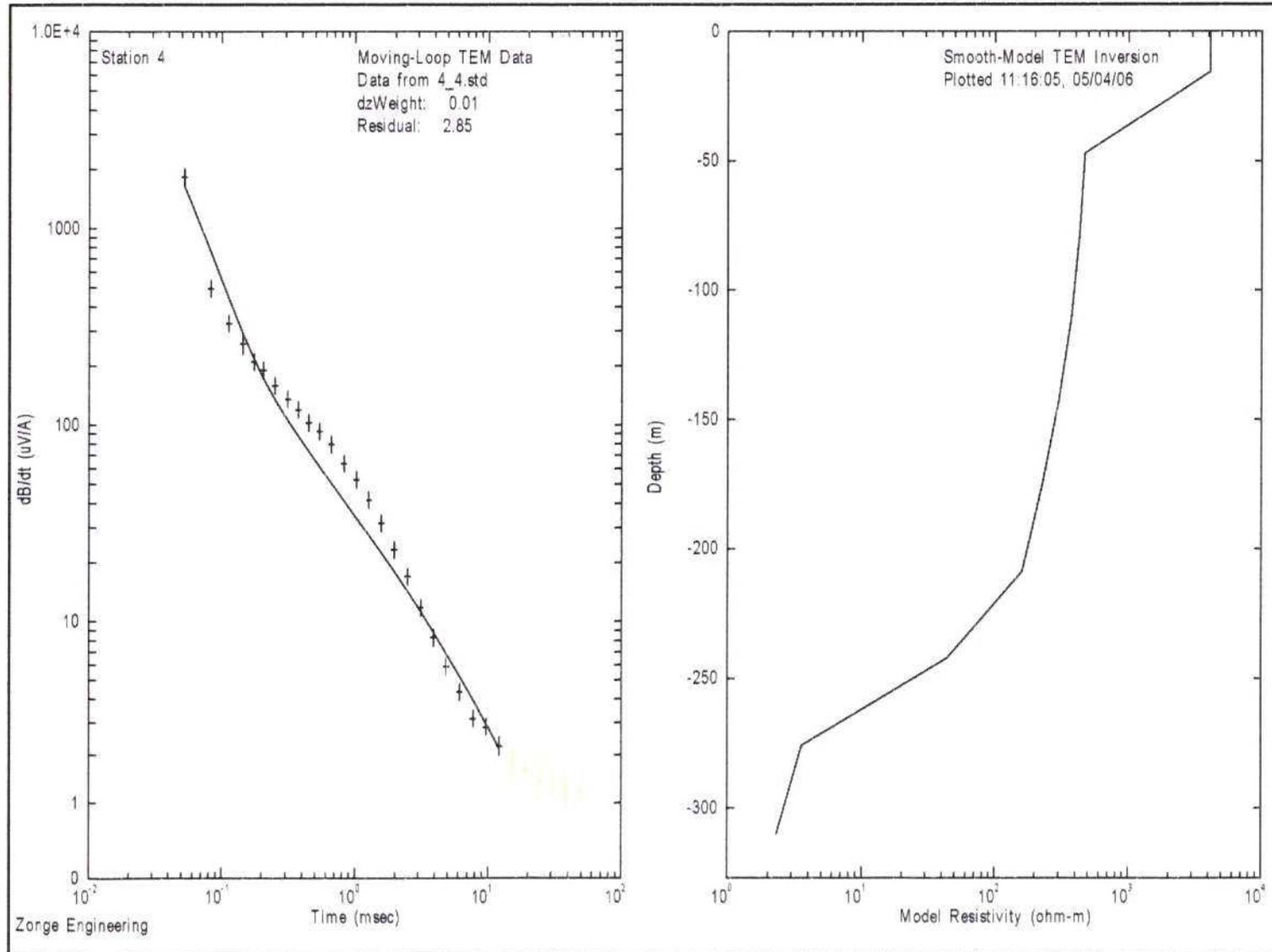
# POSICIÓN 2. BUCLE DE 200mX200m. Frecuencia de emisión 16Hz



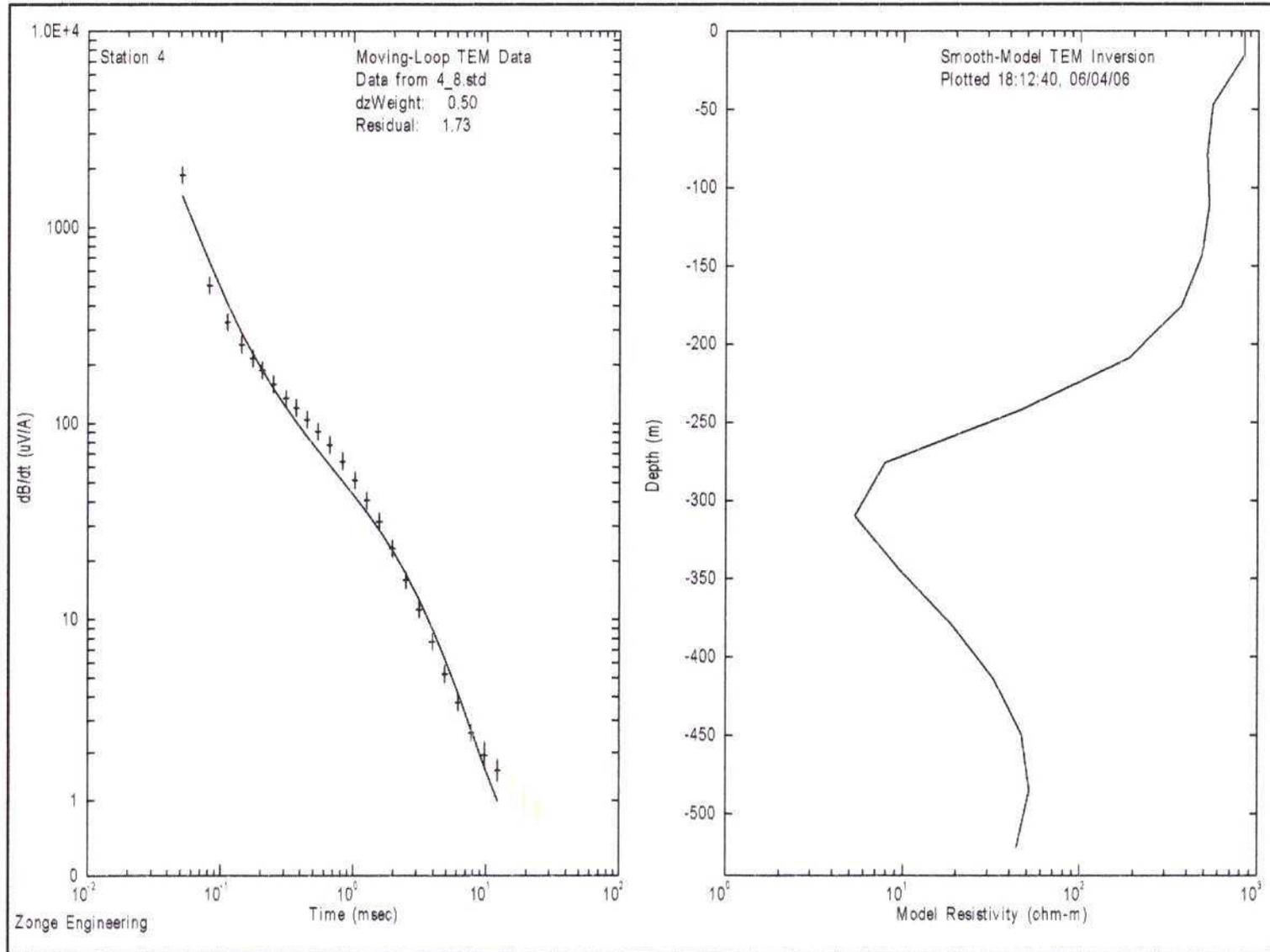
# POSICIÓN 3. BUCLE DE 125mX125m. Frecuencia de emisión 1Hz



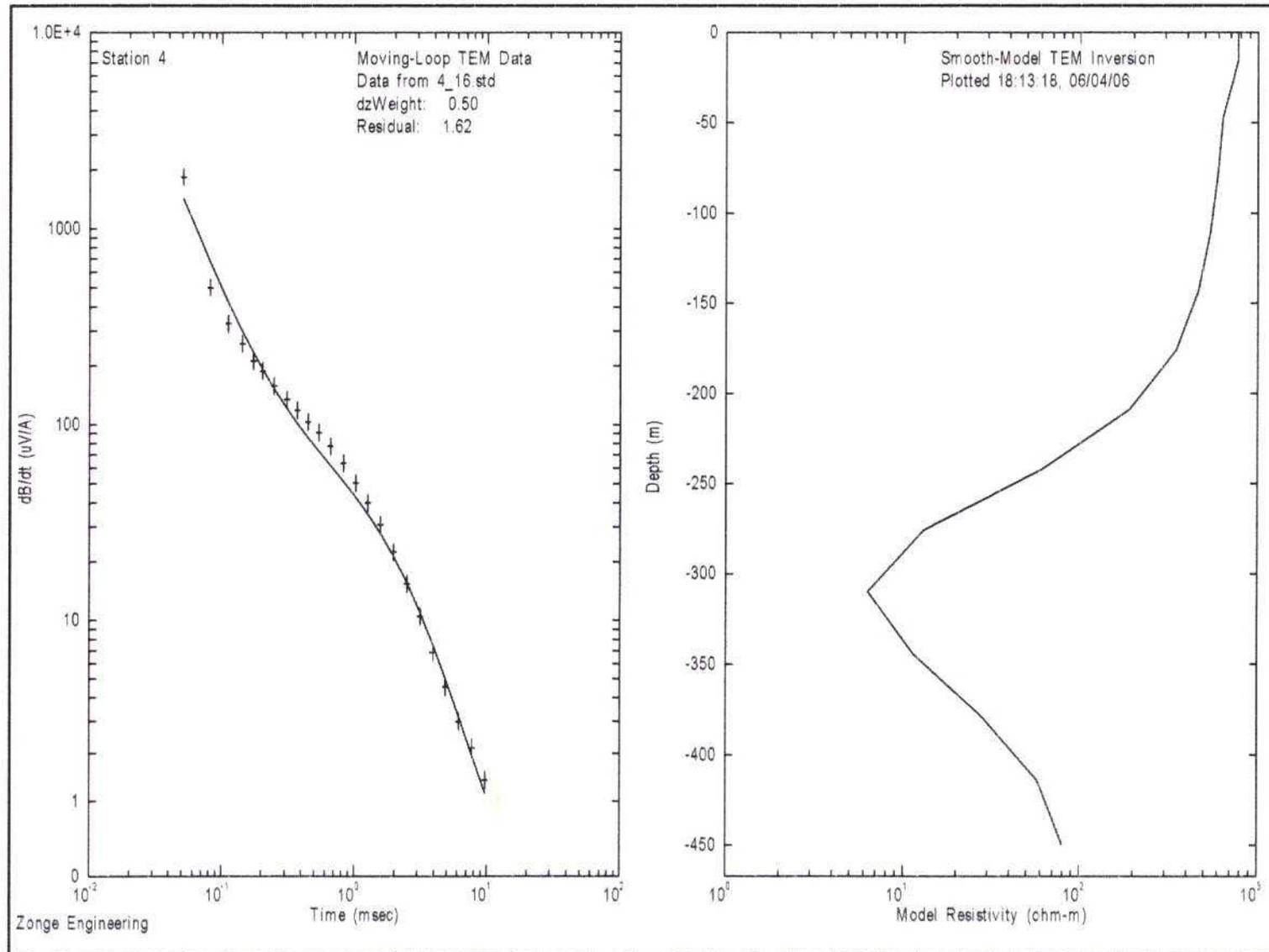
# POSICIÓN 3. BUCLE DE 125mX125m. Frecuencia de emisión 4Hz



# POSICIÓN 3. BUCLE DE 125mX125m. Frecuencia de emisión 8Hz



# POSICIÓN 3. BUCLE DE 125mX125m. Frecuencia de emisión 16Hz



**APÉNDICE E: Reportaje fotográfico**

**POSICIÓN 1**



**POSICIÓN 2**



**POSICIÓN 3**



ESTUDIO:  
ESTUDIO MEDIANTE SONDEOS ELECTROMAGNETICOS EN EL DOMINIO  
DE TIEMPOS CON FINES HIDROGEOLOGICOS.

FECHA:  
MARZO 2006