

## Anexo 2

### Resultados de la campaña de terreno de sondeo de resonancia magnética

La campaña de sondeo de resonancia magnética (SRM) se llevó a cabo entre enero y abril 2021, donde se realizaron mediciones en 27 sitios a lo largo del área de estudio (Figura A2.1). Los puntos de medición se eligieron en función de la información obtenida de la primera campaña de campo, donde se consideró principalmente la superficie libre disponible para el tendido de los bucles de antenas (igual o superior a 50 m<sup>2</sup>) y el nivel de urbanización para evitar excesivo ruido electromagnético. En este estudio, se utilizó un sistema NUMIS Poly MRS, con un receptor y dos convertidores CC / CC que permiten un tamaño de antena cuadrada de 150 m de longitud lateral. La profundidad máxima de investigación del SRM depende tanto del tamaño de la antena como de la conductividad eléctrica del subsuelo. Lamentablemente, las mediciones efectuadas con el SRM no entregaron los resultados esperados durante esta campaña de terreno debido a los siguientes factores:

a) *Baja intensidad del campo magnético terrestre en el área de estudio.*

El fenómeno de la resonancia magnética está relacionado con los Spin: una propiedad fundamental de la naturaleza (como la carga eléctrica o la masa) que se describe en la mecánica cuántica como una forma intrínseca de momento angular. Los núcleos tienen cargas positivas; por lo tanto un núcleo girante (es decir, con Spin nucleares no apareados) actúa como una pequeña barra magnética orientada a lo largo del eje de rotación. En este sentido los Spin pueden ser considerados como momentos magnéticos intrínsecos.

Los Spin libres (como para el agua en forma líquida) son sensibles a los campos magnéticos estáticos aplicados externamente, por lo que el campo magnético de la Tierra puede orientar los protones de hidrógenos del agua almacenada en los poros de los diferentes materiales del subsuelo a lo largo de su dirección (es decir, polarizándolos). Esta orientación de Spin da como resultado una magnetización de equilibrio proporcional al campo geomagnético (Weichman et al., 2000). La amplitud de la señal medida por el SRM es proporcional a esta magnetización (Shushakov, O.A. y Legchenko 1994a, b) y, por lo tanto, proporcional a la intensidad del campo geomagnético en el punto de medición.

Dentro del área de estudio, el campo geomagnético está cerca de su mínimo global (Chulliat et al. 2015; Figura A2.2), con una intensidad media medida en los puntos de sondajes de 23.350 nT. Por lo tanto, la señal generada por el agua subterránea es extremadamente baja, lo que limita la sensibilidad del método si se compara con ubicaciones con mayor intensidad de campo geomagnético. De hecho, la amplitud de la respuesta SRM es una función cuadrada del campo magnético terrestre (Legchenko et al., 1997) y, por lo tanto, la misma cantidad de agua en el subsuelo produce una señal más baja en áreas con un campo magnético más pequeño. Por ejemplo, una capa de arena saturada a 5m de profundidad con un espesor de 5m resulta en una señal máxima de aproximadamente 70 nV en esta parte de Chile, mientras que en Australia (donde el campo geomagnético es alrededor de 50.000nT) la misma capa entrega una señal máxima de aproximadamente 280 nV (Figura A2.3).

b) *Ruido antropogénico*

El registro de la señal de resonancia protónica ocurre a través de la inducción de corriente eléctrica en un bucle de alambre (antena) puesta en la superficie. Sin embargo en la misma antena se inducen corrientes generadas da diferentes fuentes de campo electromagnéticos alrededor del punto de mediciones: cable eléctricos, antenas de tele y radio comunicaciones, motores funcionando, etc. Todas estas son fuentes de ruido que tienen una intensidad mucho mayor a la señal de resonancia protónica proveniente da las moléculas de agua.

En el caso de las mediciones hechas dentro de la cuenca del río Limarí, el nivel de urbanización es bastante elevado, sobre todo en proximidad de los cauces de los ríos. Al medir el nivel de ruido en

los diferentes sitios de mediciones, en el 47% de los puntos (11 sondeos) no pudimos realizar las mediciones debido al alto ruido electromagnético. Además, este hecho junto con la baja señal debida a la baja intensidad del campo geomagnético, resultó en que el 30% de los puntos de mediciones efectuadas (es decir, 8 sondeos) tuvieran una señal de resonancia que se mantuvo por debajo del nivel de ruido, a pesar del alto número de repeticiones de pulsos efectuadas para mejorar la relación señal/ruido.

*c) Presencia de rocas magnéticas*

Para poder excitar los protones y registrar la señal de resonancia magnética, es fundamental calibrar la justa frecuencia del pulso electromagnético utilizado para excitar los protones. Esta debe ser equivalente a la frecuencia de Larmor: la frecuencia a la que oscilan los Spin polarizados y en condición de equilibrio (Weichman et al., 2000). Esta frecuencia es proporcional al campo geomagnético, que si no es lo suficientemente homogéneo en el área de sondeo puede causar una dilución de la señal. De hecho, una variación espacial o temporal del campo geomagnético, da como resultado que los protones resuenen a frecuencias distintas y, por lo tanto, no sean excitables por el mismo pulso.

La presencia de rocas volcánicas puede en este sentido ser problemática para la utilización del SRM en la medida que contenga minerales ferromagnéticos con momentos magnéticos propios (es decir, rocas magnéticas). Esto provocaría un campo magnético no homogéneo y por tanto una dilución de la señal de resonancia.

En el caso de las mediciones hechas en la cuenca del río Limarí, en la cordillera sur de los ríos Pama y Combarbalá (18% de los puntos de mediciones efectuadas; es decir, 5 sondeos) se encontraron suficientes rocas magnéticas para causar una falta de homogeneidad significativa del campo geomagnético y por lo tanto impedir el éxito de las mediciones.

*d) Presencia de arcilla*

El método SRM es sensible al agua "libre" almacenada en los poros de los diferentes materiales del subsuelo: el agua que está ligada a la superficie interna de los poros o almacenada en poros muy finos no contribuye a la señal de respuesta SRM, ya que sus tiempos de relajación son demasiado pequeñas para ser detectadas (Yaramanci and Hetrich, 2009). Además, la presencia de arcilla es indicador de un medio eléctricamente conductor y esto causa una mayor difusión del pulso electromagnético de excitación de los protones en su propagación, resultando finalmente en una profundidad de exploración menor respecto a medios más resistivos.

En el área de estudio una presencia masiva de arcilla se encontró sobre todo en los embalses Cogotí y Paloma y en algunos sectores del río Limarí (15% de los puntos de mediciones efectuadas; es decir 4 sondeos).

En la tabla A2.1 se resumen los puntos donde se intentaron mediciones con el SRM y en las figuras A2.4-A2.17 se presentan los datos tomados en terreno. Todas las imágenes se dividen en dos subgráficos: en el lado izquierdo se presenta la envolvente de la señal apilada para cada pulso (en negro) y su ajuste de función exponencial (en rojo), mientras en lado derecho están representadas la intensidad de la señal (cuadrados negros) y del ruido (círculos azules) de cada pulso, juntos con la curva de ajuste (línea roja). Una característica común de todos los datos presentados es que la señal de ruido y la señal medidas son del mismo orden de magnitud, lo que imposibilita una interpretación adecuada de las mediciones. Además, las envolventes de las señales registradas (líneas negras en los subgráficos izquierdos de cada figura) no presentan el decaimiento exponencial que indicaría una señal de resonancia magnética de protones y, por lo tanto, la señal debida al agua subterránea.

## Referencias

Chulliat, A., Macmillan, S., Alken, P., Beggan, C., Nair, M., Hamilton, B., Woods, A., Ridley, V., Maus, S. and Thomson, A. [2015]. *The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020*. BGS and NOAA, 112pp.

Legchenko, A.V., Beauce, A., Guillen, A., Valla, P., and Bernard, J., 1997. *Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface*. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2, 173-190.

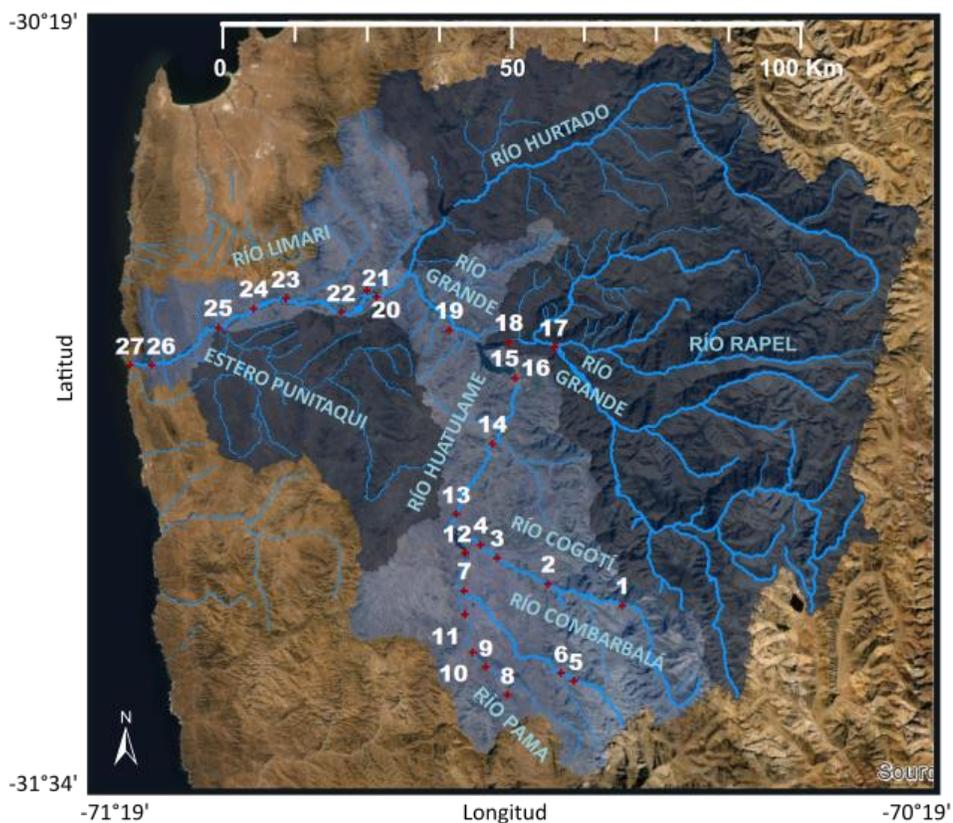
Shushakov, O.A. and Legchenko, A.V.[1994a]. *Calculation of proton magnetic resonance signal of underground water considering medium electric conductivity*. Geology and Geophysics, 35 (3), 130-136.

Shushakov, O.A. and Legchenko, A.V.[1994b]. *Ground water proton magnetic resonance in the horizontally stratified media of different electrical conductivity*. Geology and Geophysics, 35(10), 161-166.

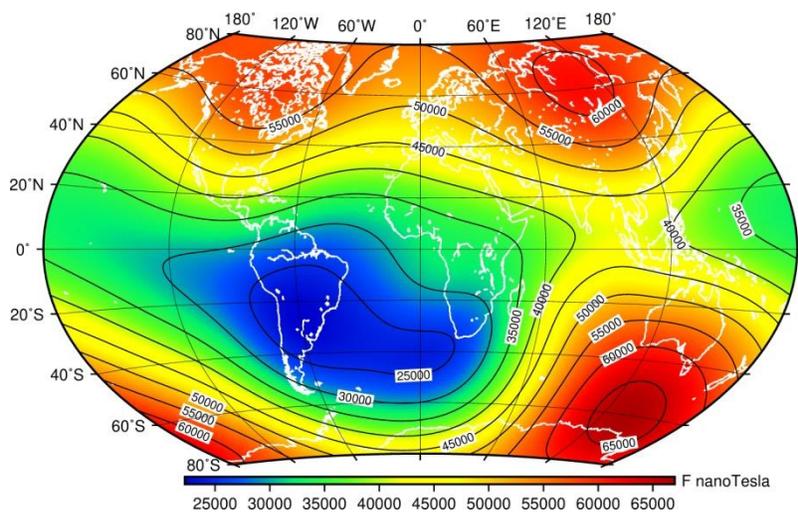
Weichman, P. B., Lively, E. M. and Ritzwoller, M. H. [2000]. *Theory of surface nuclear magnetic resonance with application to geophysical imaging problems*. Physical Review, 62, 1290–1312.

Yaramanci, U and Hetrich, M. [2009]. *Magnetic resonance sounding*. In Kirsch, R. (Ed.), *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology* (2nd ed., pp. 253–271). Springer-Verlag, Berlin.

## Figuras



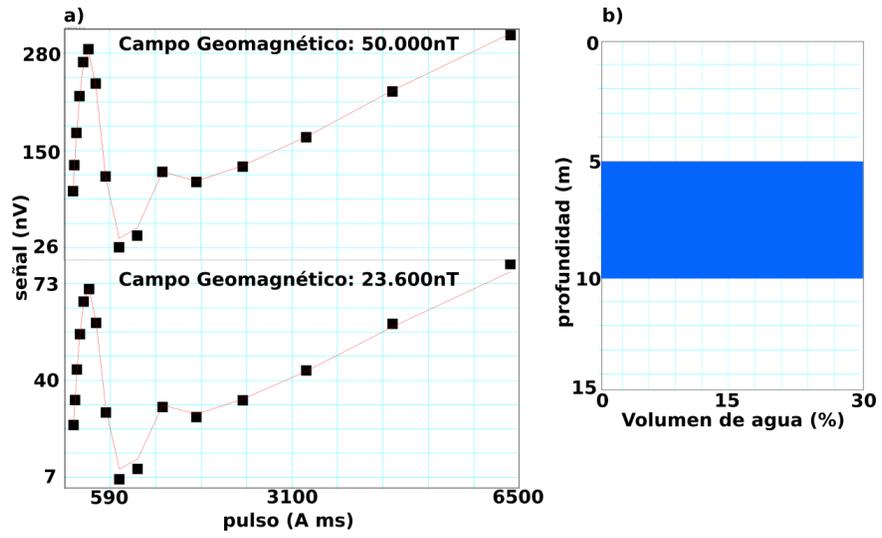
**Figura A2.1** Sitios de la campaña de sondeo de resonancia magnética. Fuente: Esri<sup>1</sup>.



**Figura A2.2** Distribución de la intensidad total del campo geomagnético. Fuente: British Geological Survey<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Esri, Digital Globe, GeoEye, Earthstar Geographic, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

<sup>2</sup> <http://www.geomag.bgs.ac.uk/research/modelling/IGRF.html>

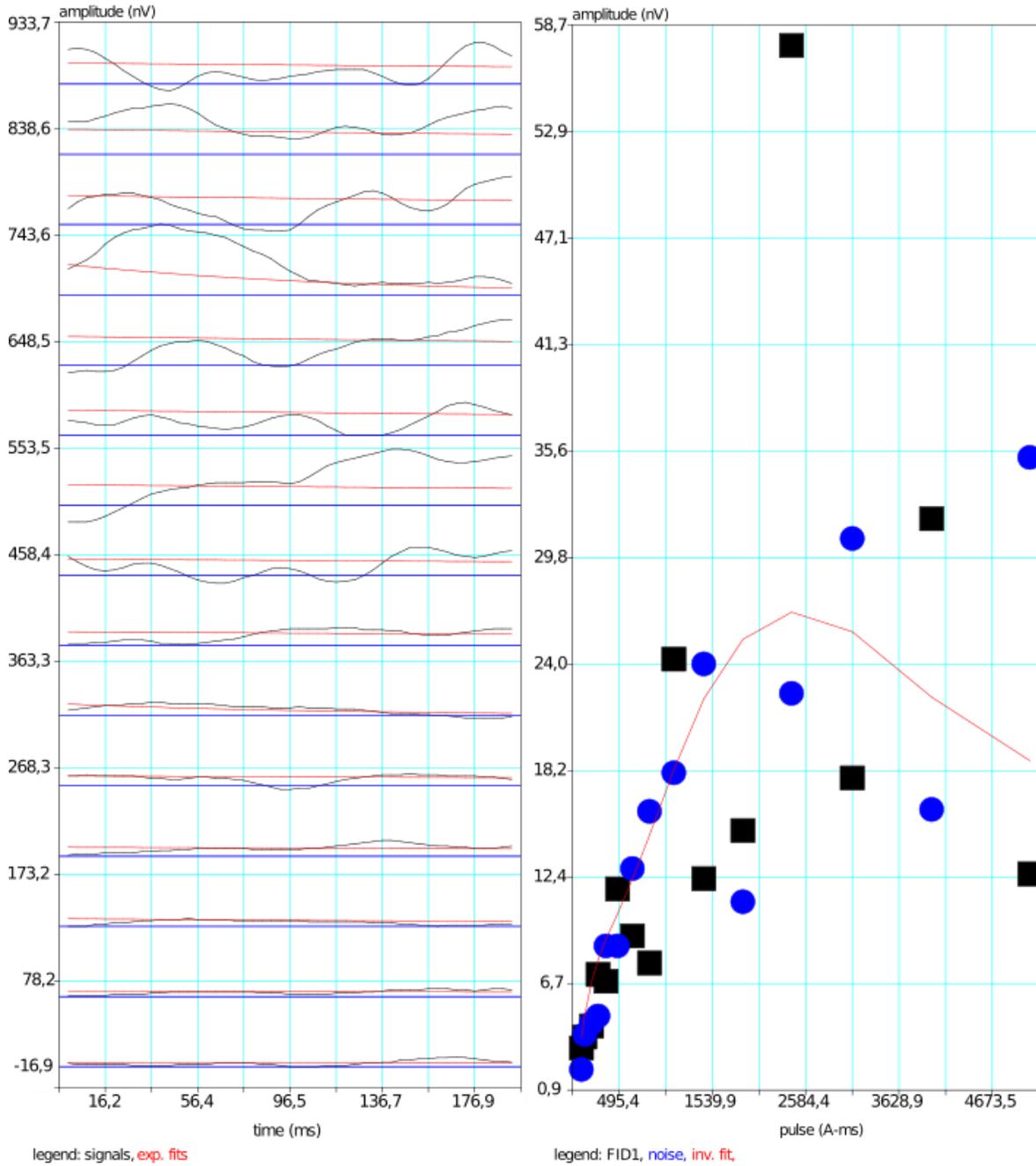


**Figura A2.3** Señal de resonancia protónica en dos campos geomagnéticos distintos (a) correspondiente a una capa de arena saturada poco profunda (b).

Loop: 2 - 50.0 Date: 3/10/2021 Time: 12:00:00 AM  
 geomagnetic field:  
 inclination=32 degr, magnitude=23342.72 nT

Sitio: Río Cogotí 3b  
 GPS (UTM 19S)

x[m]	y[m]	z[m]
331861	6553084	1531

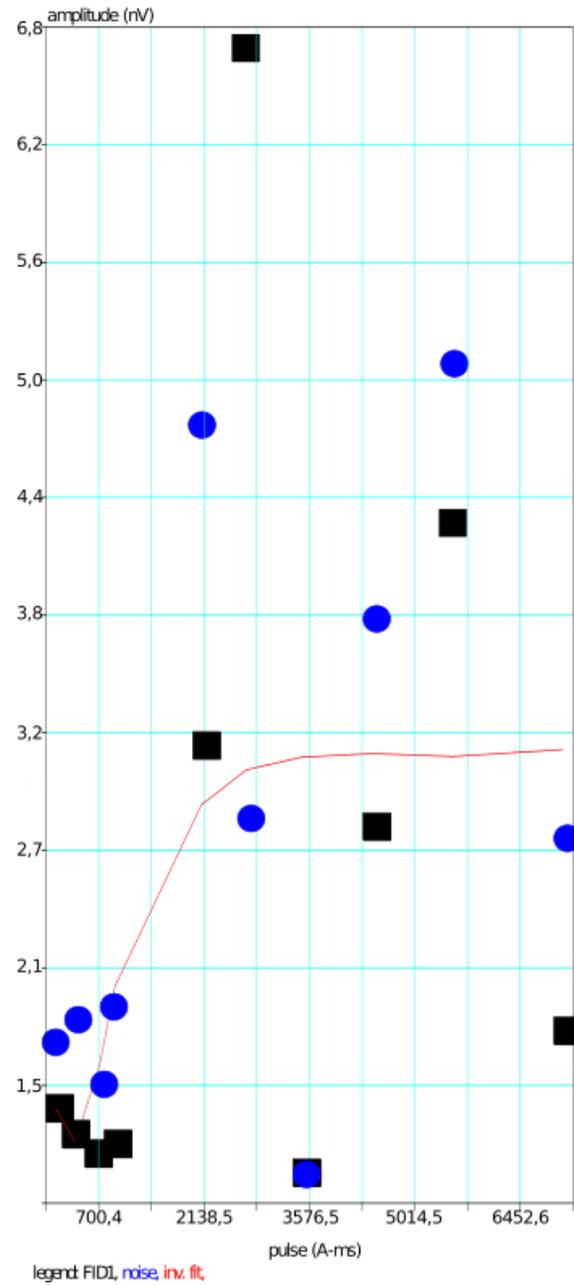
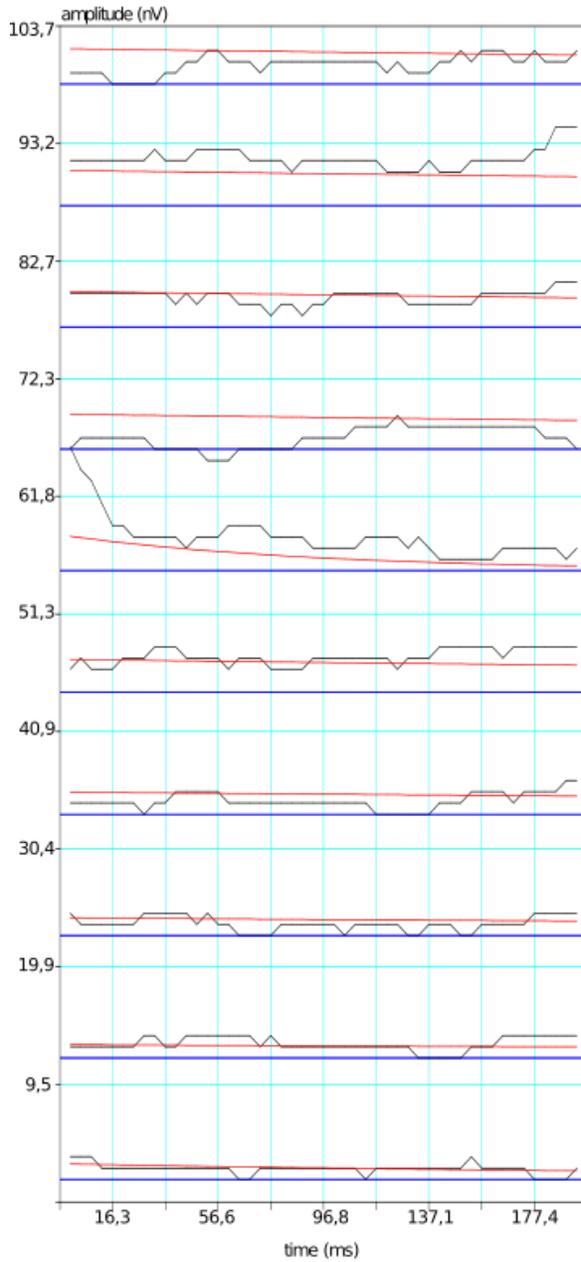


**Figura A2.4** Datos de resonancia magnética tomados en cabecera del Río Cogotí (punto 1 en figura A2.1).

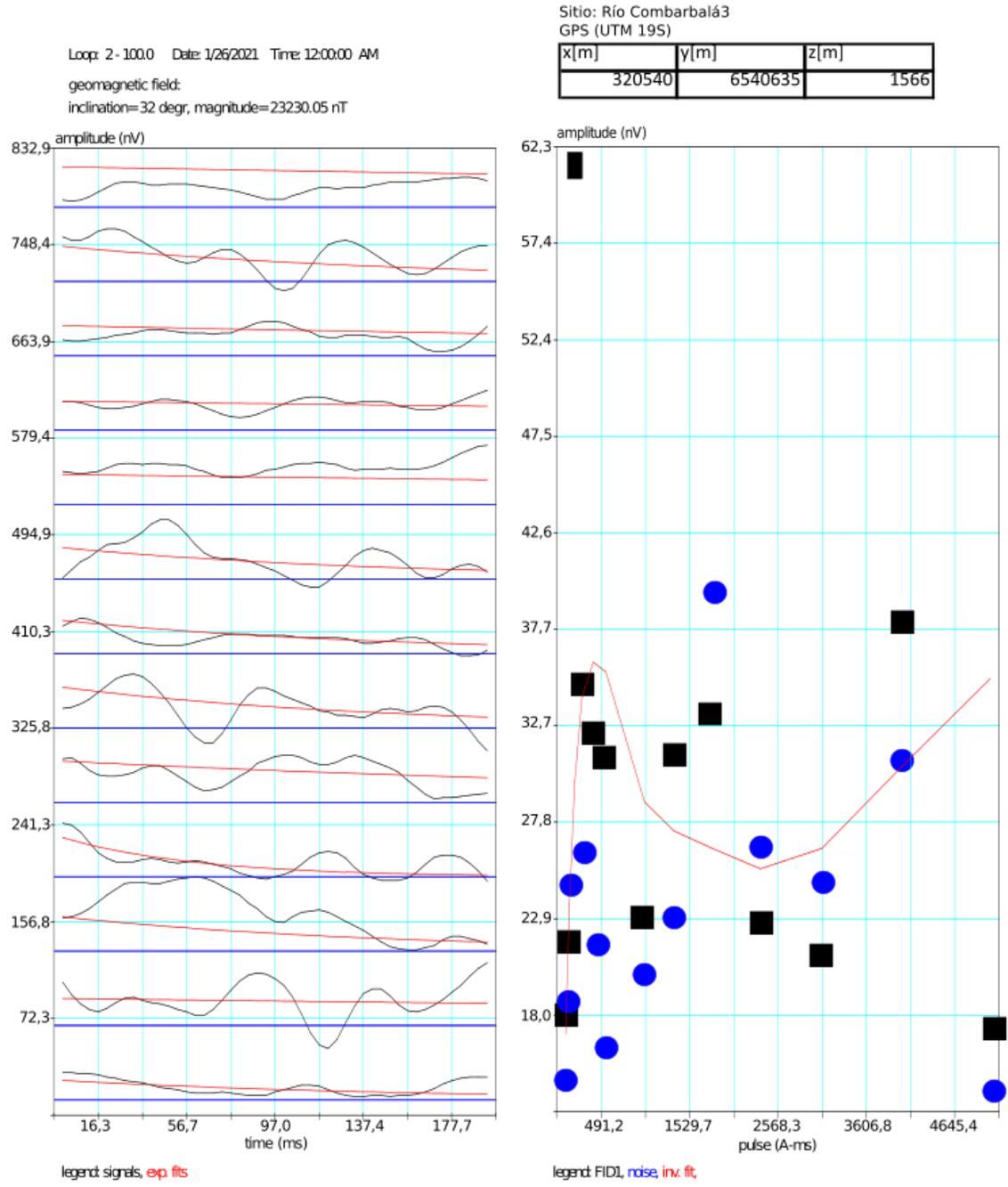
Loop: 2 - 50.0 Date: 1/28/2021 Time: 12:00:00 AM  
 geomagnetic field:  
 inclination=32 degr, magnitude=23267.61 nT

Sitio: Río Combarbalá 1  
 GPS (UTM 19S)

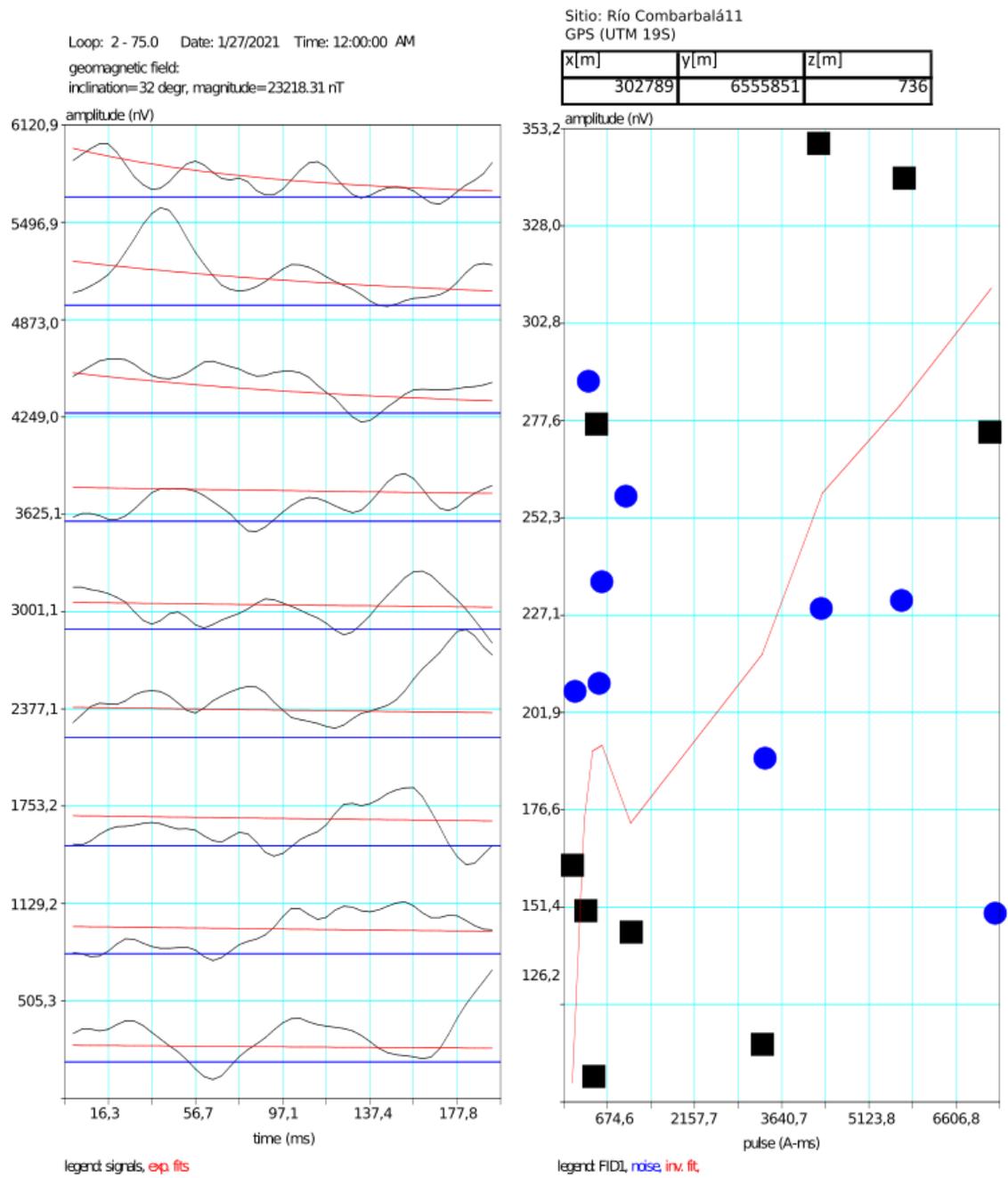
x[m]	y[m]	z[m]
323014	6539232	1780



**Figura A2.5** Datos de resonancia magnética tomados en cabecera del Río Combarbalá (punto 5 en figura A2.1).



**Figura A2.6** Datos de resonancia magnética tomados en cabecera del Río Combarbalá (punto 6 en figura A2.1).



**Figura A2.7** Datos de resonancia magnética tomados en la parte central del río Combarbalá (punto 7 en figura A2.1).

Loop: 2 - 50.0 Date: 2/10/2021 Time: 12:00:00 AM

geomagnetic field:

inclination=32 degr, magnitude=23213.62 nT

Sitio: Embalse Cogotí

GPS (UTM 19S)

x[m]	y[m]	z[m]
302945	6562723	635

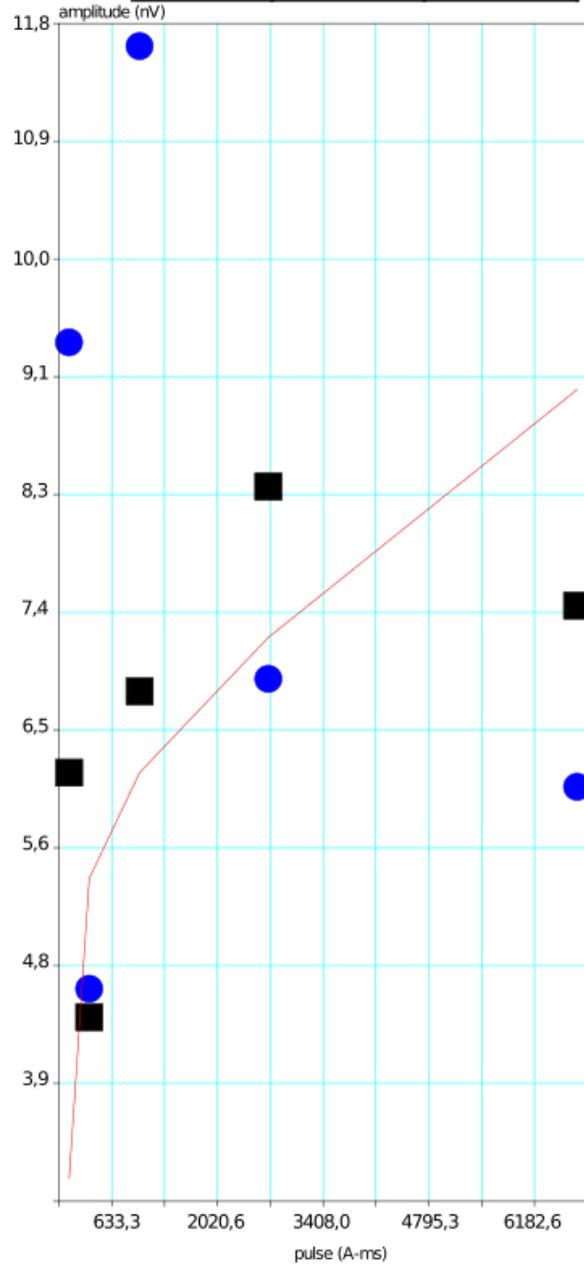
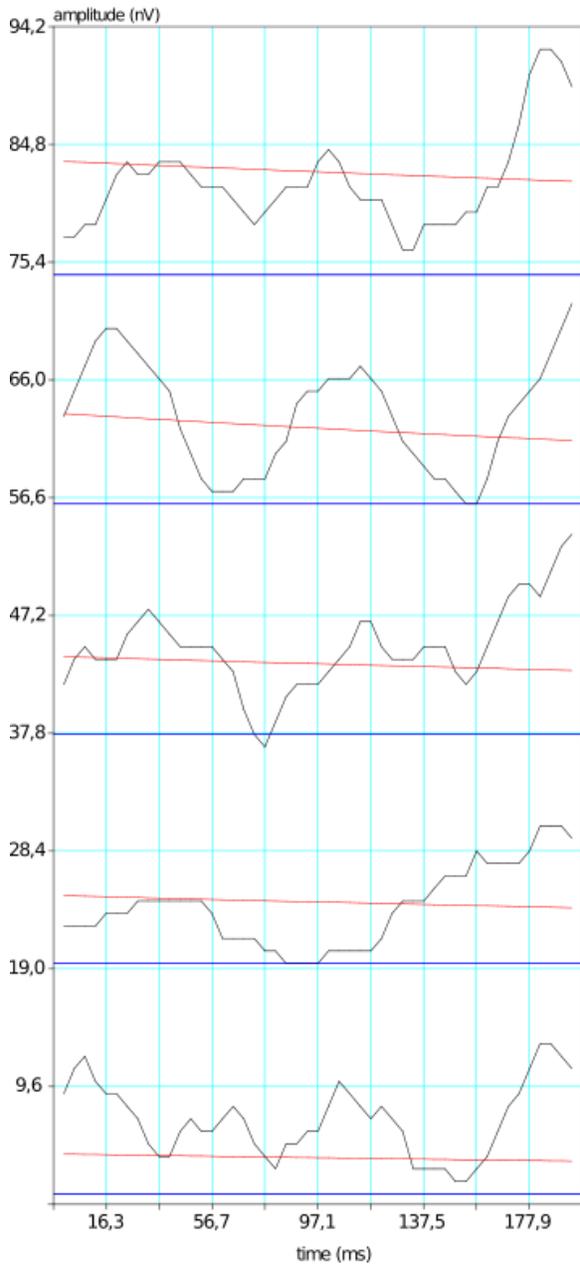
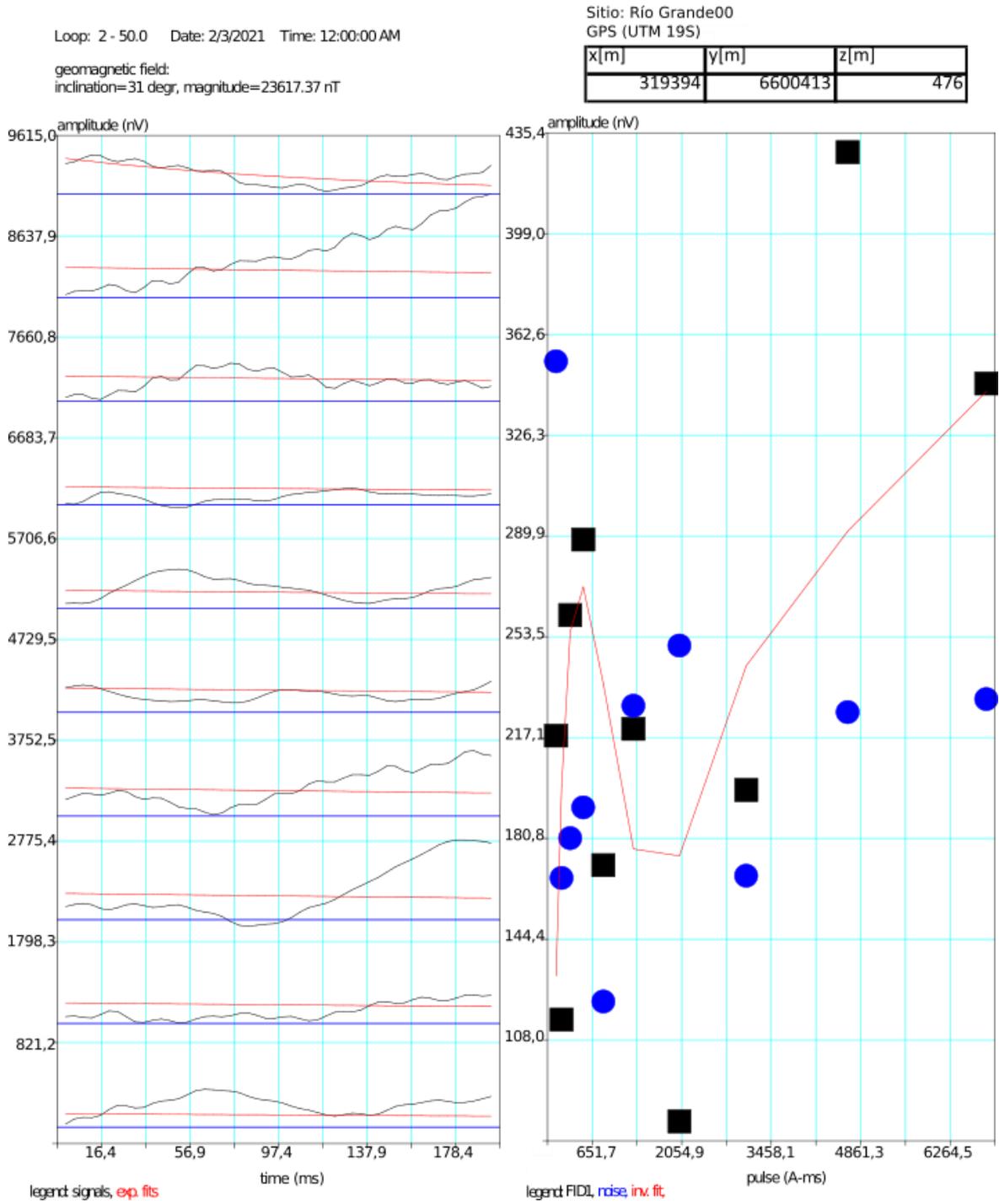


Figura A2.8 Datos de resonancia magnética tomados en el embalse Cogotí (punto 12 en figura A2.1).



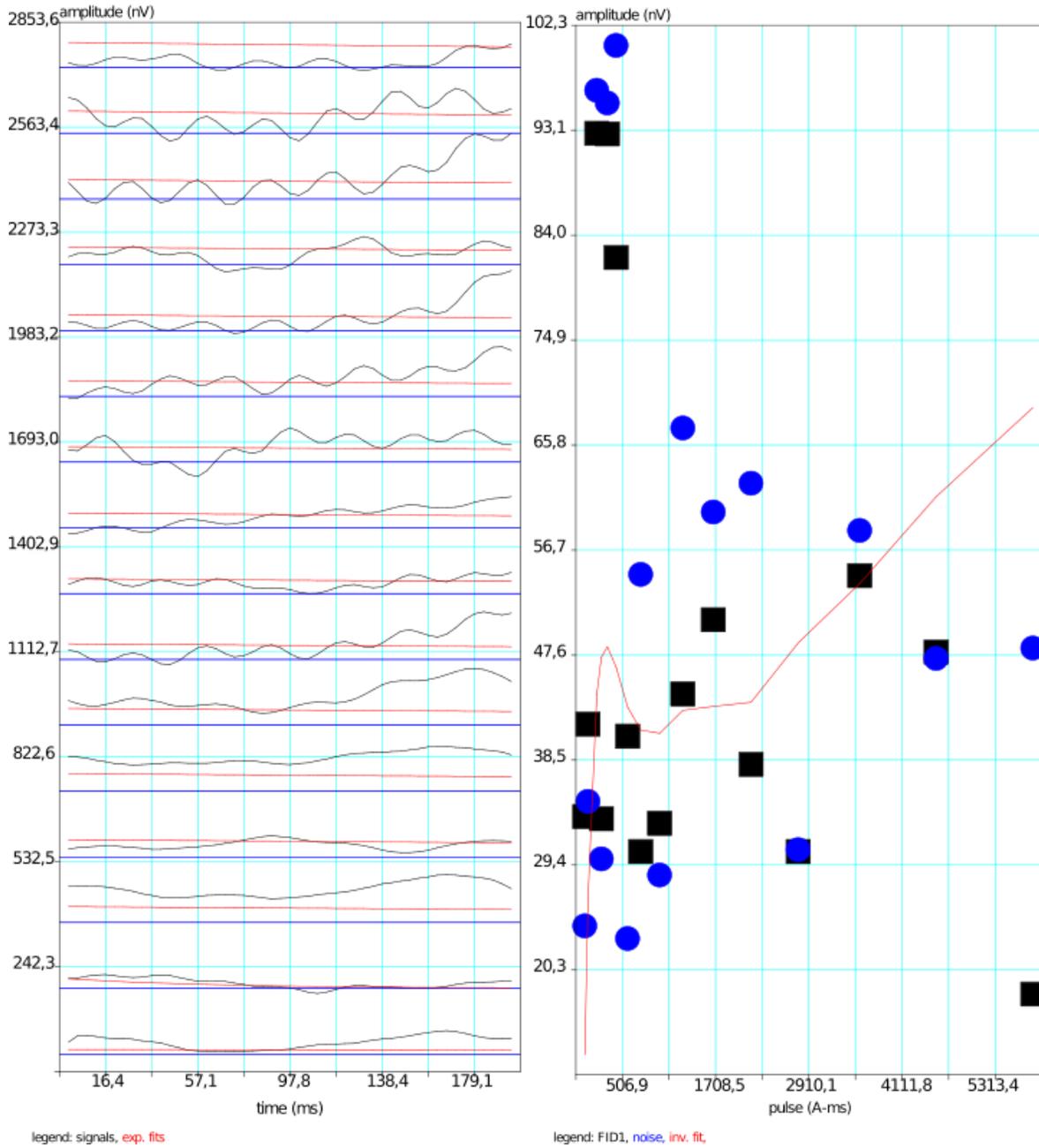
**Figura A2.9** Datos de resonancia magnética tomados en la junta del río Grande con el río Rapel (arriba del embalse La Paloma; punto 17 en figura A2.1).

Loop: 2 - 50.0 Date: 3/17/2021 Time: 12:00:00 AM

Sitio: Embalse La Paloma (El Palqui)  
GPS (UTM 19S)

geomagnetic field:  
inclination=31 degr, magnitude=23053.99 nT

x[m]	y[m]	z[m]
312197	6594837	383



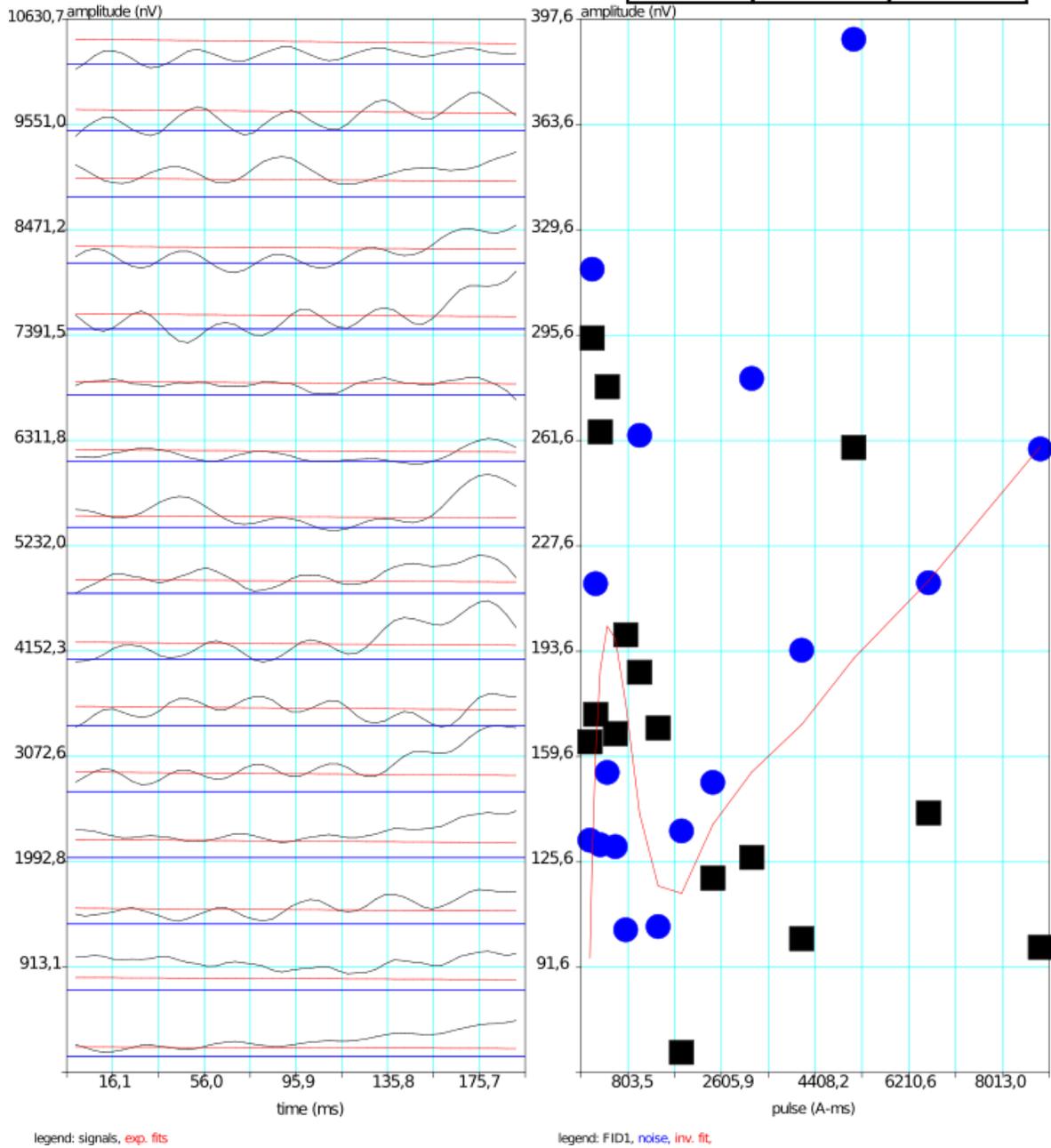
**Figura A2.10** Datos de resonancia magnética tomados en el embalse La Paloma (ramo sur-El Palqui; punto 15 en figura A2.1).

Loop: 4 - 50.0 Date: 2/2/2021 Time: 12:00:00 AM

geomagnetic field:  
inclination= 31 degr, magnitude= 23004.69 nT

Sitio: Embalse La Paloma (Montepatria)  
GPS (UTM 19S)

x[m]	y[m]	z[m]
311063	6601414	389



**Figura A2.11** Datos de resonancia magnética tomados en el embalse La Paloma (ramo norte-Montepatria; punto 18 en figura A2.1).

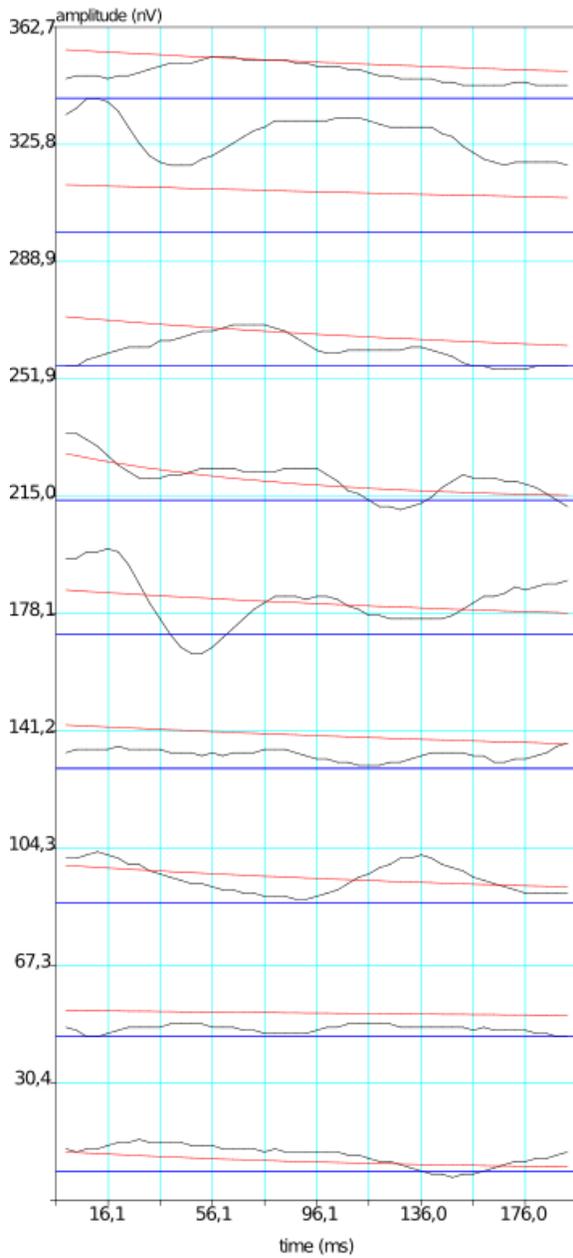
Loop: 2 - 50.0 Date: 1/20/2021 Time: 12:00:00 AM

geomagnetic field:  
inclination=31 degr, magnitude=23455.40 nT

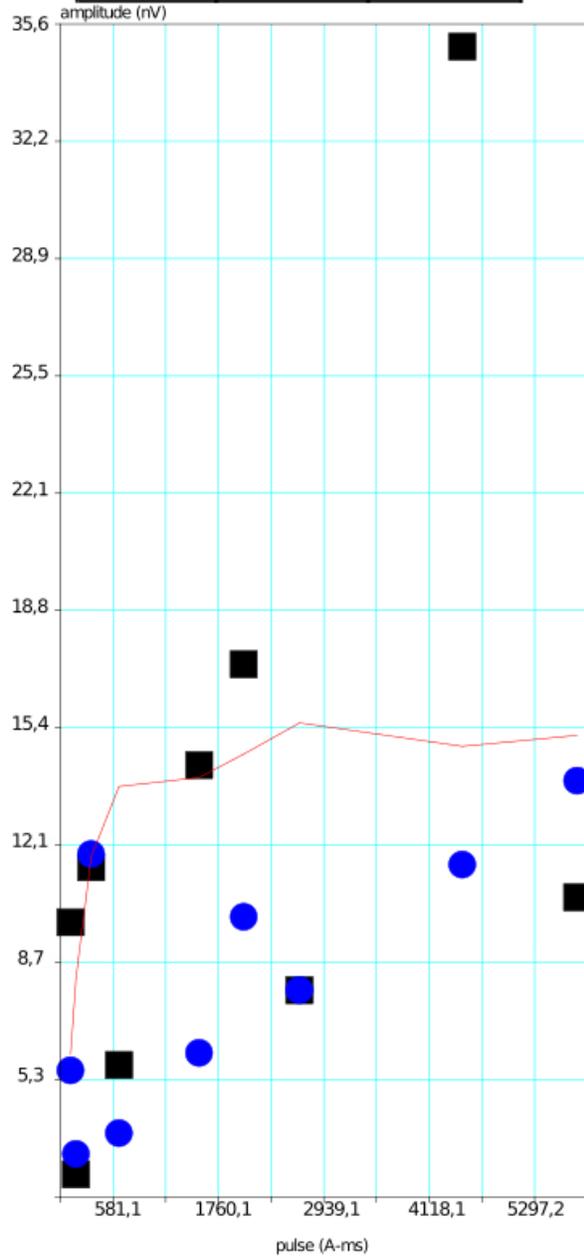
Sitio: Quebrada Ingenio2b

GPS (UTM 19S)

x[m]	y[m]	z[m]
285018	6610826	197



legend: signals, exp. fits



legend: FID1, noise, inv. fit.

**Figura A2.12** Datos de resonancia magnética tomados en la quebrada Ingenio (punto 20 en figura A2.1).

Loop: 2 - 75.0 Date: 3/2/2021 Time: 12:00:00 AM

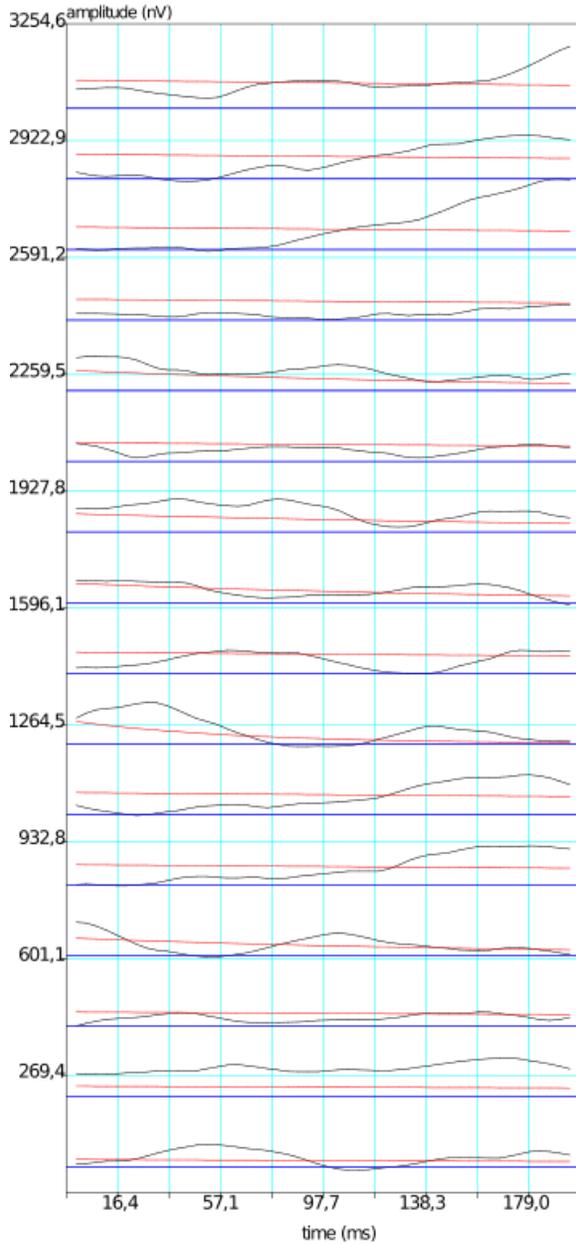
geomagnetic field:

inclination=31 degr, magnitude=23546.95 nT

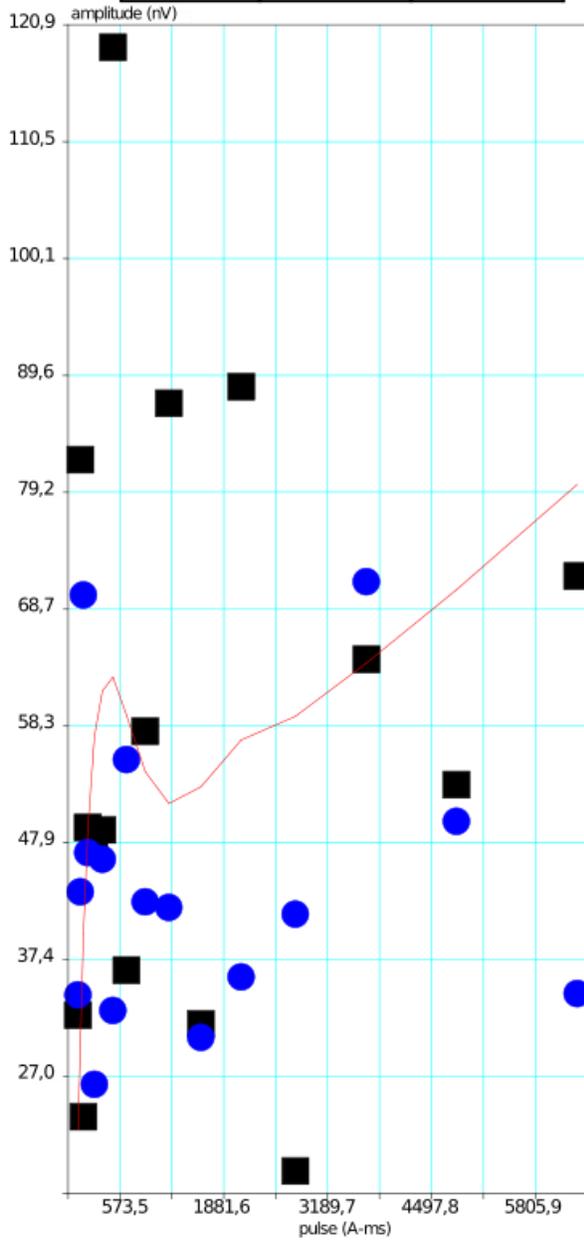
Sitio: Río Limarí4b

GPS (UTM 19S)

x[m]	y[m]	z[m]
280201	6606888	151



legend: signals, exp. fits



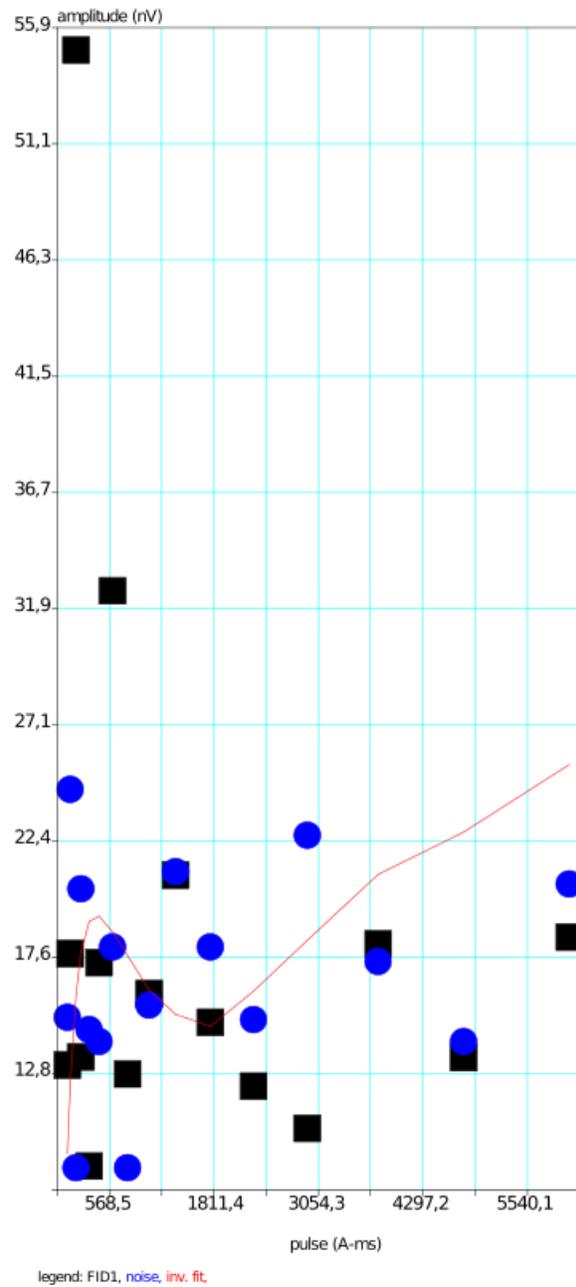
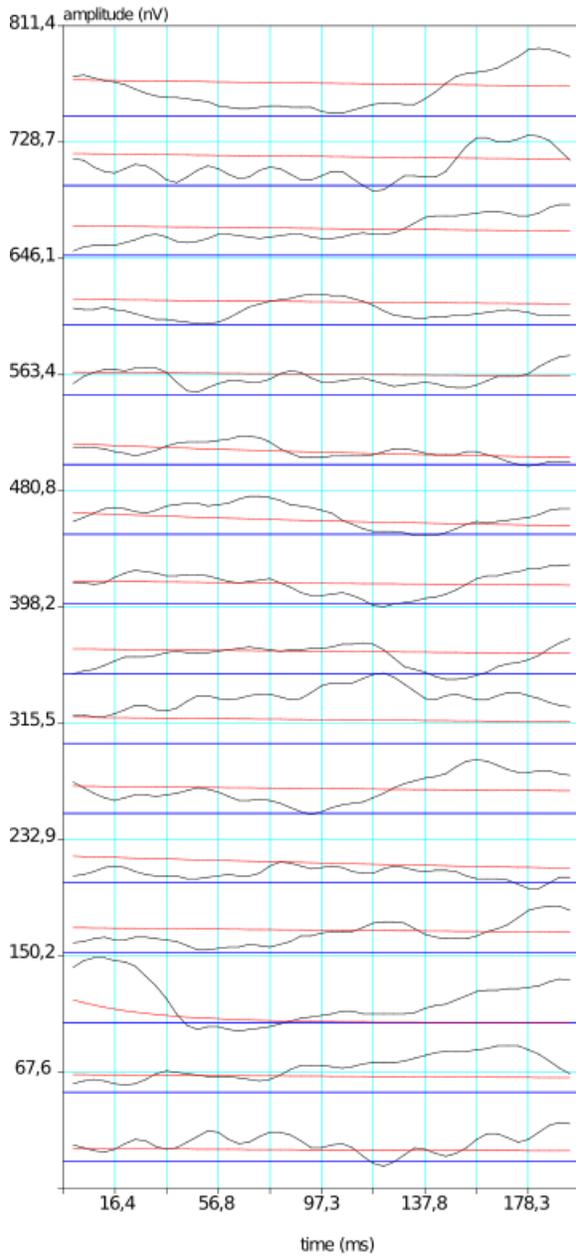
legend: FID1, noise, inv. fit

**Figura A2.13** Datos de resonancia magnética tomados en cabecera del río Limarí (punto 22 en figura A2.1).

Loop: 2 - 50.0 Date: 3/3/2021 Time: 12:00:00 AM  
 geomagnetic field:  
 inclination=31 degr, magnitude=23152.58 nT

Sitio: Río Limarí8  
 GPS (UTM 19S)

x[m]	y[m]	z[m]
270116	6609396	95

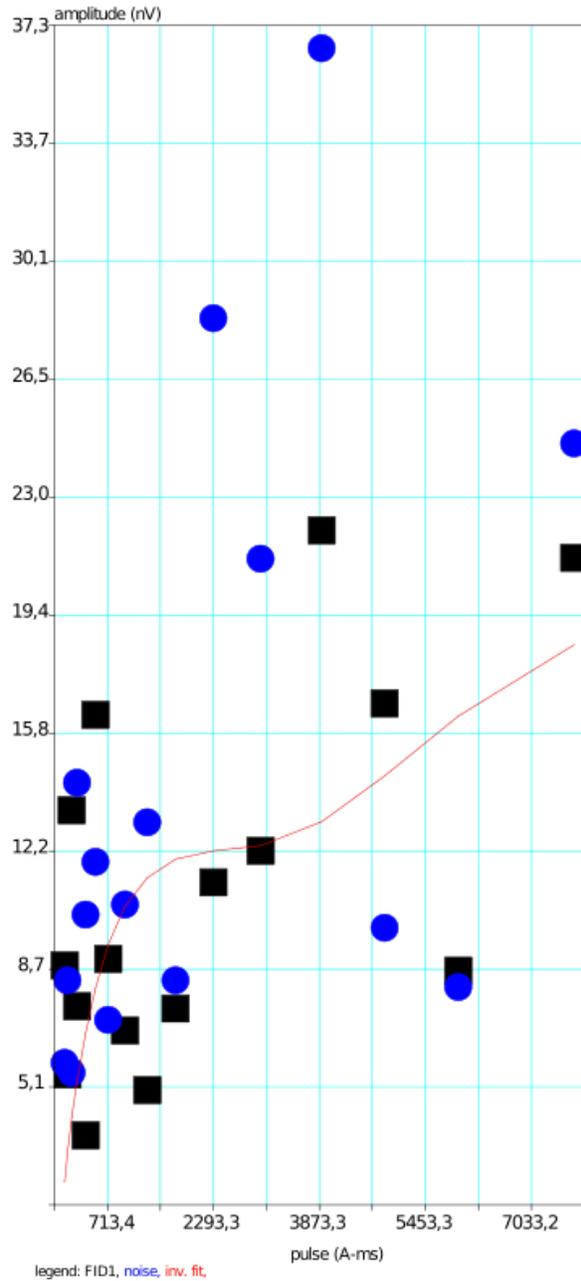
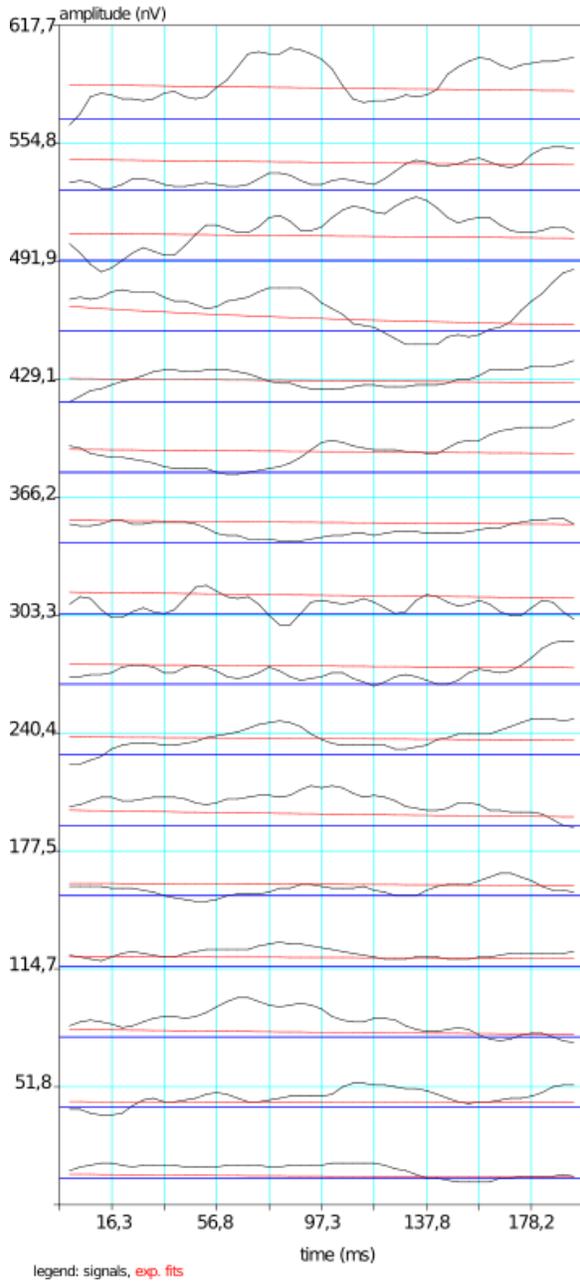


**Figura A2.14** Datos de resonancia magnética tomados en la parte central del río Limarí (punto 23 en figura A2.1).

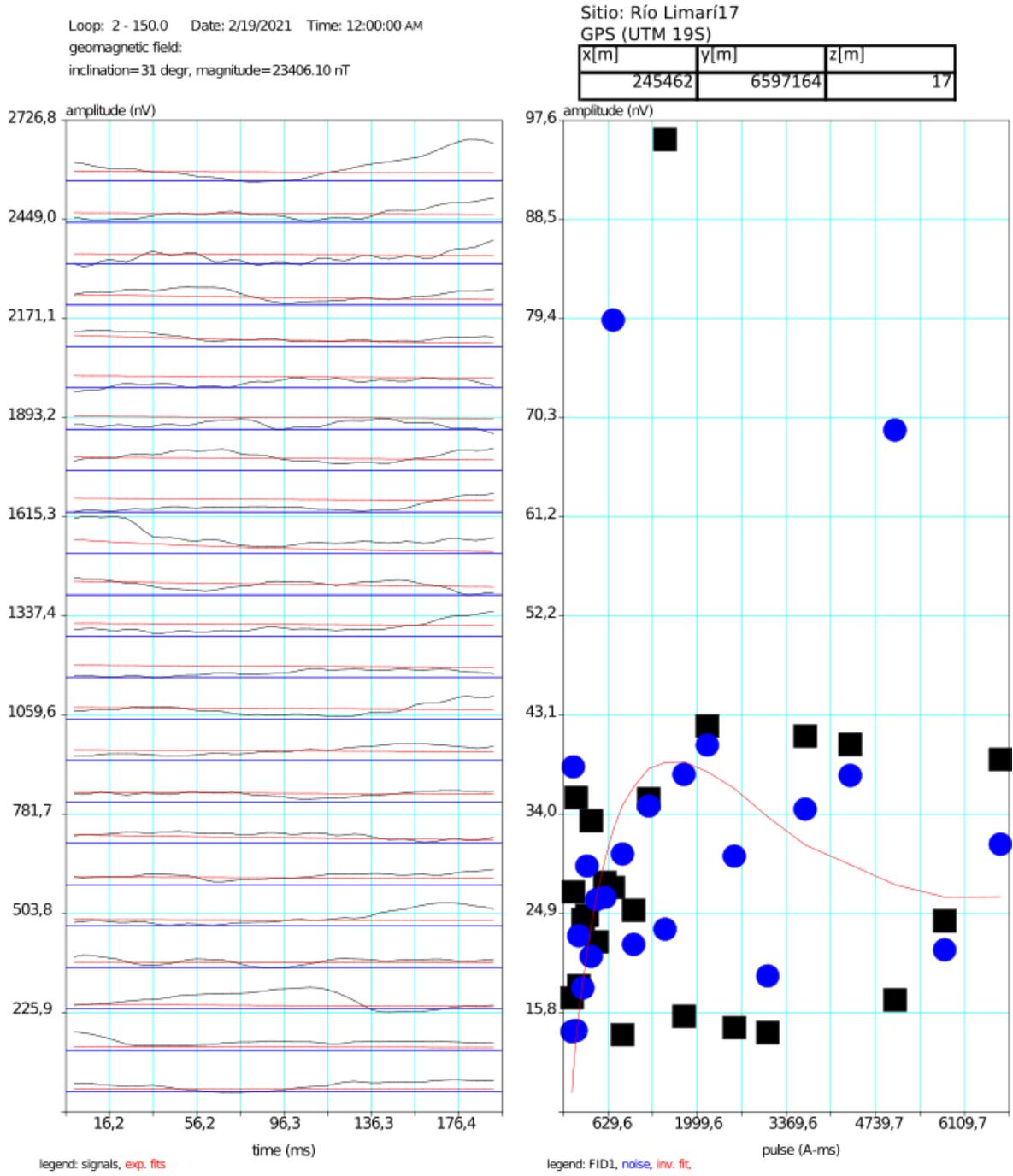
Loop: 2 - 150.0 Date: 3/30/2021 Time: 12:00:00 AM  
 geomagnetic field:  
 inclination= 31 degr, magnitude= 23161.97 nT

Sitio: Río Limarí10b  
 GPS (UTM 19S)

x[m]	y[m]	z[m]
264293	6607589	66



**Figura A2.15** Datos de resonancia magnética tomados en la parte central del río Limarí (punto 24 en figura A2.1).

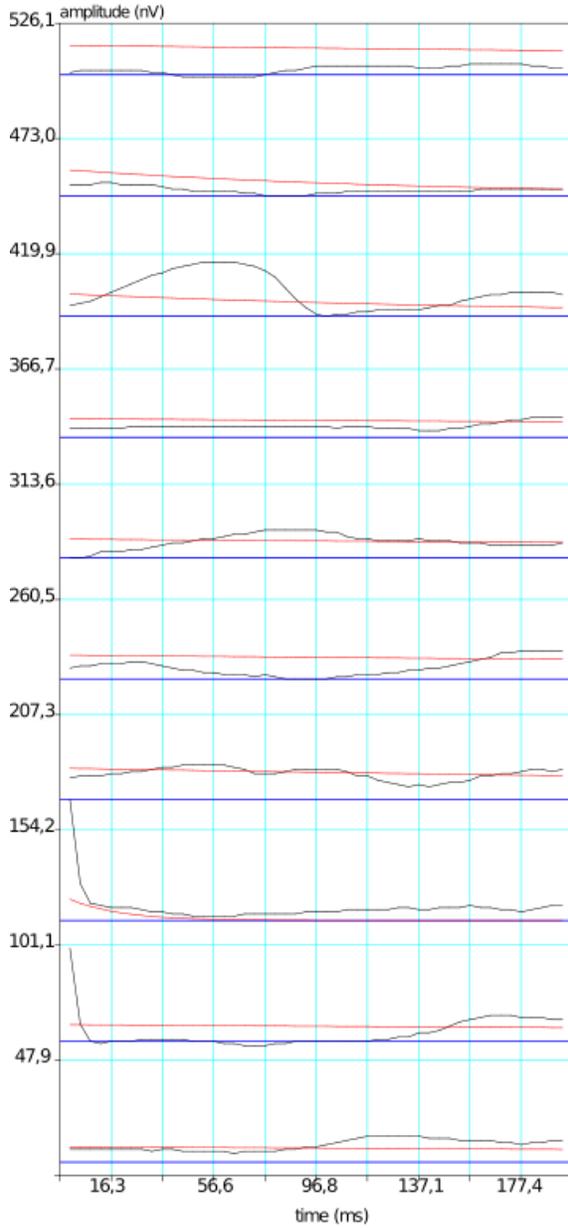


**Figura A2.16** Datos de resonancia magnética tomados en la desembocadura del río Limarí (punto 26 en figura A2.1).

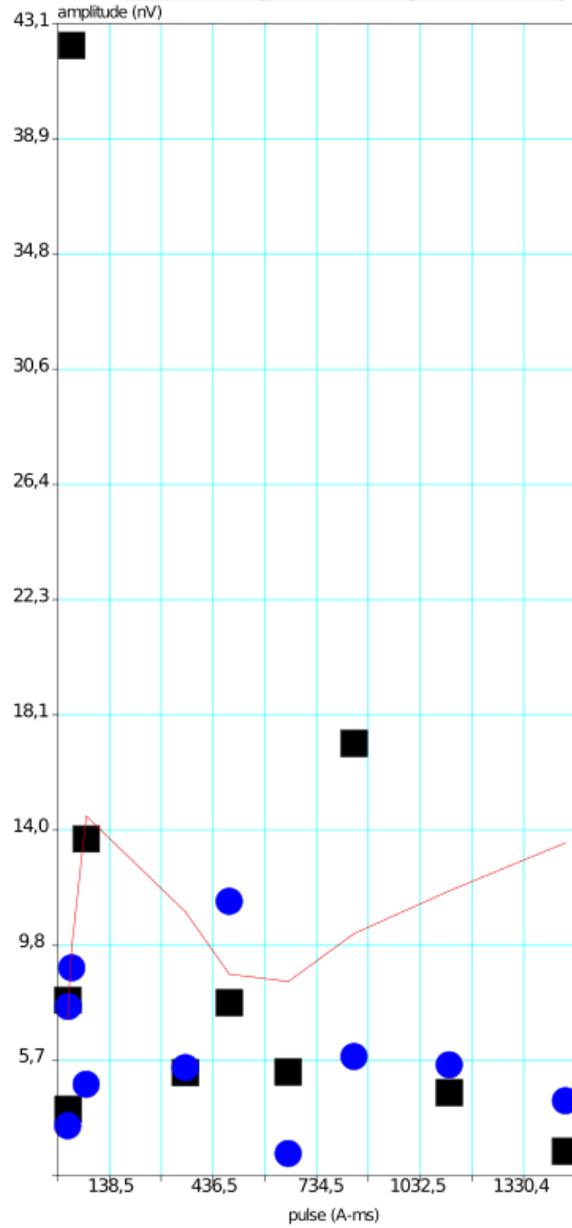
Loop: 2 - 50.0 Date: 2/18/2021 Time: 12:00:00 AM  
 geomagnetic field:  
 inclination=31 degr, magnitude=23267.61 nT

Sitio: Río Limarí18  
 GPS (UTM 19S)

x[m]	y[m]	z[m]
241583	6597190	7



legend: signals, exp. fits



legend: FID1, noise, inv. fit

**Figura A2.17** Datos de resonancia magnética tomados en la desembocadura del río Limarí (punto 27 en figura A2.1).

Nombre	ID	Este [m]	Norte [m]	Cota [msnm]	Fecha	Tamaño antena[m]/Observación
COG3	1	331861	6553084	1531	10-03-2021	lado 50m, 2 vueltas
COG6a	2	318168	6557076	942	10-03-2021	no efectuada por alto ruido
COG8	3	308873	6561819	728	09-03-2021	no efectuada por alto ruido
COG8b	4	305775	6564197	805	10-02-2021	no efectuada por alto ruido
COMB1	5	323014	6539232	1780	28-01-2021	lado 50m, 1vuelta
COMB3	6	320540	6540635	1566	26-01-2021	lado 100m, 1vuelta
COMB11	7	302789	6555851	736	27-01-2021	lado 75m, 1 vuelta
VHE1	8	310802	6536712	1096	09-02-2012	no efectuada por heterogeneidad del campo geomagnético
VHE2	9	306836	6541774	933	09-02-2021	no efectuada por heterogeneidad del campo geomagnético
VHE3	10	304368	6544457	873	09-02-2021	no efectuada por heterogeneidad del campo geomagnético
VHE4	11	303043	6551420	805	26-01-2021	no efectuada por alto ruido
ECG	12	302945	6562723	635	10-02-2021	lado 50m, 2 vueltas
GUA1	13	301372	6569892	675	10-02-2021	no efectuada por alto ruido
GUA5	14	308096	6582824	467	11-03-2021	no efectuada por alto ruido
PPAL	15	312197	6594837	383	17-03-2021	lado 50m, 2 vueltas
GRA00d	16	319454	6600562	474	03-02-2021	Problema con el instrumento
GRA00i	17	319394	6600413	476	11-02-2021	lado 50m, 2 vueltas
PALOMA_MP	18	311063	6601414	389	02-02-2021	8 con lado 50m, 1 vuelta
GRA2	19	300150	6603590	309	18-03-2021	no efectuada por alto ruido
QIG2b	20	285018	6610826	197	20-01-2021	lado 50m, 1vuelta
LIM3i	21	286754	6609741	194	18-01-2021	no efectuada por alto ruido
LIM4b	22	280201	6606888	151	02-03-2021	lado 75m, 2vueltas
LIM8	23	270116	6609396	95	03-03-2021	lado 50m, 2 vueltas
LIM10b	24	264293	6607589	66	30-03-2021	lado 150m, 1vuelta
LIM13i	25	257672	6604114	37	18-02-2021	no efectuada por alto ruido
LIM17	26	245462	6597164	17	19-02-2021	lado 150m, 1vuelta
LIM18	27	241583	6597190	7	18-02-2021	lado 50m, 2 vueltas

**Tabla A2. 1** Resumen de la campaña de terreno con sondeo de resonancia magnética.  
Las coordenadas GPS son expresadas en el sistema WGS 1984/ UTM zona 19S.