



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Geofísica
GF42A – Métodos de Exploración Geofísica



Informe de Terreno: Chicureo

Alumnos:	Francisco Delgado Sergio Irrarázabal Martín Jacques
Profesores:	Andrés Pavez Emilio Vera Gonzalo Yáñez
Auxiliares:	Joaquín Cáceres Daniel Díaz
Fecha de Entrega:	Lunes 27 de Noviembre del 2006

1. Introducción:

El presente trabajo es el resultado de una campaña en terreno del curso de Métodos de Exploración Geofísica, realizada en la zona de Chicureo, al norte de Santiago entre los días 28 y 31 de Octubre del 2006

El objetivo de esta campaña fue familiarizarse en terreno con el equipamiento necesario para realizar los métodos gravimétricos, sísmicos, magnéticos y eléctricos, utilizados en la prospección geofísica y la realización de un estudio encargado al departamento de Geofísica por la empresa Aguas Andinas respecto a la disponibilidad de aguas subterráneas para el consumo residencial.

Se utilizaron los métodos gravimétrico, sísmico, magnético y eléctrico con distintos objetivos. Los cuatro métodos se utilizaron con el objetivo de determinar la estructura del basamento en la zona de estudio, mientras que el método eléctrico (SEV, TEM y Ohmmapper) también fue utilizado para determinar resistividades en las diversas capas de rocas, las cuales pueden ser interpretadas por la presencia de aguas o de rocas fracturadas que pueden dar origen a un acuífero

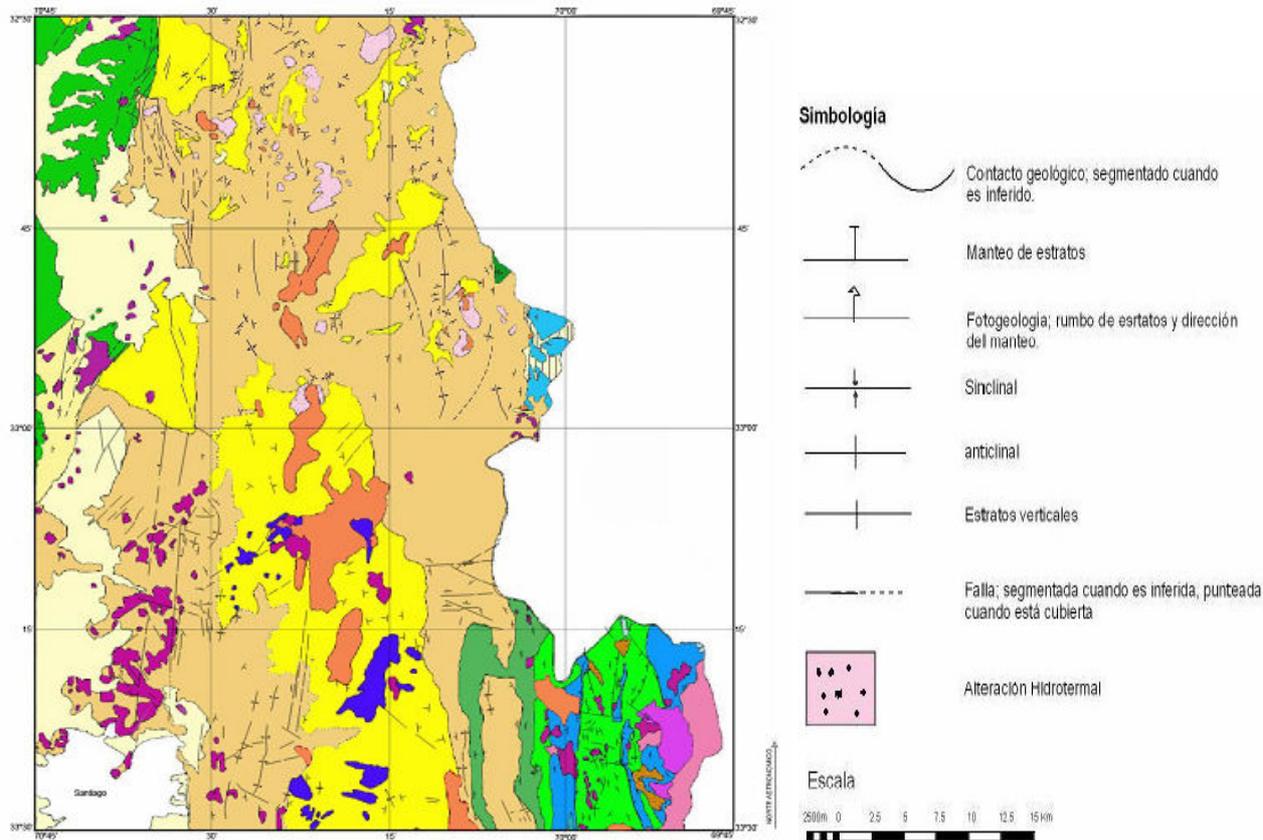
Ubicación del área de estudio

El área en cuestión se encuentra aproximadamente a 20 km. al norte de la ciudad de Santiago, existiendo caminos a lo largo de toda la zona.



Figura N°1: Imagen satelital del área de estudio

De acuerdo a la hoja Til-Til Santiago del SERNAGEOMIN, el relleno del valle Chicureo corresponde a gravas y arenas con sedimentos finos en menor proporción. Hacia el oeste predominan estos últimos, arenas, limos y arcillas que alternan con lentes de granulometría gruesa, estando la zona completa intruida por pórfidos dacíticos. Antecedentes señalan espesores medios de 400 a 480 mt. en el valle de Santiago.



Leyenda

- | | | |
|--|---|--|
| Unidad Volcánica nueva (volcanes activos)
Rocas Volcánicas, principalmente andesíticas (HOLOCENO) | Sedimentos aluviales y fluviales (HOLOCENO y en parte PLEISTOCENO) | Sedimentos glaciares (HOLOCENO) |
| Unidad Volcánica antigua (volcanes extintos)
Rocas Volcánicas principalmente andesíticas y traqui andesíticas (PLEISTOCENO) | Depósitos morrénicos.
Incluye depósitos de cenizas volcánicas (HOLOCENO y en parte PLEISTOCENO) | |
| Formación LA PARVA - COLORADO
Rocas volcánicas (principalmente andesíticas, dacíticas y riolíticas.
Incluye Pórfidos cuarzíferos (PLIOCENO) | | Pórfidos dacíticos (MIOCENO) |
| Formación FARELLONES
Rocas Volcánicas principalmente andesíticas y riolíticas, con intercalaciones de rocas sedimentarias continentales (MIOCENO) | Granitoides, Granitos, granodioritas, monzodioritas, y dioritas (MIOCENO) | |
| Formación ABANICO
Brechas y conglomerados andesíticos, areniscas, tobas y microbrechas (CRETÁCICO SUP.- PALEÓGENO) | Formación LO VALLE
Tobas soldadas y tobas dacíticas; andesitas. (CRETÁCICO SUP.) | |
| Formación COLIMAPU
Rocas sedimentarias y volcanoclasticas continentales (areniscas, lutitas, conglomerados, calizas y lutitas de colores rojos) y rocas volcánicas, principalmente andesíticas (APTIANO- ALBIANO) | Formación LAS CHILCAS
Conglomerados, brechas, aglomerados andesíticos, andesitas, intercalaciones de areniscas y limolitas calcáreas (CRETÁCICO) | Formación CRISTO REDENTOR
Conglomerados, areniscas y lutitas rojas (CRETÁCICO INF.) |
| Formación LO VALDÉS
Rocas sedimentarias marinas fosilíferas (calizas, lutitas, areniscas y conglomerados), intercalaciones de rocas volcánicas andesíticas (NEOCOMIANO y en parte TITONIANO) | | |
| Formación RÍO DAMAS
Rocas sedimentarias continentales de colores preferentemente rojos (lutitas, areniscas, conglomerados y brechas conglomerádicas) y brechas volcánicas andesíticas de colores preferentemente verdes. Yeso subordinado. (KIMMERIDGIANO y en parte TITONIANO) | Formación LAGUNILLA
Areniscas calcáreas; lutitas y areniscas, yeso. (JURÁSICO SUP) | |

Figura N°2: Mapa geológico regional adaptado por los alumnos del curso GL44B – Geología de Campo I, Semestre Primavera 2006.

2. Gravedad:

2.1 Descripción del área de trabajo:

Las mediciones se realizaron durante los días 28, 29 y 30 de Octubre a lo largo de 4 perfiles indicados en la figura:

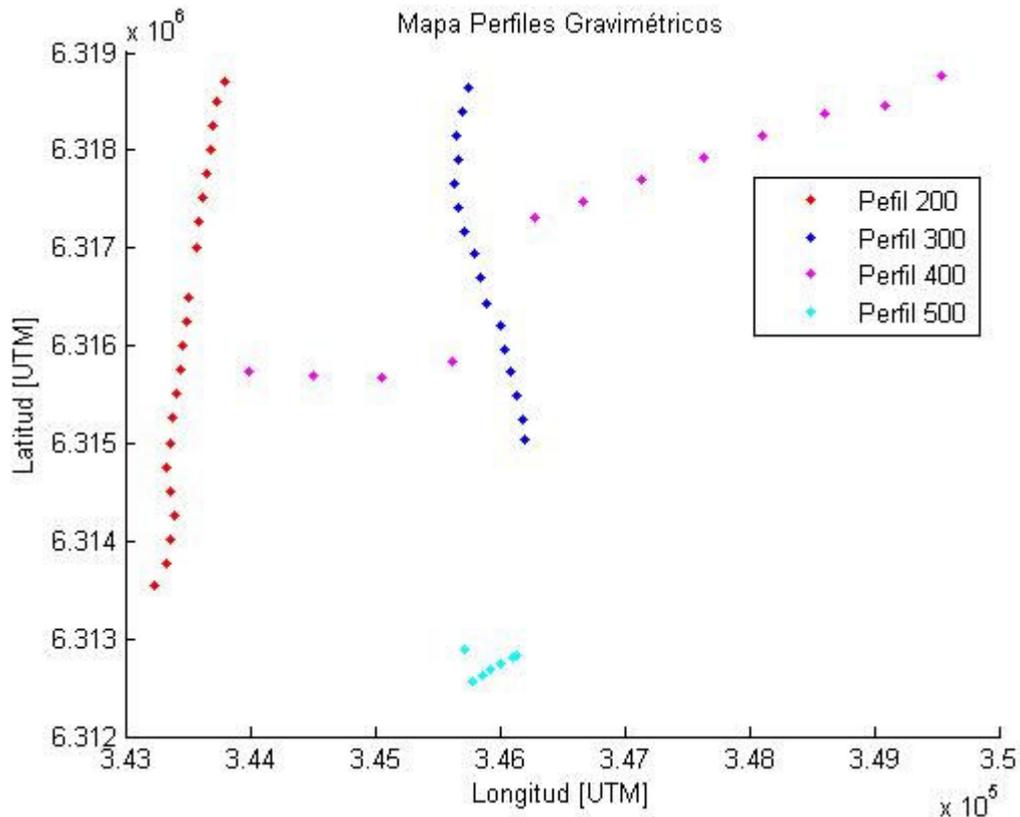


Figura N°3: Perfiles Gravimétricos

Los puntos rojos corresponden al perfil 200, los azules al 300, los magenta 300 y el cian el 500. Los cuatro perfiles se realizaron a lo largo de caminos ya existentes.

2.2 Descripción Instrumental:

Un gravímetro es un aparato que permite registrar mediciones de la componente vertical de la gravedad en un cierto punto, que corresponde a una medida relativa por estar hecha respecto a un punto dado.

El gravímetro posee un sistema interno de resortes que cambian de longitud producto de su propio peso, los cuales están conectados a una masa de prueba. En presencia de una masa anómala, ésta última se mueve, produciendo un cambio en la longitud de los resortes, pudiendo ser medido por un capacitor variable y procesado mediante un convertidor analógico digital.

Para que el resorte no sufra dilataciones térmicas, el gravímetro se mantiene a una temperatura fija y es necesario que esté en una superficie horizontal, de manera que los resortes no se “estiren” en forma anómala (esto se logra mediante el trípode incorporado que es necesario ajustarlo manualmente).

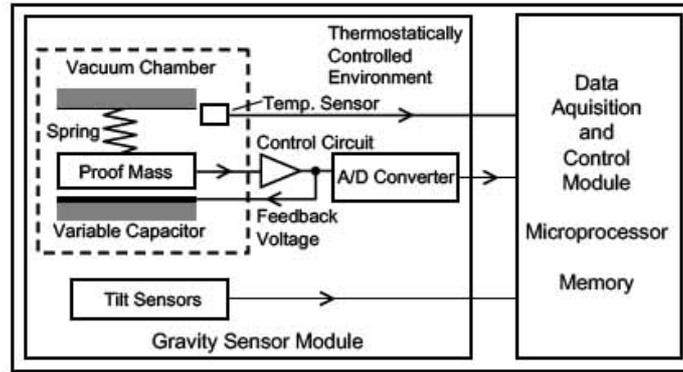


Figura N°4: Principio del funcionamiento de un gravímetro Scintrex



Figura N°5: Gravímetro Scintrex CG-3M Autograv

El equipo utilizado fue un gravímetro Scintrex CG-3M Autograv, el que tiene una resolución de 0,001mGal y está configurado para trabajar a una temperatura fija de 50°C.

2.3 Trabajo en Terreno:

Los datos fueron recogidos a lo largo de los perfiles 200, 300, 400 y 500. Las mediciones fueron realizadas con los puntos separados cada 250 metros (excepto en la primera mitad de del perfil 400, en el que la separación fue de 500 mt). En cada punto se procedió a realizar 60 mediciones, las que fueron promediadas para obtener un valor final. Una vez que se completó cada perfil, se volvió a tomar una medida al principio de la línea, con el objetivo de eliminar la deriva instrumental.

2.4 Correcciones:

Como la gravedad se calcula respecto a un nivel de referencia, es necesario realizarle una serie de correcciones para quitar el efecto del lugar geográfico en el que se encuentra realizada la medición. A continuación se detallan las correcciones realizadas:

- **Deriva instrumental:** debido a los “estiramientos” intrínsecos que sufren los resortes del gravímetro, mediciones realizadas a distintas horas del día no poseen los mismos valores. Para eliminar este efecto, se procedió a volver a medir el punto de inicio de cada perfil una vez finalizada una línea y al principio y final de cada día, se realizó una medición en un punto fijo del campamento, de manera referenciar los datos a un punto fijo con una medida absoluta.
- **Latitud:** la gravedad medida sobre la superficie terrestre tiene distintos valores producto de la latitud, debido a la desigual distribución de masas en la tierra y al achatamiento que ésta posee, por lo que a cada medida se procedió a restarle este valor, conocido como g teórico, siendo en promedio de $9,7957 \text{ m/s}^2$.
- **Aire libre:** corresponde a la disminución que sufre la gravedad por encontrarse por sobre el nivel de referencia (bajo un nivel determinado es un aumento). Su valor corresponde a $g_a = 0,3086h \text{ mGal}$, con h en metros
- **Bouguer simple:** corresponde al efecto que tiene una placa infinita sobre el punto de medición. Su valor es de $g_b = 2\pi\rho Gh$. Los datos fueron corregidos con una densidad de $2,5 \text{ gr/cc}$ y la respectiva altura de cada punto, siendo el promedio de la cuenca de 550 msnm .
- **Topográfica:** una vez que se ha quitado el efecto del relieve plano, es necesario realizar esta corrección que busca quitar el efecto que tiene la topografía (montañas, valles, etc). Ésta se realiza mediante un modelo numérico en base a un mapa topográfico. Los valores entregados fueron de 3 a 7 mGal .

2.5 Trabajo con los datos:

En Geosoft se procedió a calcular la anomalía de Bouguer completa, definida como

$$\Delta B = g_{\text{medido}} - (g_{\text{teórico}} - g_a + g_b - g_{\text{topográfico}})$$

Con estos datos se obtuvieron los siguientes perfiles de anomalías de Bouguer.

Posteriormente, se procedió a quitarles el efecto de la tendencia regional a los datos, de manera de poder llevarlos a un nivel horizontal, lo que se hizo interpolando una recta entre los puntos extremos de cada perfil y posteriormente restándola, para correr el programa “Grav_2Da”, que ajusta los datos entregados al modelo de una cuenca horizontal.

2.6 Resultados:

Las mediciones realizadas en terreno, con las correcciones especificadas anteriormente entregaron los siguiente gráficos para las anomalías de Bouguer:

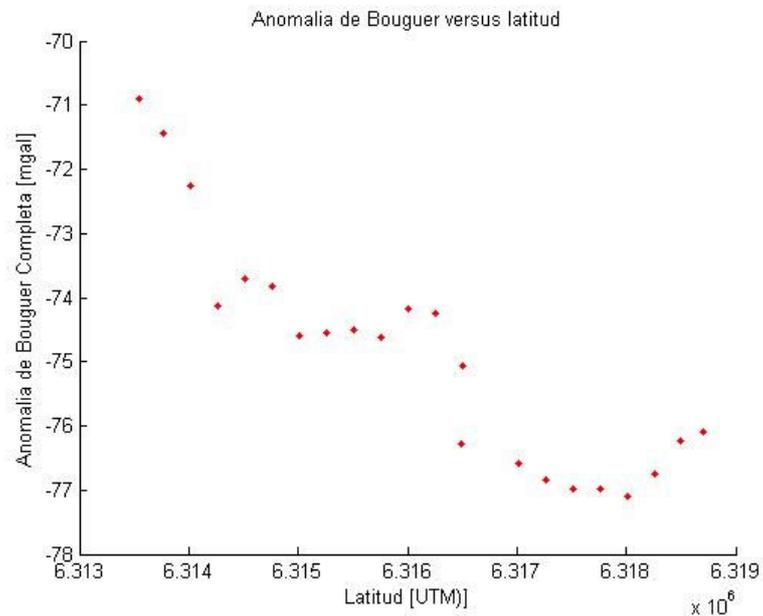


Figura N°6: Anomalia de Bouguer completa en el perfil 200

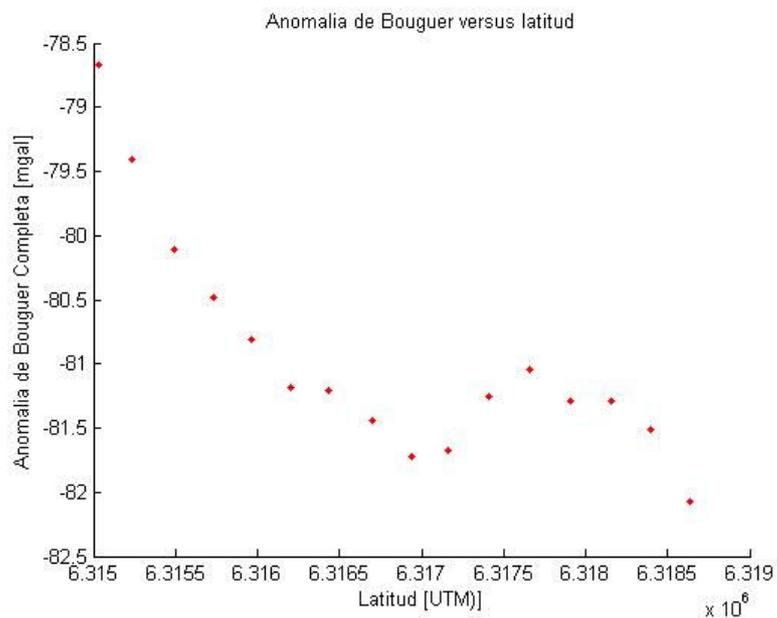


Figura N°7: Anomalia de Bouguer completa en el perfil 300

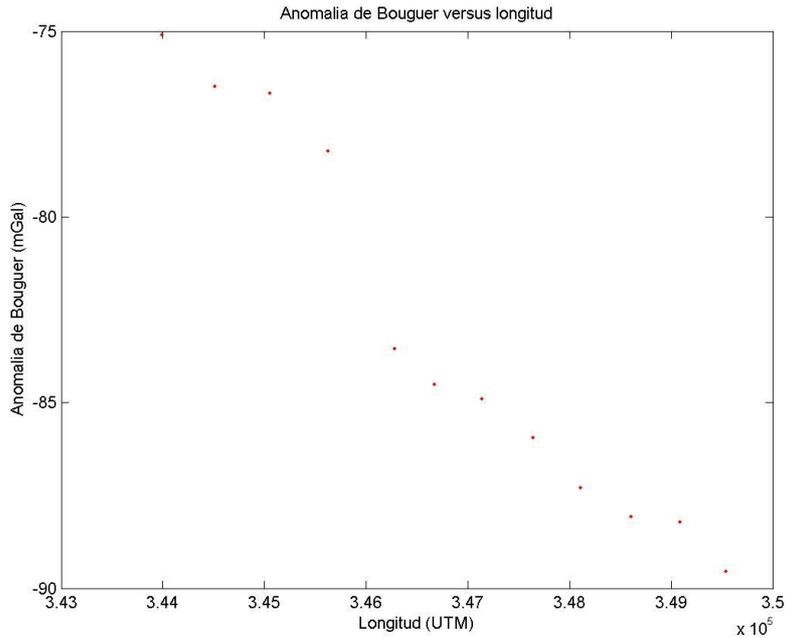


Figura N°8: Anomalia de Bouguer completa en el perfil 400

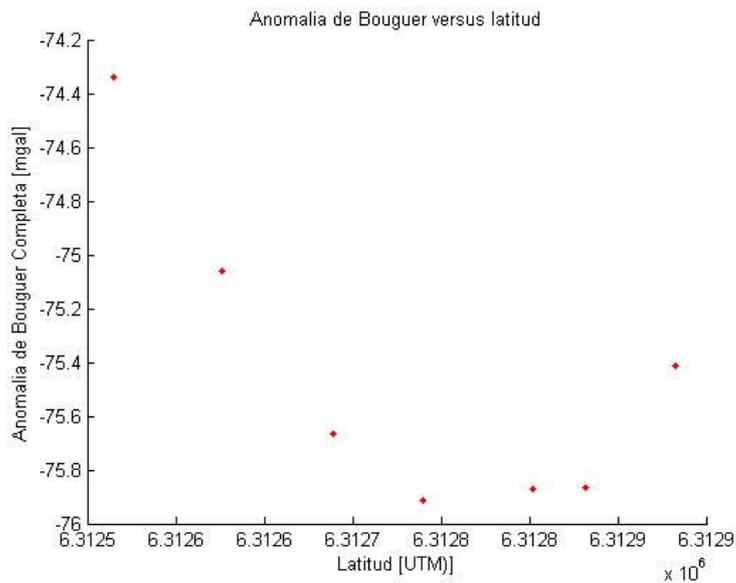


Figura N°9: Anomalia de Bouguer completa en el perfil 500

Posteriormente, se procedió a quitar la tendencia regional para poder utilizar el programa “Grav_2Da”. Primero, se llevaron los datos a un nivel cercano a 0, cosa de moderarlos como cuencas horizontales. En el caso del perfil 200, se utilizó el valor de -70mGal como nivel 0 para luego quitarle la tendencia regional. En el perfil 300, ese valor fue de -80, en 400.1 fue de -75 mGal; en 400.2 de -80mGal y en 500, de -74mGal. Posteriormente, se interpoló una recta sobre los extremos de los perfiles, la cual representa la tendencia regional, la cual fue restada a los datos.

Una vez que se realizó esta corrección sobre los datos, se obtuvieron los siguientes modelos (con una diferencia de densidades de 0.3 gr/cc.):

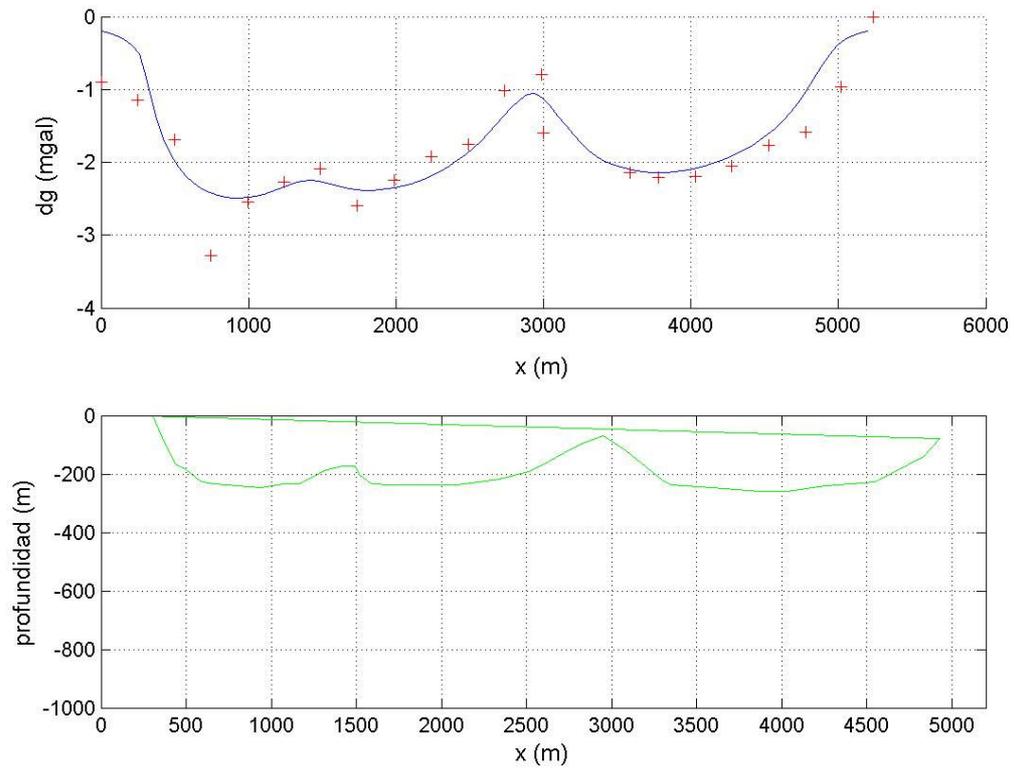


Figura N°10: modelo de cuenca horizontal para el perfil 200

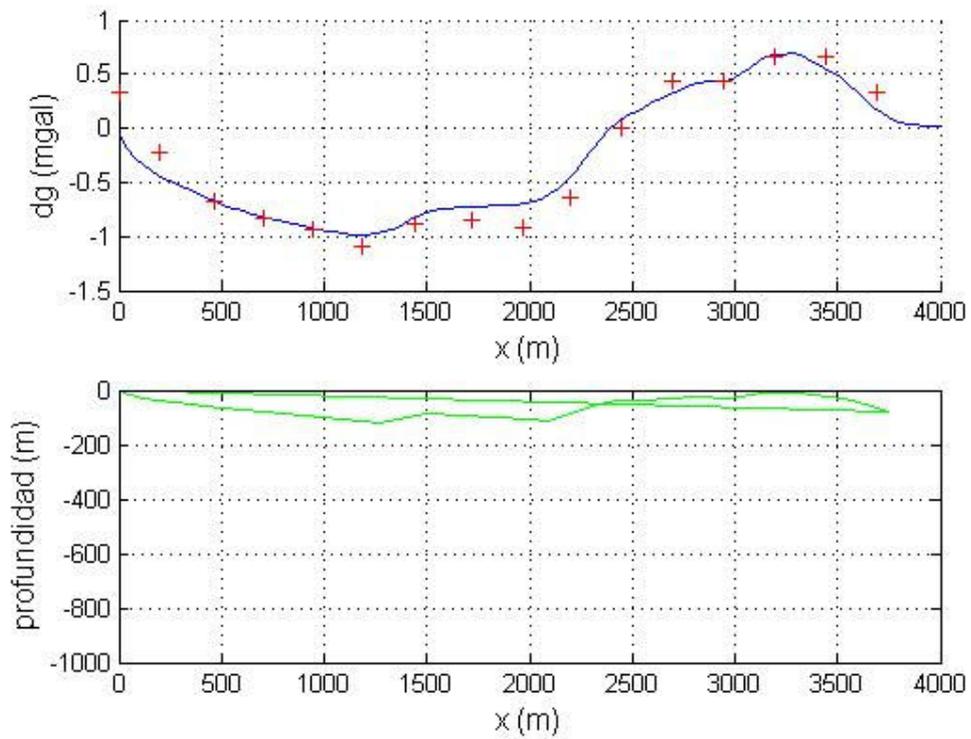


Figura N°11: modelo de cuenca horizontal para el perfil 300

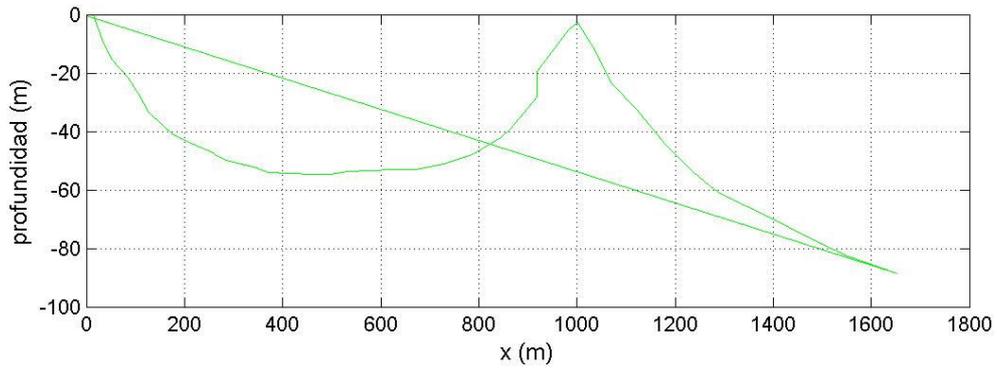
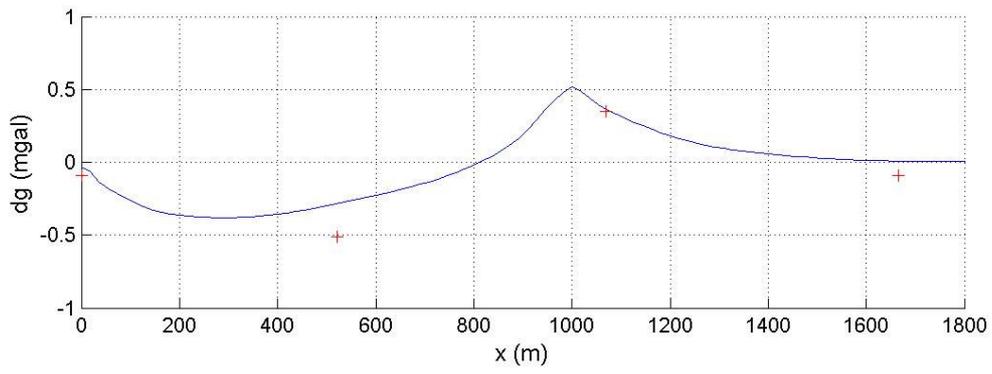


Figura N°12: modelo de cuenca horizontal para el perfil 400.1

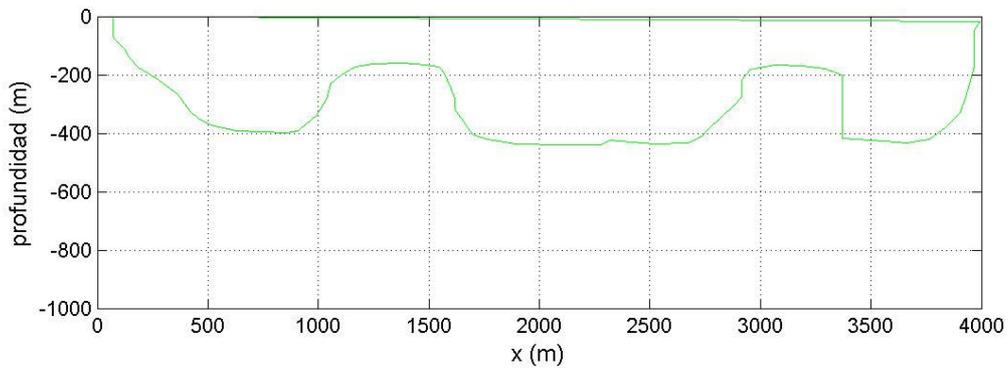
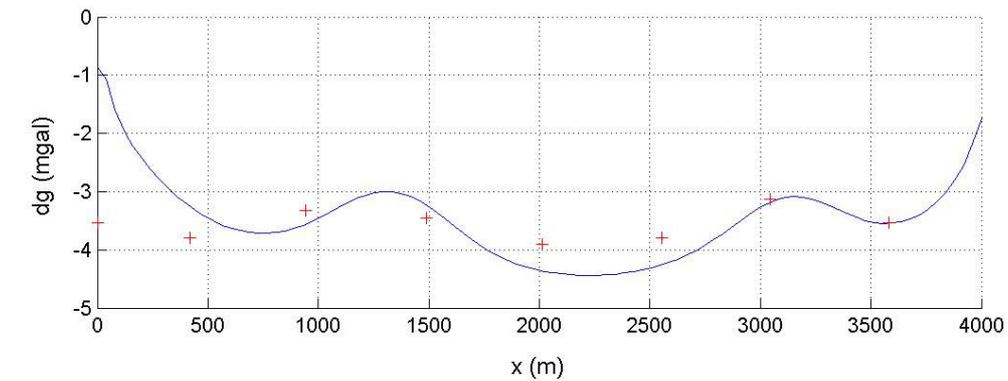


Figura N°13: modelo de cuenca horizontal para el perfil 400.2

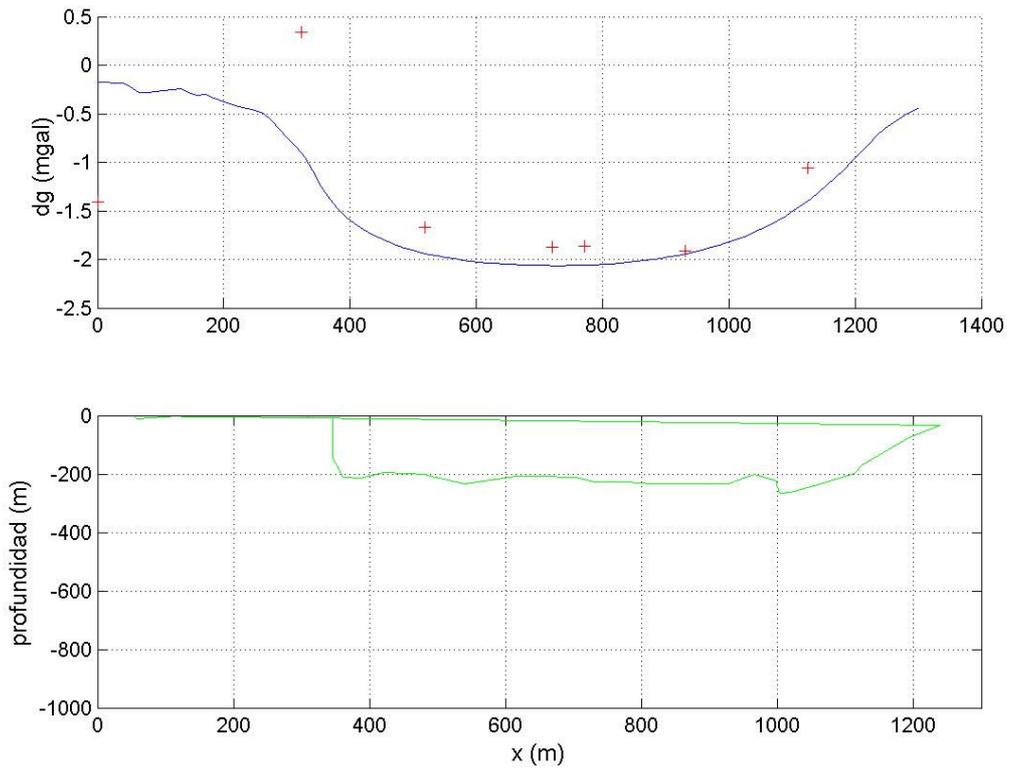


Figura N°14: modelo de cuenca horizontal para el perfil 500

3. Magnetometría:

3.1 Descripción del área de trabajo:

Las mediciones se realizaron durante los días 28 y 29 de Octubre en las dos líneas indicadas en la figura X

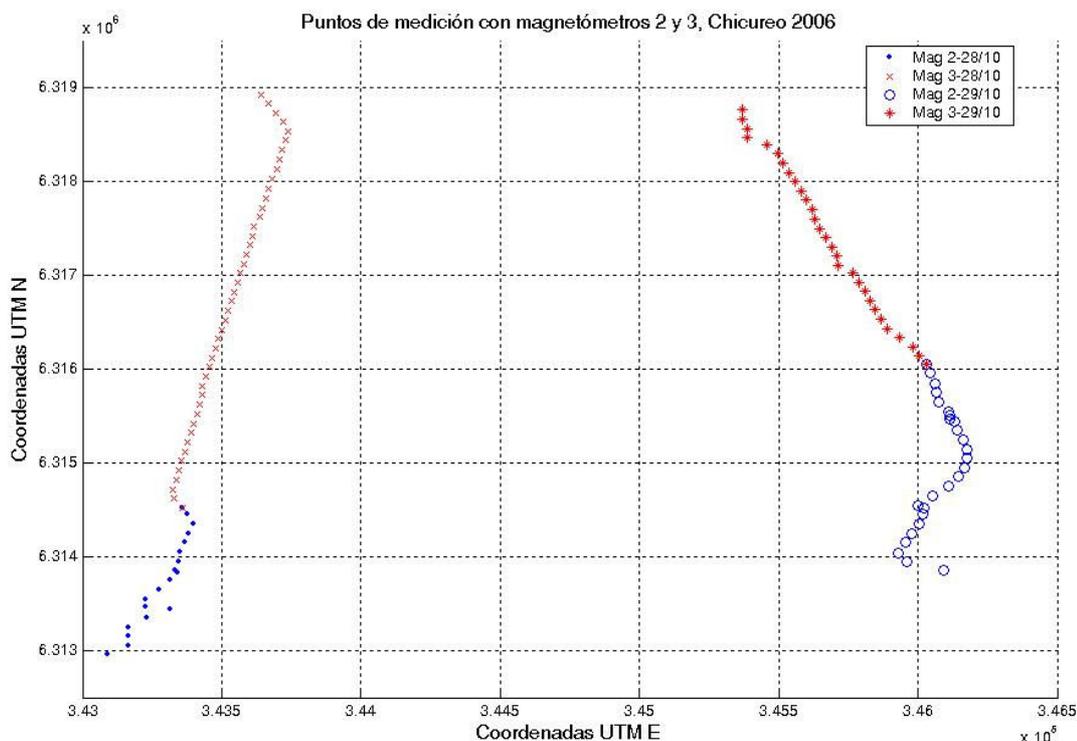


Figura N°15: Perfiles Magnéticos

La línea de la izquierda parte a los pies de un cuerpo intrusivo en un cerro y sigue a lo largo de un camino que en la parte azul está rodeado de campos y en la parte roja está rodeado por chacras y casas, con sus correspondientes cables eléctricos. La línea de la derecha también se realizó a lo largo de un camino

3.2 Descripción Instrumental:

El principio de funcionamiento de un magnetómetro de campo es el siguiente: dentro de un solenoide se dispone un líquido con protones y por fuera de él se genera un campo magnético de distinta dirección al terrestre, el que es posteriormente removido, con lo que los protones adquieren un movimiento de precesión en torno a la dirección del campo terrestre y con una frecuencia proporcional a él (ver figura N°15).

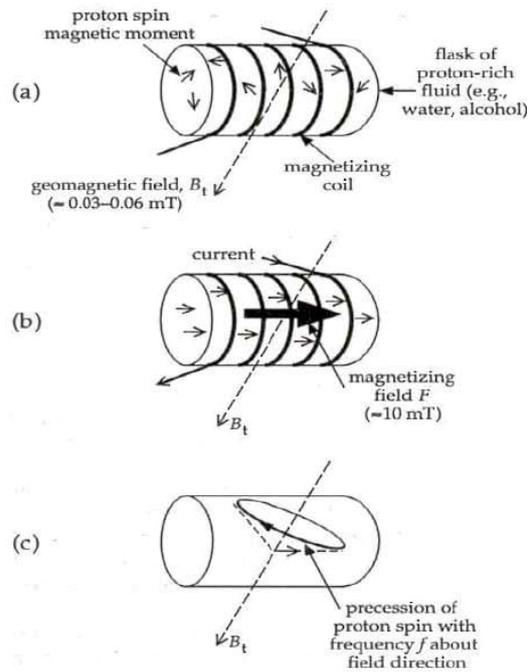


Figura N°16: Principio del funcionamiento de un magnetómetro

Los equipos utilizados en terreno fueron los magnetómetros Geometrics G-856 (tanto para la base como para el terreno) entregan una medida de campo total, poseen una resolución de 0,1 nT, una exactitud de 0,5 nT y se caracterizan por su simpleza de operación, alta capacidad en memoria e independencia de variables como la temperatura.



Figura N°17: panel de control del magnetómetro Geometrics G-856

3.3 Trabajo en Terreno:

Los datos fueron recogidos a lo largo de los perfiles indicados en la figura X cada 100 mt, registrándose tres mediciones por punto, junto con la hora y la coordenada GPS.

Al mismo tiempo, se instaló una estación base en Colina, la que tomó datos cada 30 segundos, con el objetivo de determinar la variación diurna.

3.4 Corrección por variación diurna:

Debido a las variaciones instantáneas que sufre el campo magnético terrestre, es indispensable realizar una corrección respecto a esta variación, utilizando los datos de un magnetómetro base, el cual se deja fijo mientras dura la medición. La corrección se realiza asumiendo que la variación diurna $B(t_i)$ es la misma que ocurre en el magnetómetro en la medición T_j a tiempo t_i , produciendo la anomalía magnética $C_j(t_i)$:

$$C_j(t_i) = T_j(t_i) - B(t_i)$$

3.5 Trabajo con los datos:

Se procedió a escribir una rutina en MATLAB, la que tomó los datos registrados por los dos magnetómetros de campo, promedió las 3 mediciones de cada punto, asoció la hora a cada punto, elemento que fue utilizado para restarle la variación diurna correspondiente a la hora de medición

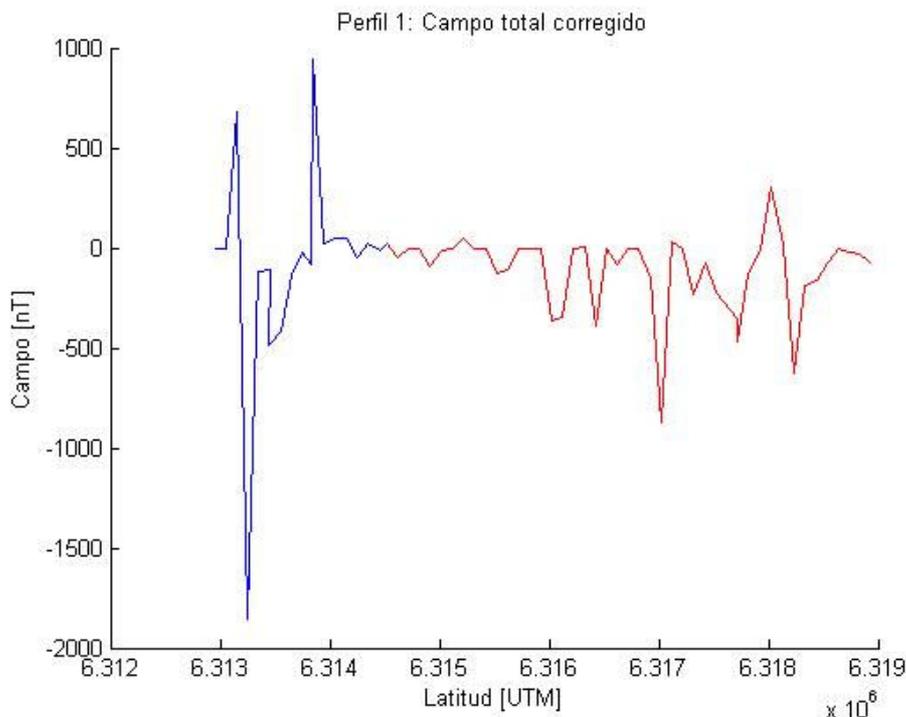


Figura N°18: Perfil 1 de anomalías magnéticas.

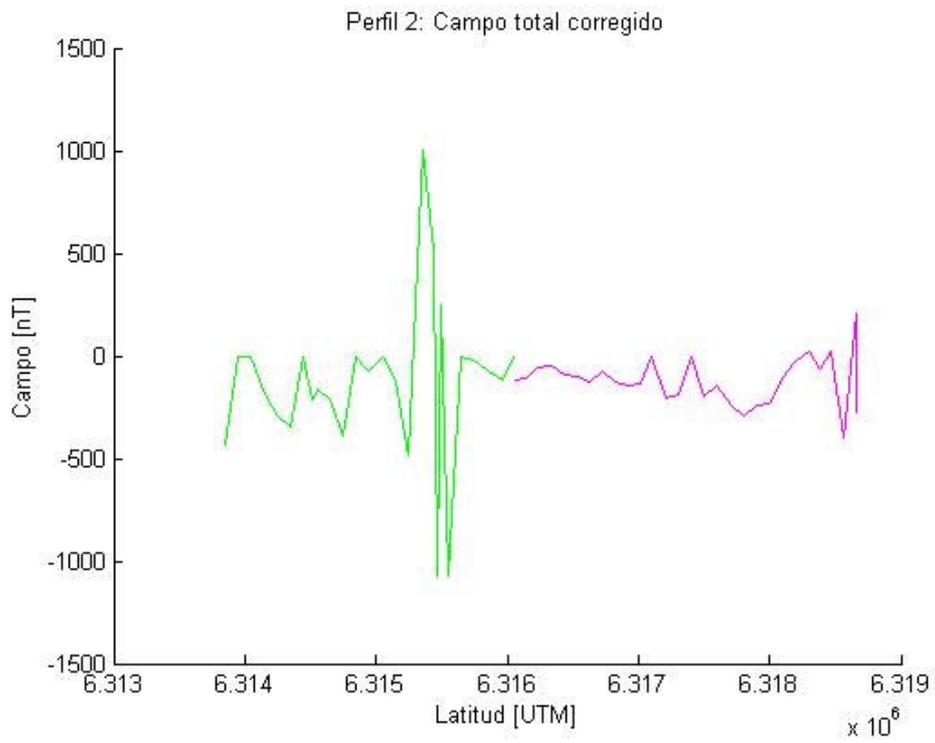


Figura N°19: Perfil 2 de anomalías magnéticas

4. Interpretación de los resultados de Gravedad y Magnetismo:

4.1 Descripción de resultados, discutir fuentes de error, calidad de los datos.

4.1.1 Magnetismo:

Los dos perfiles magnéticos muestran grandes anomalías (más de 1000 nT.), producto de que fueron realizados en una zona urbana, por lo que mucha información de ellos no se puede obtener.

El segmento rojo del perfil N°1 fue realizado al lado de cables y casas con antenas y techos metálicos, por lo que mucha información no se puede obtener. Sin embargo, al final de él se ve que el ruido disminuye, debido a que esa parte fue tomada lejos de casas, pero como ahí terminó el perfil, no se puede saber si efectivamente esa tendencia se mantiene. Por otra parte, el segmento azul muestra algunas anomalías muy altas, pero como fue realizado en un cerro y en un camino sin grandes objetos, se asume que posee menos ruido, por lo que la información que hay en él es más fidedigna.

El perfil N°2 en el segmento sur (magenta) debido a la presencia de puentes, los cuales por su estructura se comportan como dipolos magnéticos generando grandes niveles de ruido. El segmento norte de ese perfil muestra mucho menos ruido, producto de que esos datos fueron tomados en el camino hacia un cerro en un sector campestre, sin interferencia humana.

El gran error realizado fue haber obtenido estos perfiles en una zona urbana y que el aparato quizás no fue orientado directamente al norte, como es necesario.

4.1.2 Gravedad:

Los perfiles muestran una tendencia en la que la gravedad disminuye a medida que la medición se acerca a los cerros, lo que se manifiesta como una tendencia regional, como sucede claramente en el perfil 200, cuyo norte coincide con la base de un cerro. A la vez, se reconoce una especie de cuenca en cada perfil.

Respecto a los errores, se procedió a realizar varias mediciones en cada punto, con el objetivo de disminuir los errores por deriva instrumental y por perturbaciones como son las vibraciones producidas por un auto (datos que fueron rechazados). A la vez, se procedió a cerrar cada línea respecto al punto de inicio de ella, de manera que el error por deriva instrumental fuera mínimo.

Por otra parte, el modelo que ajusta los datos del programa "Grav_2da" presenta un problema, debido a que asigna los dos primeros puntos a la superficie, lo que no coincide con los datos tomados en terreno. Por eso, las curvas calculadas no se ajustan bien a los bordes.

4.2 Interpretación semi cuantitativa:

4.2.1 Magnetismo:

Antes que nada, se ve que los cuerpos producen anomalías dipolares, con los máximos y los mínimos en los bordes de ellos.

El segmento norte del perfil N°2 corresponde a un lugar en las cercanías de un cerro, con una tendencia a que las anomalías aumenten, lo que quizás tiene que ver con la presencia de algún cuerpo intrusivo en la zona (que por la geología regional se sabe que son de composición diorítica-tonalítica¹). Estos cuerpos intrusivos se caracterizan por tener una susceptibilidad magnética más alta que las rocas sedimentarias y volcánicas que los rodean.

El segmento sur del mismo perfil muestra una serie de anomalías de muy alta amplitud (de 750 nT.), las que coinciden con la presencia de puentes, los cuales por su contenido de materiales magnéticos se comportan como dipolos. Al lado de ella, se ve una nueva anomalía, pero de una amplitud mucho mayor (100 nT.), la cual se produce producto de que los datos fueron tomados a 40 mt. de un cerro de roca intrusiva.

Como se discutió anteriormente, el segmento norte del perfil N°1 fue realizado en una zona con mucho ruido, por lo que no hay una interpretación clara.

El segmento sur de ese perfil también muestra una anomalía de 0 a 1000 nT., producto de un puente en construcción y posteriormente, anomalías muy negativas, las cuales fueron registradas en un cerro, las que se interpretan nuevamente por la presencia de cuerpos intrusivos.

Sin embargo, pese a que los cuerpos ígneos se pueden correlacionar con las anomalías magnéticas, éstas aún son muy altas, lo que nuevamente se interpreta por el nivel de ruido presente.

4.2.2 Gravedad:

Los perfiles de las anomalías de Bouguer muestran la tendencia esperada de que al acercarse a un cerro, la anomalía se hace cada vez más negativa.

Los modelos de cuencas horizontales muestran que en general, los datos se adaptan bastante bien a ellas, y que efectivamente hay una disminución de la gravedad asociada no sólo al efecto que ejerce la tendencia regional sobre ellas, sino que también al efecto de estos déficits de densidad.

Al tratar de hacer la correlación entre los datos magnéticos y gravimétricos en el perfil 200, se ve que el extremo sur de ambos coincide bastante bien, debido a que corresponde a anomalías magnéticas producto de rocas intrusivas y a un exceso de masa que es el borde de una cuenca, por lo que se interpreta que ese extremo también corresponde a roca intrusiva. En el extremo norte de los perfiles, vemos una tendencia similar para la gravedad, pero con un menor aumento de la anomalía magnética. Posiblemente esto significa que ese cerro corresponde a un material con una susceptibilidad magnética inferior, como podría ser el caso de un sedimento o de una lava. Respecto a la parte del medio, aquella no corresponde al cruce por la calle principal, pero sí podría ser un aumento de altura del basamento o algún otro cuerpo de características desconocidas.

¹ La zona completa está salpicada de pequeños cuerpos intrusivos (diques, filones manto, etc.), los cuales cortan a la formación Abanico (volcanoclástica) y al relleno sedimentario.

En el caso del perfil 300, como su nivel cero es inferior al de los demás perfiles, muestra una tendencia a que los valores de las anomalías son positivos. Esto quizás se debe a que posiblemente ésta esté intruida por cuerpos ígneos (lo que se correlaciona con el magnetismo de la zona).

El perfil 400.1 corresponde al centro de una cuenca, por lo que se ve que no es de una gran profundidad (sólo algunas decenas de metros). La continuación, que corresponde al perfil 400.2 el cual está hacia los cerros que cierran la cuenca, muestra que es una secuencia de puntos, que tampoco corresponde al caso de una cuenca en el literal sentido de la palabra, sino que tiene pequeñas anomalías producto de que el fondo de ella es irregular respecto al basamento (como un contacto discordante por erosión).

Por último, el perfil 500 está en una pequeña zona rodeada de cerros y también corresponde a una cuenca.

Si se asume un modelo en el que los perfiles 200 y 300 están en el centro y sus extremos en los márgenes de una gran cuenca, la serie 400.1 debe estar en el interior de ella, debido a que los datos modelados entregan poca profundidad y las dos series restantes en los márgenes de ella.

5. Sondaje Eléctrico Vertical (SEV):

5.1 Explicación del Método

Este es un método geoelectrico, cuyo propósito consiste en identificar la configuración de capas en el subsuelo, caracterizándolas según su resistividad eléctrica.

El procedimiento en terreno radica en la transferencia de corriente eléctrica desde un generador mediante cables conductores, los que en sus extremos se conectan a dos electrodos que se entierran en el terreno. Debido a su polaridad, el flujo de corriente va desde el electrodo denominado C1 al C2, generándose a su alrededor un campo eléctrico con líneas equipotenciales concéntricas. La diferencia de potencial entre dos puntos elegidos puede ser medida mediante electrodos de potencial, P1 y P2, que de la misma forma se insertan en la superficie y se conectan a un voltímetro.

La forma en que se disponen estos cuatro electrodos en el terreno se denomina arreglo. Un ejemplo de arreglo es el conocido como dipolo-dipolo, que se muestra en la figura siguiente:

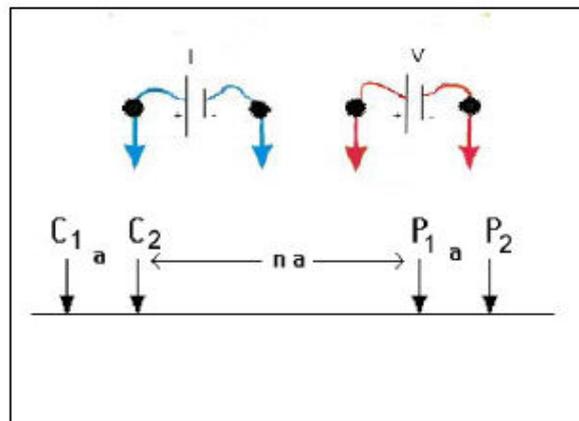


Figura 20: Ejemplo de arreglo geométrico.

De acuerdo a la ley de Ohm, la resistividad en un medio homogéneo está dada por:

$$\rho = k * V / I$$

donde k es el factor geométrico, que depende de las distancias r entre los electrodos de corriente y potencial según la siguiente relación:

$$k = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right]}$$

En el caso de un medio heterogéneo, la resistividad obtenida según la ley de Ohm será un valor aparente, ρ_a , por cuanto involucra un tipo de promedio de las resistividades de las capas que ha recorrido el flujo de corriente (lo que, por supuesto, depende de la profundidad alcanzada en la medición).

5.2 Descripción del trabajo en terreno.

La exploración eléctrica SEV se realizó en cuatro puntos:

- SEV 1, Centro N 6315325 E 346170 h 554
- SEV 2, Centro N 6314996 E 346175 h 555
- SEV 3, Centro N 6312572 E 345940 h 558
- SEV 4, Centro N 6315015 E 346321 h 579 (entre TEM_1 y Ohmmapper_1)

En esta ocasión, fue empleado en terreno el arreglo de electrodos Wenner-Schlumberger, en el que se disponen los electrodos de corriente en los extremos y los de potencial en el centro de la configuración. Para realizar las medidas, se instaló la base de trabajo en el centro del circuito, donde se encontraban el voltímetro, el amperímetro (conectados en serie) y el generador de corriente (9 baterías de aproximadamente 12V).

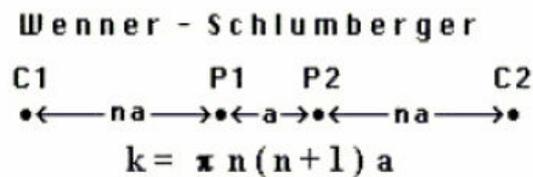


Figura 20: arreglo empleado: Wenner-Schlumberger

Para cada lugar, se realizaron mediciones para distintas distancias entre los electrodos, lo que permite acceder a distintas profundidades en el terreno. En cada caso, se midieron valores para el ciclo directo y reverso, con lo cual se pudo obtener valores promedio de la resistividad aparente, correspondientes a cada profundidad estudiada.

Los parámetros empleados entonces en este método son:

- $AB/2$ = distancia desde el centro (origen) a un electrodo de corriente
- MN = distancia total entre electrodos de potencial
- V' = voltaje promedio entre ciclo directo y reverso
- I' = corriente promedio entre ciclo directo y reverso

Mediante estos valores se puede obtener el factor geométrico K y la resistividad aparente ρ_a .

5.3 Modelación de los datos obtenidos

Gracias al programa Matlab sev_s_mo.m, se modelaron los datos, a partir de los valores ρ_{ap} y $AB/2$ para cada uno de los sondajes efectuados.

El programa sev_s_mo.m permite modelar capas horizontales planas de resistividad constante (cada capa es un estrato homogéneo en cuanto a su resistividad eléctrica). A continuación se muestran los mejores resultados obtenidos de acuerdo a la modelación descrita.

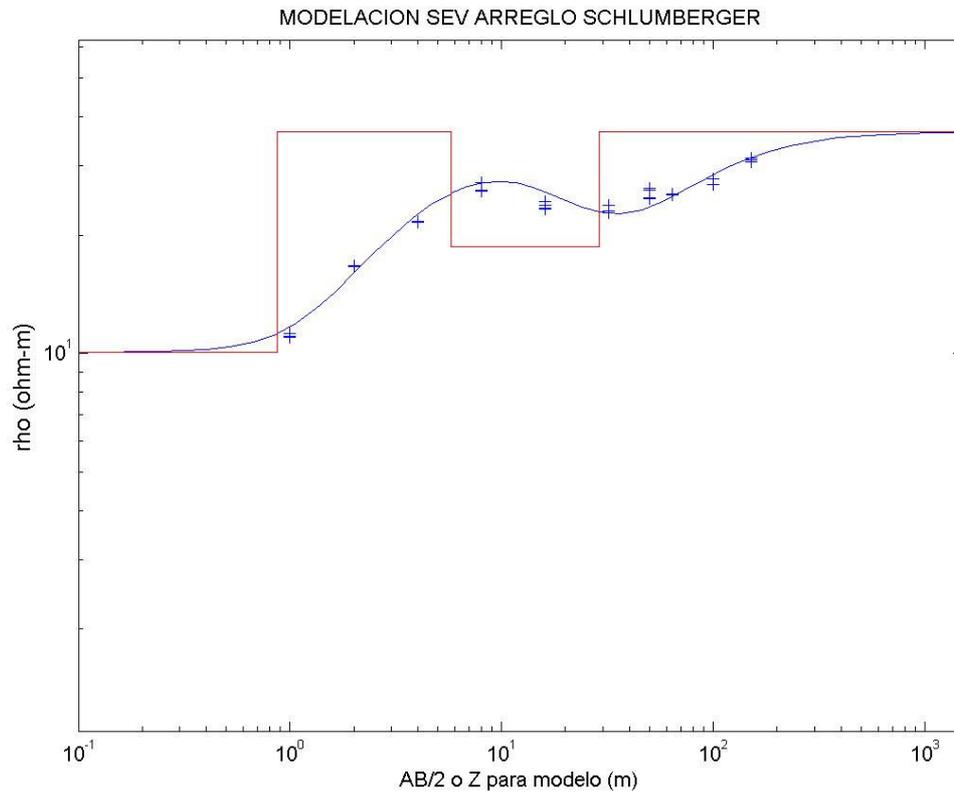


Figura N°21: SEV N°1

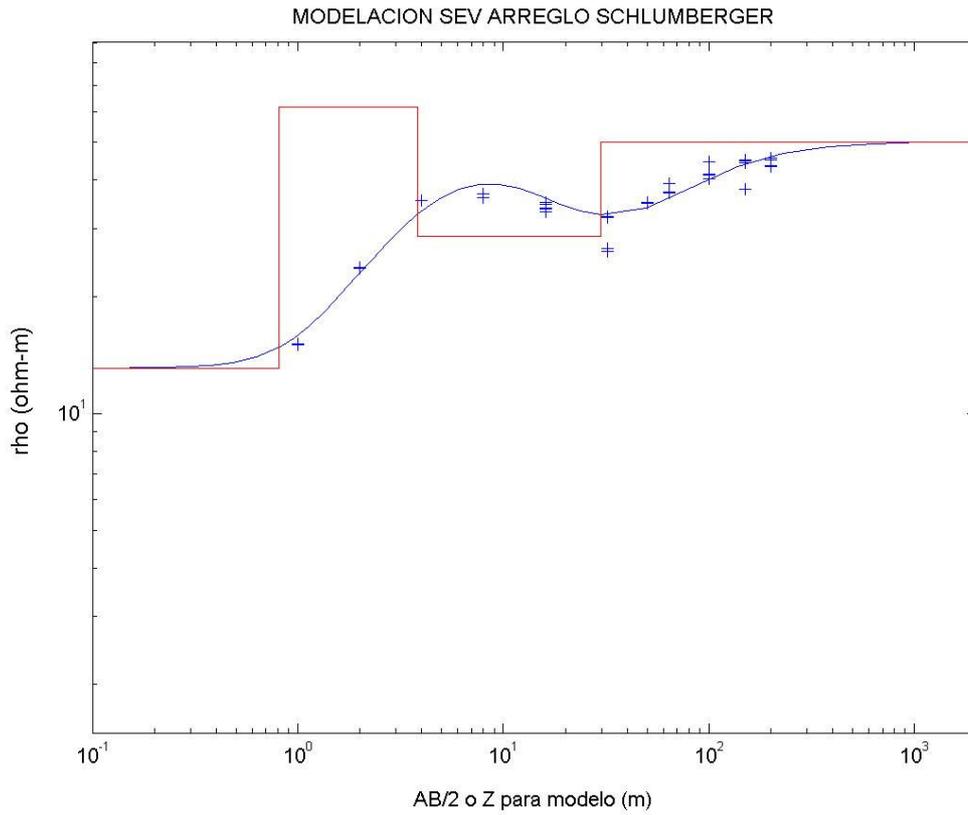


Figura N°22: SEV N°2

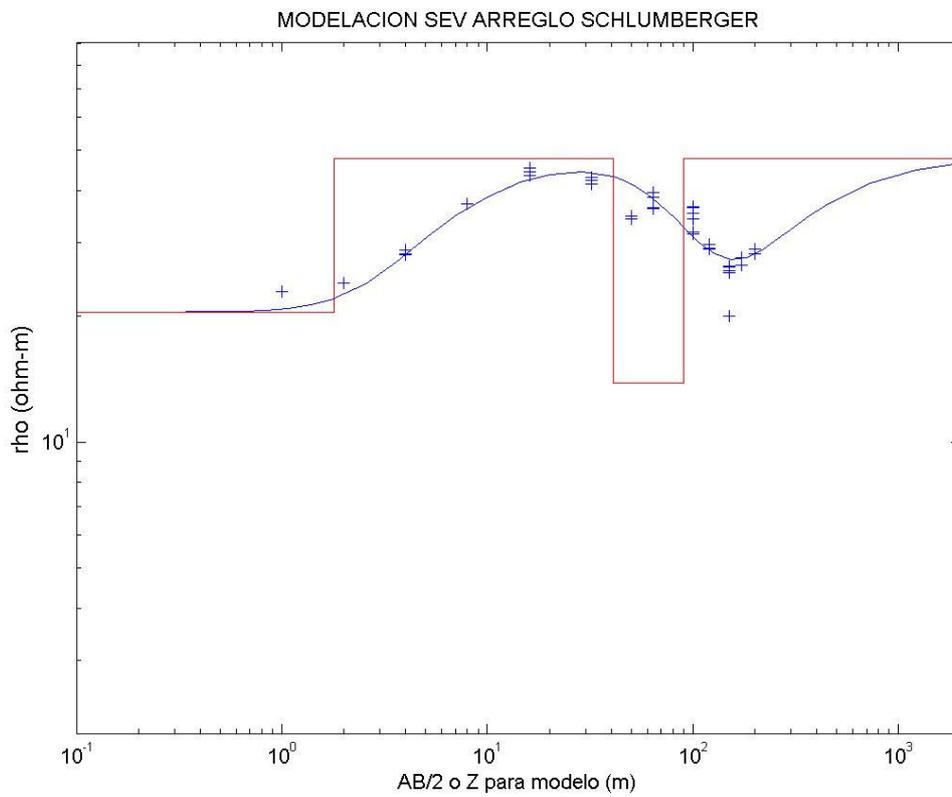


Figura N°23: SEV N°3

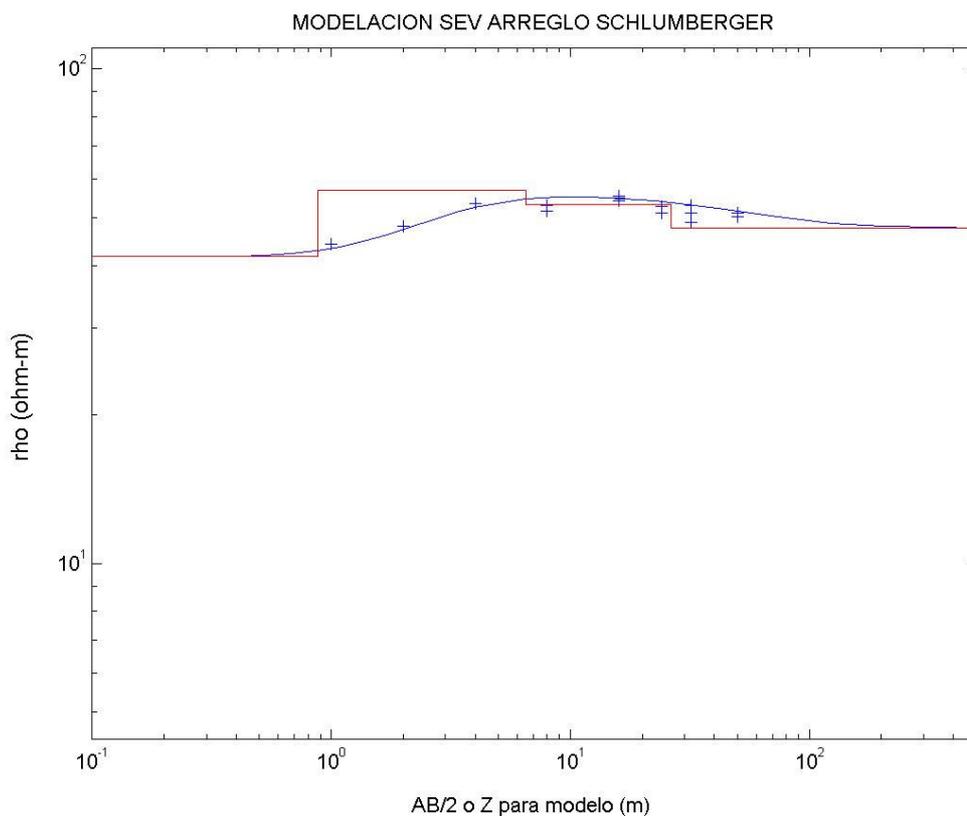


Figura N°24: SEV N°4

5.4 Interpretación de los resultados.

Los datos obtenidos de acuerdo al modelamiento de capas anterior se presentan en la siguiente tabla:

	SEV 1		SEV 2		SEV 3		SEV 4	
	espesor [m]	resistividad [Ω m]						
capa 1	1	10,103	0,8	13,097	2	20,485	0,9	41,742
capa 2	5	36,616	3	61,527	39	47,782	5,6	56,95
capa 3	23	18,674	25,9	28,558	49	13,869	19,8	53,318
capa 4	-	36,616	-	50,179	-	47,782	-	47,6225

Cabe destacar que los resultados expuestos representan un modelo de cuatro capas para cada perfil. La modelación para cada caso buscó obtener una curva de valores de resistividad aparente según esta consideración.

La profundidad máxima de penetración alcanzada corresponde al sondaje 3, y es de aproximadamente 100m.

Analizando los gráficos y los valores obtenidos, se puede establecer lo siguiente:

- La capa superficial es de un espesor que fluctúa entre los 0,8 y 1 m, y presenta una baja resistividad relativa a las más profundas; geológicamente puede ser probablemente descrita como sedimentos no consolidados.
- La resistividad, en términos generales, tiende a aumentar su valor con la profundidad
- En los casos de los sondajes 1, 2 y 3, se aprecia, sin embargo, que la tercera capa presenta una resistividad más baja que sus adyacentes.
- Esta observación, en el caso de los sondajes 1 y 3, puede tener relación directa con nuestro estudio: determinar la profundidad del acuífero correspondiente a la napa freática, debido a los bajos valores de resistividad calculados: 18,674 y 13,864 [Ω m], respectivamente, los que caen dentro de los esperados para el agua.
- En estos mismos sondajes, las capas superiores e inferiores a la supuesta napa freática presentan el mismo valor de resistividad (o bien muy parecido en la realidad). Lo anterior puede ser interpretado como un solo estrato geológico interrumpido o cortado por el acuífero. Esta interpretación es válida también para el sondaje 2, aunque no de forma tan evidente.
- La resistividad de las capas adyacentes recién mencionadas debe estar afectada por su cercanía al acuífero, es decir, el agua ionizada seguramente aumenta el valor de la resistividad de éstas.
- En el cuarto sondaje no se observa de forma clara una eventual napa freática. No obstante, observamos que la resistividad aumenta levemente en las capas 2 y 3, y luego, en la capa 4 retoma un valor parecido al superficial, que, cabe mencionar, es bastante más alto que en los otros sondajes. Este valor es extraño, debido a que pese a que el sondaje fue realizado a los pies de un cerro de roca intrusiva (que corresponde al perfil N°2 de magnetismo), no se observan resistividades propias de basamento (200 [Ω m]), por lo que se interpreta que la roca se encuentra fracturada.

6. TEM

6.1 Explicación del Método

El método del transiente electromagnético (TEM) se usa para realizar sondajes verticales; es una de las técnicas modernas más usadas en la exploración de agua subterránea debido a su alta resolución vertical.

El equipo consiste de un transmisor y un receptor, que pueden estar contenidos en un mismo módulo, se requiere además de una fuente de poder para el transmisor. La profundidad de estudio posible comprende desde las decenas de metros hasta más de 1000 m; los factores que la determinan son principalmente el tamaño del loop empleado, la capacidad de la fuente de poder y el ruido del medio.

El procedimiento del método consiste en la inducción de campos eléctricos y magnéticos por pulsos transientes de alta corriente a través de un loop (típicamente un cuadrilátero de unos cientos de metros, pero puede variar de las decenas de metros a kilómetros) ubicado sobre el suelo, cuya longitud depende de la profundidad de investigación deseada y el área que puede ser cubierta. La corriente se entrega en pulsos cíclicos de polaridad alterna, el receptor mide el campo secundario del loop receptor en el apagado de pulsos y registra el tiempo transcurrido entre los intervalos de medición o ventanas. Los intervalos de tiempo típicos de decaimiento de la señal de onda varían de los 30 microsegundos a las centenas de milisegundos. Para contar con precisión en la medida de estos tiempos, se requiere que el transmisor y el receptor estén sincronizados.

El arreglo empleado en las mediciones de terreno correspondió al del loop coincidente: se tiende sobre el terreno una bobina construida por un cable en un cuadrilátero de 50x50 m (correspondiente a un área de 2500 m²) y otro cable secundario de longitudes similares que configura otro cuadrilátero por dentro del primero. Con este arreglo se puede investigar una profundidad cercana a los 100 m, sin embargo, en el caso general debe fijarse bien el tamaño del loop en función de los objetivos del estudio (profundidad deseada), además, a mayor profundidad sería necesario contar con fuentes de poder capaces de entregar una baja frecuencia para el estudio.

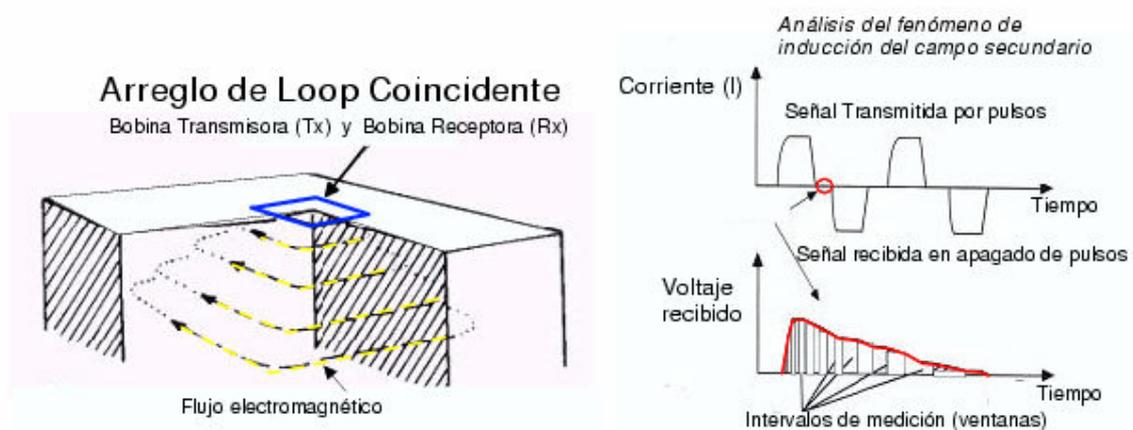


Figura 25: arreglo de loop coincidente y forma de datos registrados

La medición se llevó a cabo el día 31 de octubre, con condiciones climáticas favorables de día soleado. El sector de estudio se ubicó cerca del perfil 1 realizado por el ohmmapper, a un lado del camino existente en las coordenadas 346245-6315254, y correspondió a un área de topografía regular, cubierta de hierbas y pasto largo; algunos arbustos y árboles crearon dificultades para disponer los cables, que fueron sin embargo superadas. El terreno presentaba baja humedad.

Ventajas del método:

- elimina el problema de la capa superficial de alta resistividad (por ejemplo el caliche en el Norte de Chile) que impide la inyección de corriente en el suelo
- no necesita de factores de corrección, como es el caso de la gravimetría
- no hay problemas debido a contacto galvánico (como en el caso del SEV)
- es capaz de penetrar en capas conductoras
- aporta alta resolución lateral

Desventajas del método:

- requiere instrumentos técnicamente sofisticados
- los programas computacionales utilizados para el procesamiento de los datos son matemáticamente complejos
- su aplicación depende altamente de la topografía: ésta se hace inviable en sectores muy irregulares

El equipo utilizado en terreno fue el GDP-16 Zonge de la empresa Geodatos, el cual se caracteriza por tener un rango de frecuencias de 0,001 Hz a 8 kHz

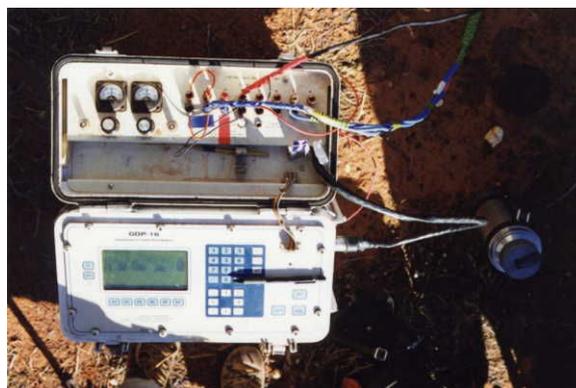


Figura N°26:equipo TEM GDP-16 Zonge empleado en terreno

6.2 Análisis de los resultados obtenidos

En terreno, el estudio fue realizado por un equipo de la empresa Geodatos, quienes además efectuaron el procesamiento de los datos obtenidos. De esta forma, se obtuvieron los siguientes gráficos:

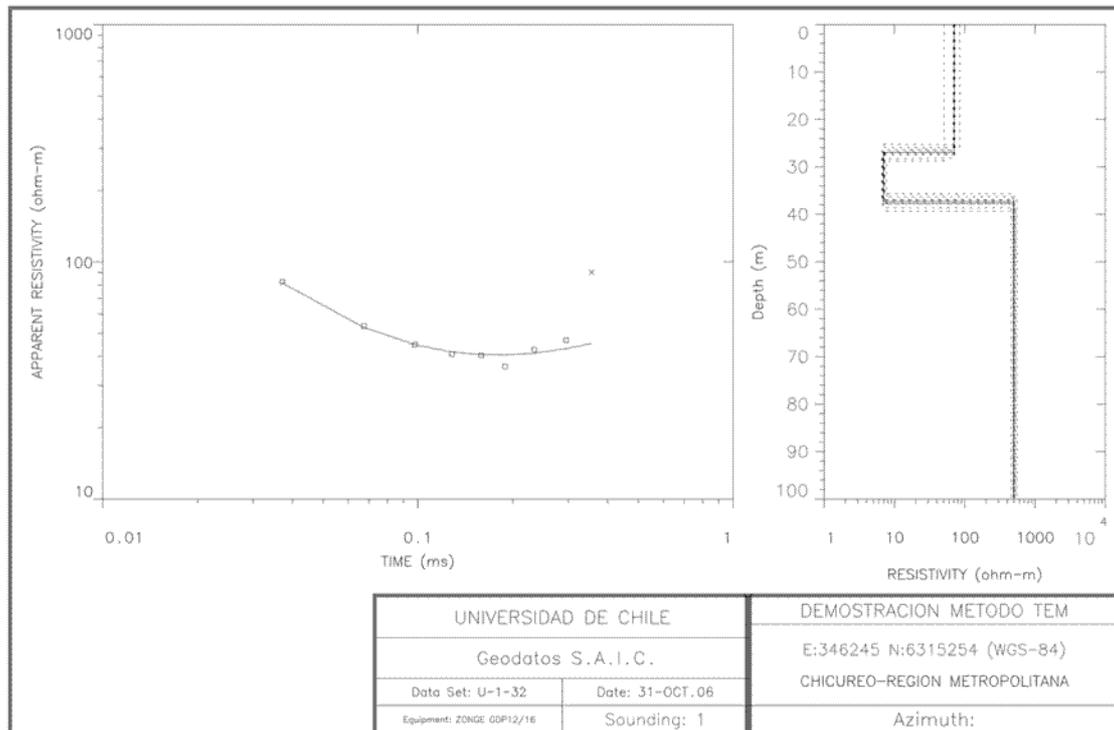


Figura 27: resultados del método TEM

De estos gráficos es posible realizar las siguientes observaciones:

- El sondaje alcanza una profundidad aproximada de 100 m.
- Se cuenta con un modelo de tres capas.
- La capa superior se encuentra entre la superficie y los 27 m, su resistividad corresponde aproximadamente a los 70 Ω m.
- La segunda capa, de unos 10 m de espesor, está ubicada entre los 27 y 37 m y su resistividad es de unos 7 Ω m.
- La tercera capa comienza a los 37 m y muestra una resistividad de 500 Ω m.

En un análisis comparativo con los datos obtenidos con el método SEV, se puede comentar lo siguiente:

- En el SEV se ajustó un modelo de cuatro capas de resistividad homogénea, mientras que la inversión de datos del TEM entrega un modelo de sólo tres. Probablemente los datos de baja frecuencia no son muy confiables y por eso un modelo de sólo tres capas es muy simple respecto al SEV.
- La resistividad observada de acuerdo al método TEM para la primera capa es bastante mayor que las obtenidas mediante el SEV; es más, el TEM muestra una

capa superficial de un espesor de 27 m, mientras el SEV da cuenta de una capa superficial de entre 1 y 2 m.

- Por lo tanto, puede postularse que este valor mayor de resistividad corresponde a una capa sedimentaria de mayor espesor y menor consolidación que la correspondiente a los sondajes realizados con el SEV.
- La segunda capa, de menor resistividad ($7 \Omega\text{m}$), puede asociarse a la napa freática. Este valor, menor a los obtenidos con el SEV, se debe en este caso probablemente a la presencia de más iones conductores en el agua.
- La tercera capa presenta una resistividad de $500 \Omega\text{m}$ a partir de los 37 m, valor alto no registrado en el caso del SEV. Esta resistividad puede corresponder con bastante seguridad al basamento, cuyos valores típicos son de las centenas de Ωm . Sin embargo, este valor puede ser poco confiable a los datos de baja frecuencia y al ajuste simplificado de tres capas.
- La profundidad del supuesto acuífero varía respecto a las estimadas mediante el método SEV: en este caso la podemos observar entre los 27 y 37 m, mientras el procesamiento de datos del SEV la ubica entre los 6 y 29 m para el primer sondaje, y entre los 41 y 90 m para el tercer sondaje del SEV.
- Los espesores respectivos de esta napa corresponden, por lo tanto, a 10 m para el TEM y 23 m y 49 m para los sondajes 1 y 3 del SEV, respectivamente.
- La diferencia en la ubicación de la napa freática, en este caso, puede deberse a distintas causas, entre las que cabe destacar:
- La variación en los valores de profundidad y resistividad obtenidos mediante el método TEM y el SEV se deben, en una primera observación, a que los sondajes fueron efectuados en lugares distintos.
- Los resultados del TEM corresponden a una inversión matemática, mientras los del SEV son producto de ensayo y error; además, el principio de equivalencia puede llevar a un modelo teórico de capas que se ajuste a los datos pero no corresponda a la realidad.
- Los valores bajos de resistividad (entre 7 y $19 \Omega\text{m}$ para los tres perfiles) pueden no corresponder necesariamente a un acuífero, o por lo menos en el caso del sondaje 3 del SEV, a una capa de material saturado que contenga al acuífero y presente por lo tanto el valor relativamente bajo de resistividad de $13,869 \Omega\text{m}$. Esto último debido a que su espesor es mucho mayor al observado en los otros dos casos.

7. Ohmmapper

7.1 Explicación del Método

Este instrumento geoelectrico se caracteriza por no presentar conexión física con el medio estudiado, a diferencia, por ejemplo, del SEV. Sin embargo, se puede establecer un paralelo con este último método, considerando que el ohmmapper presenta una similitud con un arreglo dipolo-dipolo: el instrumento consta de un transmisor que entrega corriente al suelo y un receptor que mide la diferencia de potencial.

El ohmmapper funciona en base al acoplamiento capacitivo: la corriente alterna emitida por el transmisor a una frecuencia de 16,5 kHz es empleada en los cables electrodos (“electrodos lineales”) para conformar un condensador equivalente entre éstos y el suelo que está constantemente en carga y descarga, inyectando corriente alterna al medio.

La máxima profundidad de investigación alcanzada por el ohmmapper o “skin depth”, además de la longitud de los cables, que determina la geometría del arreglo, depende de la resistividad del medio y de la frecuencia de transmisión la señal de la siguiente manera:

$$sk = 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

donde:

sk: “skin depth”

ρ : resistividad del medio

f : frecuencia de transmisión

La ventaja comparativa del ohmmapper frente a otros métodos geoelectricos consiste en que, al ser móvil, facilita las medidas para la obtención de una pseudosección. Por otro lado, el skin depth puede significar una limitante importante en la profundidad de investigación.



Figura 28: ohmmapper: consola, receptor, transmisor y cables electrodos



Figura 29: trabajo en terreno con el ohmmapper

7.2 Análisis de resultados

Con las medidas realizadas se obtienen pseudosecciones de resistividad aparente, otorgadas por el mismo instrumento, que además cuenta con un software que realiza la inversión de los datos para obtener un modelo bidimensional teórico de resistividad que resulte similar al que originó los datos. En las figuras que presentan los resultados se muestra en la parte superior la pseudosección de resistividad aparente medida, en la inferior el modelo bidimensional obtenido mediante inversión de los datos, y al medio, la pseudosección originada a partir del modelo teórico, que debe coincidir aceptablemente con la primera.

En la experiencia en terreno se realizaron dos perfiles con este método. Las mediciones fueron llevadas a cabo en un día soleado de primavera, y presumiblemente bastante después de la última lluvia, por la sequedad del terreno.

Perfil 1

Las coordenadas son: **10 m: N 6315015, E 346321, h 579**
 30 m: N 6315002, E 346348, h 578

Descripción del terreno

Este sondaje se realizó sobre rocas estratificadas, los valores de resistividad se encuentran en el rango de 20 a 500 Ω m, que, sin ser en extremo bajos, implican que el skin depth sea una limitante en la profundidad de estudio.

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente figura:

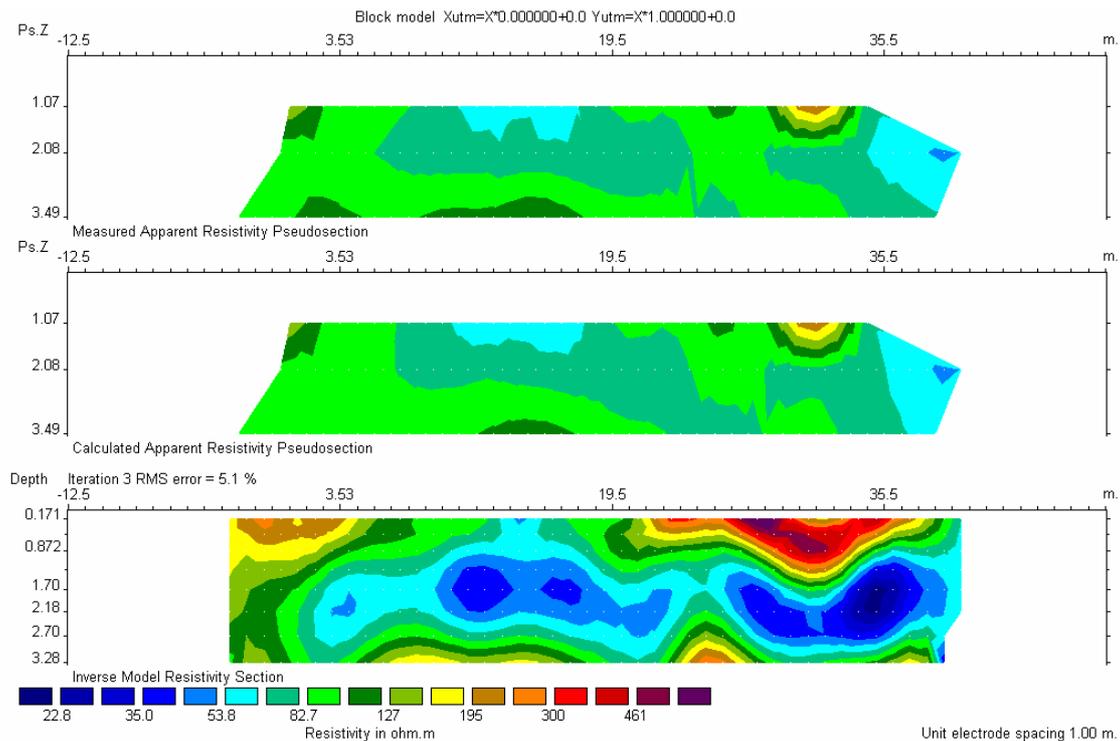


Figura 30: pseudo secciones de resistividad aparente y modelo calculado perfil 1

La interpretación correspondiente considera los siguientes puntos:

- la profundidad de estudio sobrepasó los 3 m
- los valores de resistividad fluctúan entre los 20 y 500 Ω m aproximadamente
- se aprecia cierta distribución heterogénea por capas, que dan cuenta de la geología local que corresponde a rocas estratificadas
- se observa que el estrato intermedio presenta una resistividad menor a su capas adyacentes: puede tratarse de rocas menos fragmentadas
- la capa más superficial que presenta una resistividad mayor (entre 300 y 500 Ω m), puede corresponder a un cuerpo intrusivo arrastrado de alguna otra zona, debido a que no posee una raíz en profundidad.

Perfil 2

Las coordenadas son: **0 m: N 6312689, E 345694, h 566**
-40 m: N 6312662, E 345720, h 567

Descripción del terreno

Este sondaje se llevó a cabo en la ladera de un cerro pequeño, la capa superficial, pequeña, consistía en sedimentos que cubrían un intrusivo.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

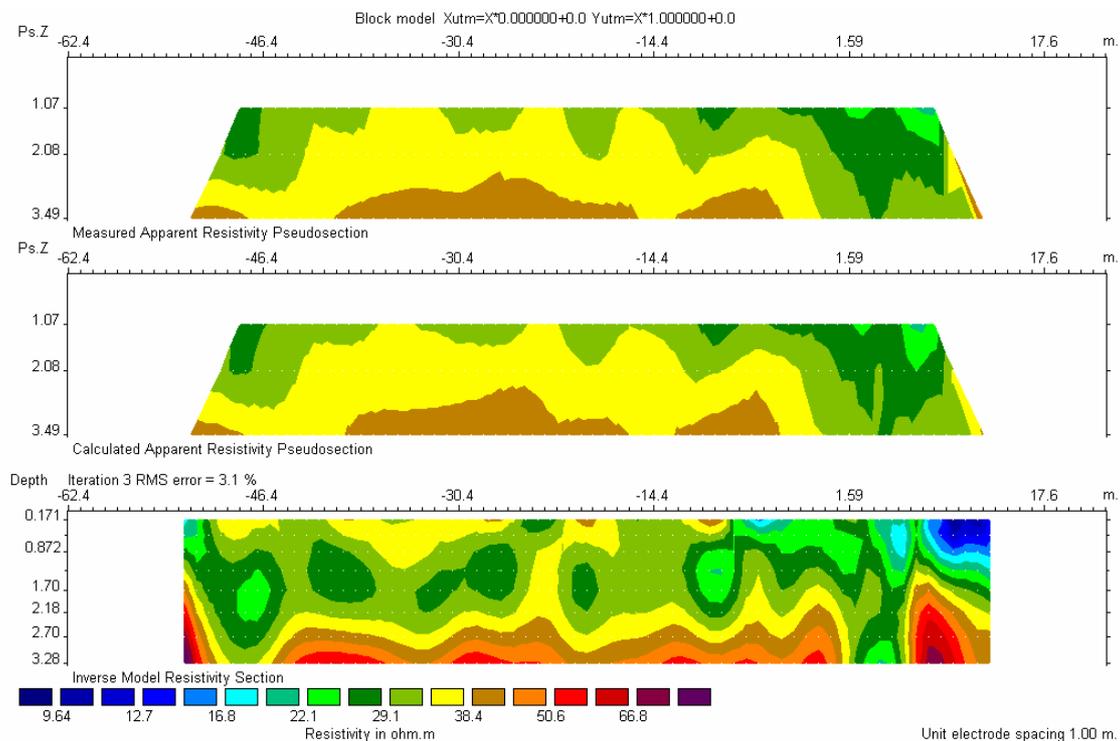


Figura 31: pseudo secciones de resistividad aparente y modelo calculado perfil 2

La figura anterior permite interpretar:

- la profundidad alcanzada superó los 3 m
- se observa una distribución de resistividades que, aunque en principio heterogénea, presenta cierta distribución por capas en profundidad
- los valores de resistividad son mucho menores a los del primer perfil, lo que da cuenta de materiales más conductores, como es el caso del intrusivo que asociamos al lugar
- estos valores aumentan con la profundidad desde 22 a 70 Ω m, exceptuando la capa más superficial, que presenta una resistividad cercana a los 38 Ω m y puede ser entonces asociada a sedimentos poco consolidados
- en el extremo derecho del sondaje (correspondiente aproximadamente a 10 m) se aprecian valores relativamente más bajos de resistividad, del orden de 12 Ω m. Éstos pueden asociarse a un sector probablemente más húmedo (saturado por agua) que puede corresponder a las raíces de los árboles y arbustos que se apreciaban en el lugar

Es menester precisar que el ohmmapper, como se observa, permite efectuar mediciones superficiales, y cuenta con buena resolución en esta zona. El método SEV, en cambio, entrega una distribución más general de resistividades en profundidad y el TEM entrega mediciones de buena resolución y alta penetración

8. Sísmica:

8.1 Descripción del trabajo en terreno.

En terreno se realizaron dos perfiles sísmicos, el perfil 1 situado al norte de la rotonda Piedra Roja con 22 geófonos, y el perfil 3 aproximadamente en región de SEV1 con la instalación de 21 geófonos, siguiendo ambos perfiles aproximadamente una línea con dirección Sur-Norte.

Una vez realizada la instalación de geófonos se procedió a golpear, con un martillo, el suelo, a 10 metros del primer geófono, para crear una onda que fue registrada para generar luego los archivos .jpg utilizados para la obtención de las trazas de las ondas para cada geófono y posteriormente de los tiempos y distancias necesarios para la determinación de las curvas camino-tiempo.

Se realizaron dos disparos en cada perfil, uno directo desde el sur y otro reverso desde el norte. El objetivo fue detectar una posible inclinación de la interfaz que separa el relleno sedimentario del basamento rocoso.

8. 2 Detalle de los perfiles realizados.

Perfil 1, al norte de rotonda Piedra Roja

Disparo directo (Sur): (345686E, 6317241N, 601 z)

Ubicación de disparo en línea $x=0$, geófonos en $g_x = 10, 20, 30, \dots, 210$ m.

Archivo: chicu8.jpg

Disparo reverso (Norte): (345639E, 6317466 N, 602 z).

Ubicación de disparo en línea $x = 230$, geófonos en $g_x = 10, 20, 30, \dots, 220$ m.

Archivo: chicu1-4.jpg

Perfil 3, aprox. en region de SEV1.

Disparo directo (Sur): (346194 E, 6315218 N, 552 z)

Ubicación de disparo en línea $x = 0$, geófonos en $g_x = 10, 20, 30, \dots, 210$ m.

Archivo: chicu17-19.jpg

Disparo reverso (Norte) : (346138 E, 6315447 N, 552 z).

Ubicación de disparo en línea $x = 230$, geófonos en $g_x = 20, 30, 40, \dots, 220$ m.

Archivo : chicu24-25.jpg

8.3 Datos:

Los archivos jpg. fueron utilizados para obtener las trazas correspondientes a los perfiles 1 y 3:

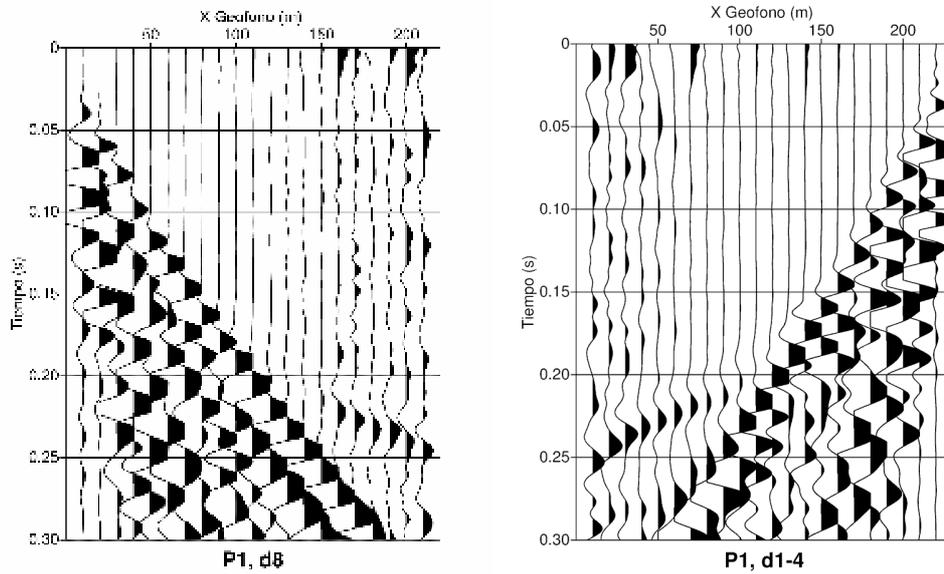


Figura N°32: Perfil sísmico N°1. P1,d8 : perfil 1 directo sur. P1,d1-4: perfil 1 reverso

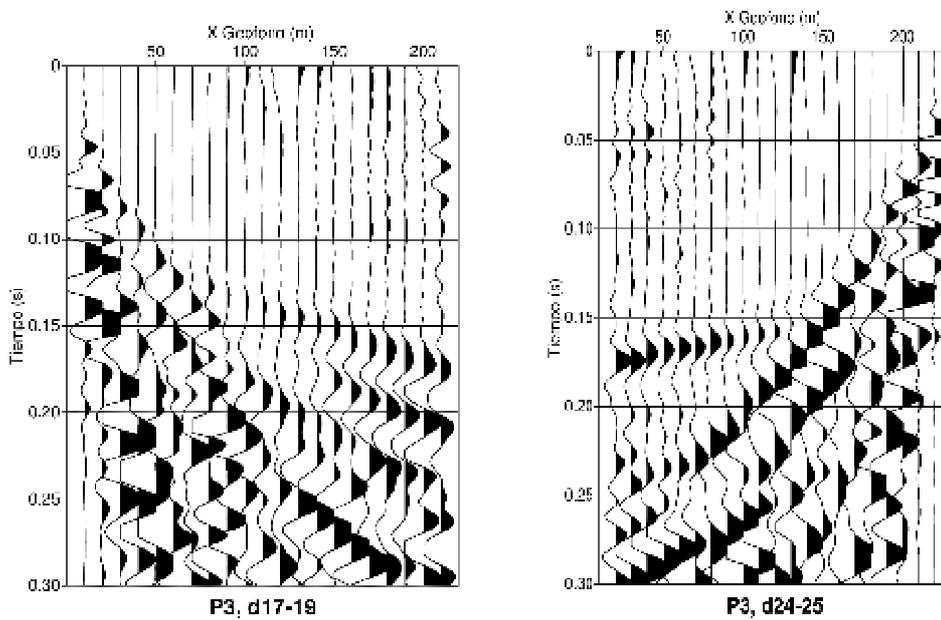


Figura N°33: Perfil sísmico N°2. P3,d17-19: disparo directo sur. P3,d24-25: disparo reverso norte

8.4 Resultados:

A continuación se entregan las curvas camino-tiempo, junto con los perfiles y las ecuaciones usadas en la determinación de los parámetros:

Pendiente onda directa = $1/V_1$, la cual se promedia de las curvas camino – tiempo para los disparos directo y reverso

Cálculo de θ (ángulo incidente onda directa que corresponde al ángulo crítico), ω es el manto de la interfaz:

$1/V_d$ = pendiente refractada “down slope”

$1/V_u$ = pendiente refractada “up slope”

$$\frac{1}{V_d} = \frac{\text{sen}(\theta + \omega)}{V_1}, \frac{1}{V_u} = \frac{\text{sen}(\theta - \omega)}{V_1}$$

De esto se concluye que:

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\arcsen\left(\frac{V_1}{V_d}\right) + \arcsen\left(\frac{V_1}{V_u}\right) \right)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\arcsen\left(\frac{V_1}{V_d}\right) - \arcsen\left(\frac{V_1}{V_u}\right) \right)$$

$$V_2 = \frac{V_1}{\text{sen}\theta}$$

$$h_0 = \frac{z_d}{\cos \omega}, h_{230} = \frac{z_u}{\cos \omega}$$

con h_0 el espesor de la capa en el punto de disparo directo y h_{230} la altura en el punto de disparo reverso

A continuación, se muestran las curvas camino tiempo y los perfiles de las mediciones:

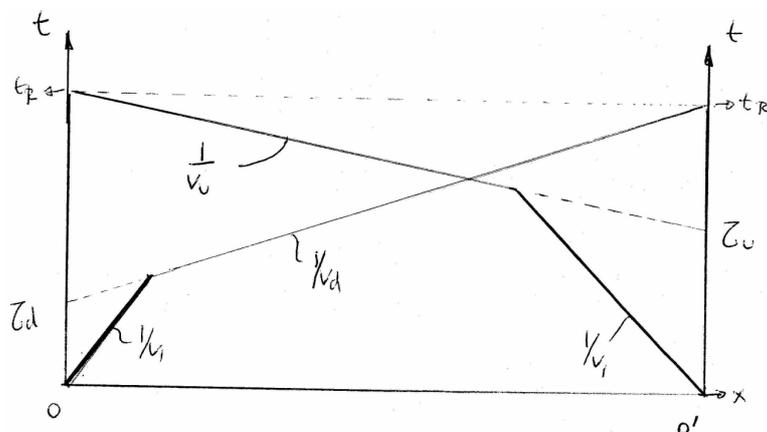


Figura N°34 – Ejemplo de curvas camino tiempo para una capa inclinada

PERFIL 1 - CHICUREO

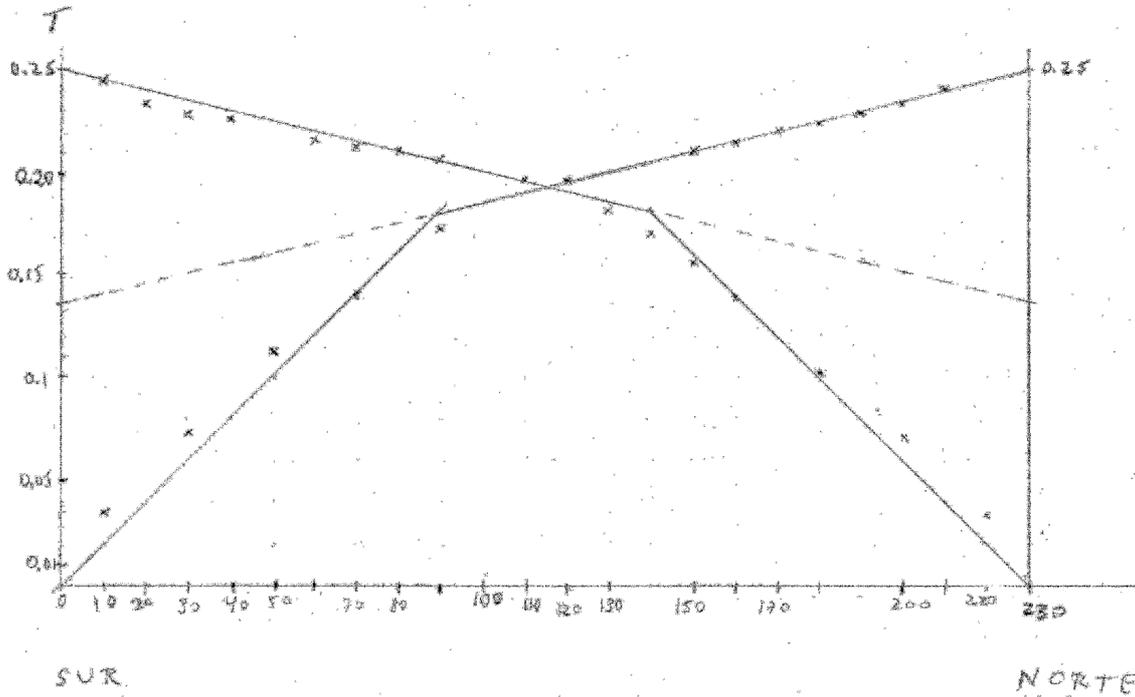
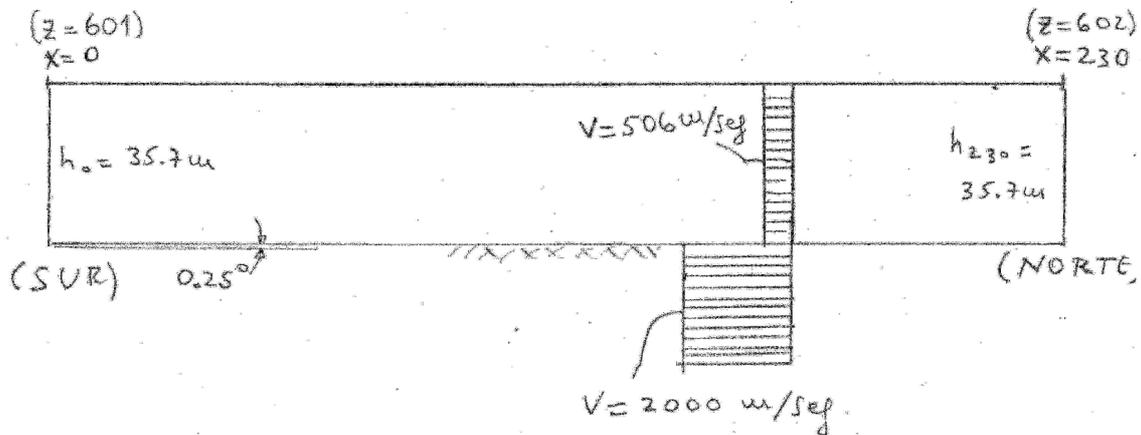


Figura N°35: Curvas camino tiempo del perfil sísmico N°1

PERFIL 1 - CHICUREO



$w = \text{inclinación interfaz} = 0.25^\circ$

Escala: $10\text{mm} = 1\text{cm}$

Figura N°36: Interpretación del perfil sísmico N°1

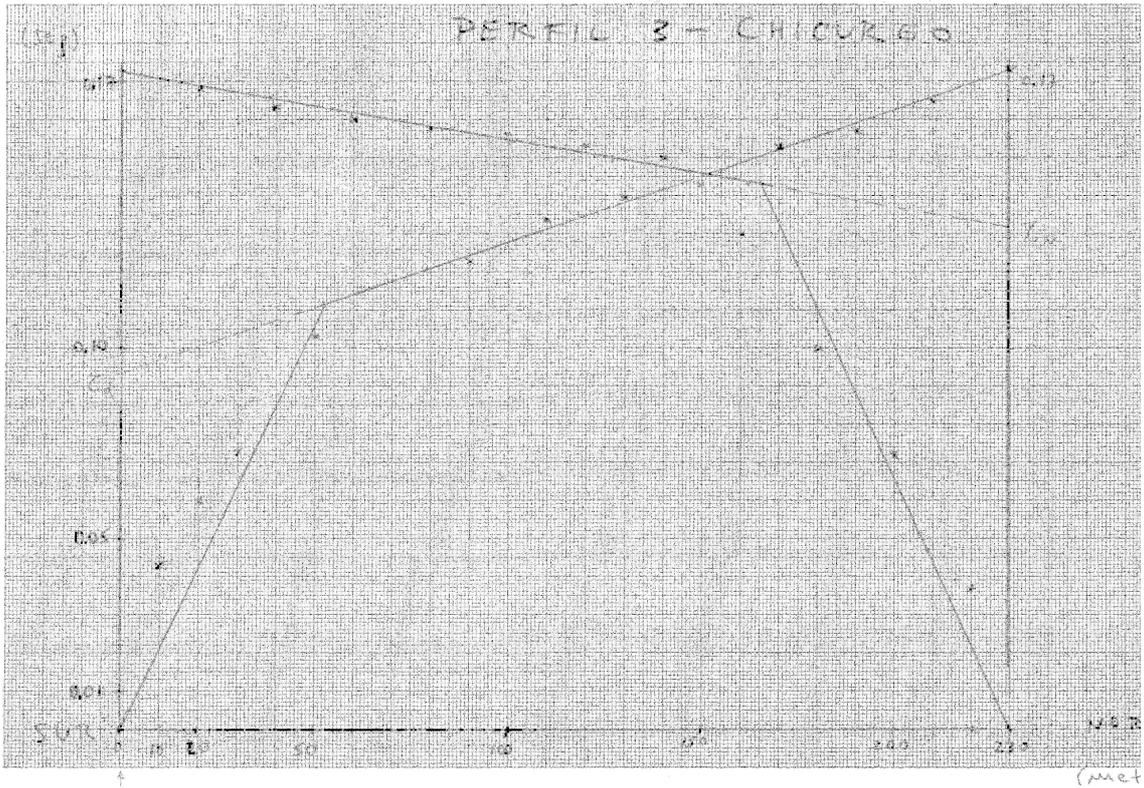


Figura N°37: Curvas camino tiempo del perfil sísmico N°3

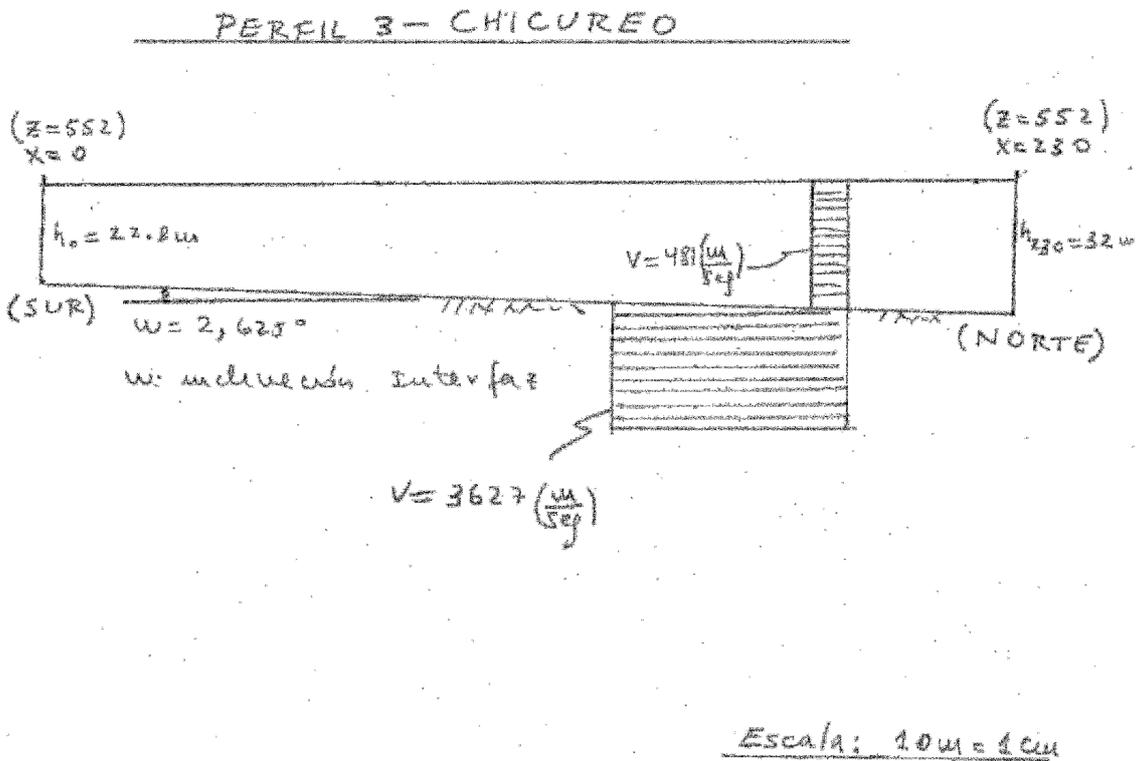


Figura N°38: Interpretación del perfil sísmico N°3

8.5 Interpretación de los resultados:

Modelo Perfil 1:

En este caso se tiene un modelo de dos capas, en la que la velocidad en la primera capa estaría indicando sedimentos. En la interfaz entre la primera y segunda capa la velocidad aumenta a casi cuatro veces (2000 m/seg.) sobre el valor de la primera capa. El valor de la velocidad de onda en la segunda capa estaría indicando un basamento rocoso fracturado².

Modelo Perfil 3:

Al igual que en el modelo del Perfil 1, tenemos un modelo de dos capas; aquí se observan distintas velocidades en cada capa, siendo la velocidad en la primera capa similar a la del perfil 1. Sin embargo en este caso la velocidad de onda en la segunda capa es superior a la del perfil 1 (3627 m/seg.). Por lo tanto podría tratarse del basamento rocoso menos fracturado que en el caso del perfil 1.

Como fuente de error en la obtención de los datos para los gráficos camino –tiempo se menciona que la traza de la onda directa en el punto de disparo no corresponde a un tiempo igual a 0. Por lo tanto se debe ajustar las curvas camino-tiempo.

² De acuerdo al libro "Ingeniería de suelos en las vías terrestres" de Rico et al., las velocidades de 2000 y 3600 m/s corresponden a granito poco fracturado o andesita y riolita muy fracturada.

Conclusiones:

Los métodos geofísicos utilizados durante el terreno nos entregan una imagen tanto general, como detallada de la zona en estudio. La utilidad de los métodos sísmico y gravimétrico va por el lado de obtener una imagen regional de la zona, específicamente respecto a sus dimensiones. De acuerdo a los datos ya entregados, las zonas analizadas corresponden a cuencas con un relleno sedimentario de distinto espesor, con un contraste de densidad de 0.3 gr/cc respecto al basamento, de poco manto y con un contacto discordante sobre el basamento. El espesor promedio varía entre los 200 y 400 metros, cosa que varía debido al nivel cero elegido para las distintas anomalías gravimétricas. Los datos sísmicos indican que la capa superficial es de algunas decenas de metros, seguido por un basamento andesítico fracturado.³

Como se explicó anteriormente, el método magnético no funcionó adecuadamente debido a la presencia de muchos objetos metálicos y cables, por lo que su uso fue más para conocer su funcionamiento, que para entregar información de calidad para el objeto de nuestro estudio.

En una escala más pequeña y acorde con el objetivo de realizar un estudio hidrogeológico, los métodos eléctricos y electromagnéticos son los que entregan una mayor información. Al comparar los valores existentes entre ellos, se ve que existen diferencias considerables entre ellos, siendo la fundamental la penetración y la resolución de cada uno. El Ohmmapper tiene buena resolución para unos pocos metros, el SEV entrega información general con una resolución intermedia y el TEM tiene una muy buena resolución y alta penetración. Teniendo estos datos en cuenta y la magnitud del estudio, los datos del SEV entregan información de mayor detalle, debido a que el TEM fue utilizado con un modelo muy general de ajuste de capas y a bajas frecuencias. Sin embargo, corrobora la información del SEV, respecto a la presencia de capas de poca resistividad producto de la presencia de agua o de una posible napa freática producto del fracturamiento de la roca. Esta capa se encontraría entre los 30 y 40 metros aproximadamente bajo la superficie.

Sin embargo, es necesaria la realización de pozos de manera de confirmar la presencia de agua en el subsuelo.

³ Esto de acuerdo a observaciones geológicas hechas en la zona de la cuesta de Chacabuco, que se correlaciona con la zona de estudio.