

GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SALAR DE ATACAMA

INFORME FINAL

**REALIZADO POR:
GEODATOS SAIC**

S.I.T. N° 368

Santiago, octubre 2015



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

**Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña**

**Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia**

**Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Miguel Ángel Caro**

GODATOS SAIC

**Jefe Proyecto
Geofísico Sénior Sr. Juan Carlos Parra E.**

ÍNDICE DE MATERIAS

1.	Introducción.....	9
2.	Trabajo en Terreno.....	11
2.1	Magnetotelúrico (MT).....	13
2.1.1	Instrumental MT	13
2.1.2	Medición MT	13
2.2	Transiente Electromagnético (TEM).....	15
2.2.1	Instrumental y Medición TEM	15
2.3	Gravimetría	16
2.3.1	Mediciones Gravimétricas	16
2.3.2	Instrumental Gravimétrico	17
3	Descripción Métodos Geofísicos Empleados.....	20
3.1	Método Magnetotelúrico (MT)	20
3.2	Método Transiente Electromagnético (TEM)	21
3.3	Método Gravimetría	22
4.	Reducción y Proceso de Datos.....	23
4.1	Datos MT.....	23
4.2	Datos TEM.....	24
4.3	Datos Gravimétricos.....	26
5.	Modelos.....	28
5.1	Modelamiento MT 2D.....	28
5.1.1	Secciones de Resistividad.....	29
5.1.2	Secciones de Interpretación.....	29
5.2	Modelamiento TEM	30
5.2.1	Secciones de Resistividad.....	30
5.2.2	Secciones de Interpretación.....	31
5.3	Modelamiento Gravimétrico 2D	34
6.	Antecedentes Considerados.....	35
6.1	Estudio Geofísico Año 2014.....	35
6.2	Información Geológica	36
7.	Resultados	39
7.1	Resultados MT.....	40
7.2	Resultados TEM.....	41

7.3	Resultados Gravimetría	41
8.	Conclusiones.....	43
	BIBLIOGRAFIA.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

ANEXO

- Figura 1** Ubicación General Área de Estudio.
Figura 2 Planta de Ubicación de Estaciones MT, TEM y GRAVIMETRÍA, Estudios 2014 y 2015, sobre Imagen Google Earth.

ANEXO 1 Estudio MT-TEM-Grav 2015

Magnetotelúrico (MT):

- Figura MT-L2** Sección Modelo 2D, Perfil MT-L2
Figura I-MT-L2 Sección de Interpretación MT, Perfil MT-L2
Figura MT-L3 Sección Modelo 2D, perfil MT-L3
Figura I-MT-L3 Sección de Interpretación MT, Perfil MT-L3
Figura MT-L4 Sección Modelo 2D, perfil MT-L4
Figura I-MT-L4 Sección de Interpretación MT, Perfil MT-L4
Figura MT-L5 Sección Modelo 2D, perfil MT-L5
Figura I-MT-L5 Sección de Interpretación MT, Perfil MT-L5
Figura MT-L6 Sección Modelo 2D, perfil MT-L6
Figura I-MT-L6 Sección de Interpretación MT, Perfil MT-L6
Figura MT-L7 Sección Modelo 2D, perfil MT-L7
Figura I-MT-L7 Sección de Interpretación MT, Perfil MT-L7
Figura MT-L8 Sección Modelo 2D, perfil MT-L8
Figura I-MT-L8 Sección de Interpretación MT, Perfil MT-L8
Figura MT-L11 Sección Modelo 2D, Perfil MT-L11
Figura I-MT-L11 Sección de Interpretación MT, Perfil MT-L11
Fig. MT-L2-L1 Sección MT Perfil unión L2 (2015) y L1 (2014)

Transiente Electromagnético (TEM):

- Figura T-2** Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L2
Figura T-2s Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L2
Figura I-T-2 Sección de Interpretación TEM, Perfil L2
Figura T-3 Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L3
Figura T-3s Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L3
Figura I-T-3 Sección de Interpretación TEM, Perfil L3

Figura T-4	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L4
Figura T-4s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L4
Figura I-T-4	Sección de Interpretación TEM, Perfil L4
Figura T-5	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L5
Figura T-5s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L5
Figura I-T-5	Sección de Interpretación TEM, Perfil L5
Figura T-6	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L6
Figura T-6s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L6
Figura I-T-6	Sección de Interpretación TEM, Perfil T6
Figura T-7	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L7
Figura T-7s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L7
Figura I-T-7	Sección de Interpretación TEM, Perfil L7
Figura T-8	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L8
Figura T-8s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L8
Figura I-T-8	Sección de Interpretación TEM, Perfil L8
Figura T-9	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L9
Figura T-9s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L9
Figura I-T-9	Sección de Interpretación TEM, Perfil L9
Figura T-11	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L11
Figura T-11s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L11
Figura I-T-11	Sección de Interpretación TEM, Perfil L11

Gravimetría:

Figura LG.1	Modelo Cuenca, Perfil LG1
Figura LG.2	Modelo Cuenca, Perfil LG2

ANEXO 2: Reproceso Estudio MT-TEM 2014

Magnetotelúrico (MT) 2014:

Figura MT-L1	Sección Modelo 2D, Perfil MT-L1
Figura I-MT-L1	Sección de Interpretación MT, Perfil MT-L1
Figura MT-T1	Sección Modelo 2D, Perfil MT-T1
Figura I-MT-T1	Sección de Interpretación MT, Perfil MT-T1
Figura MT-T2	Sección Modelo 2D, perfil MT-T2
Figura I-MT-T2	Sección de Interpretación MT, Perfil MT-T2

Figura MT-T3	Sección Modelo 2D, perfil MT-T3
Figura I-MT-T3	Sección de Interpretación MT, Perfil MT-T3
Figura MT-T4	Sección Modelo 2D, perfil MT-T4
Figura I-MT-T4	Sección de Interpretación MT, Perfil MT-T4

Transiente Electromagnético (TEM) 2014:

Figura L1	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil L1
Figura L1-s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil L1
Figura I-L1	Sección de Interpretación TEM, Perfil L1
Figura T1	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil T1
Figura T1-s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil T1
Figura I-T1	Sección de Interpretación TEM, Perfil T1
Figura T2	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil T2
Figura T2-s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil T2
Figura I-T2	Sección de Interpretación TEM, Perfil T2
Figura T3	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil T3
Figura T3-s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil T3
Figura I-T3	Sección de Interpretación TEM, Perfil T3
Figura T4	Sección de Modelos 1D, Modelo de Capas, Perfil T4
Figura T4-s	Sección de Modelos 1D, Modelo Suavizado, Perfil T4
Figura I-T4	Sección de Interpretación TEM, Perfil T4

ANEXO A:	Coordenadas y Cotas Estaciones Geofísicas, MT, TEM y Gravimetría.
ANEXO B:	Sondeos individuales MT, modelos unidimensionales (1D).
ANEXO C1:	Sondeos individuales TEM, curvas transiente procesadas. <i>(Digital en CD)</i>
ANEXO C2:	Tablas con Resultados de la Inversión 1D "Layered model" y coordenadas y elevación de Estaciones TEM. <i>(Digital en CD)</i> .
ANEXO D:	Tablas de Gravedad Bouguer Final, Elevación y Profundidad al Basamento.
ANEXO E:	Fotografías del Área de Estudio.
ANEXO F1:	Coordenadas y Cotas Estaciones Geofísicas, MT y TEM.
ANEXO F2:	Sondeos Individuales MT, Modelos Unidimensionales (1D).

ANEXO F3: Sondeos individuales TEM, curvas transiente crudas y procesadas. (*Digital en CD*)

ANEXO F4: Tablas con Resultados de la Inversión 1D "Layered model" y coordenadas y elevación de Estaciones TEM.

1 INTRODUCCION

A requerimiento de **La Dirección General de Aguas**, Geodatos SAIC realizó un Estudio Geofísico empleando los métodos Magnetotelúrico (MT), Transiente Electromagnético TEM y Gravimetría en la Zona de la **Cuenca del Salar de Atacama**, Región de Antofagasta, Chile (**Figura 1, Anexo**), en el marco del Proyecto **“Estudio Geofísico para la Modelación Hidrogeológica del Salar de Atacama”** correspondiente a la resolución DGA exenta N°2040 del 07 de Julio de 2015.

El presente estudio pretende incorporar nueva información geofísica con el fin de avanzar en un correcto modelo conceptual que permita en el futuro establecer las bases para la generación de una herramienta de gestión que permita planificar el uso de los recursos hídricos en armonía con la naturaleza, los intereses de los usuarios y de la sociedad en su conjunto. Si bien la zona de estudio corresponde a toda la cuenca, se priorizará los sectores nororiental, oriental, suroriental, además del Salar mismo.

El objetivo general del estudio es el levantamiento de información geofísica para la modelación hidrogeológica de los acuíferos de la Cuenca del Salar de Atacama.

Como objetivos específicos se definen los siguientes:

- a.- Definir parte de la geometría del acuífero del Salar de Atacama.
- b.- Identificar diferentes estratos de suelo.
- c.- Detección de sentido y profundidad de flujos de agua subterránea desde cuencas laterales y al interior del Salar.
- d.- Aumentar el número de registros de puntos topográficos de la superficie del suelo con precisión centimétrica.

Para cumplir con los objetivos planteados se ha considerado efectuar un levantamiento geofísico que incluye los métodos de Gravimetría, Transiente Electromagnético “TEM” y

Magnetotelúrico "MT". Con este propósito se midieron una serie de perfiles longitudinales y transversales que contienen estaciones de medida para cada método geofísico.

El Proyecto comprendió la adquisición de 286 Estaciones Geofísicas, 51 de ellas corresponden al método Magnetotelúrico "MT", 90 al método Transiente Electromagnético "TEM" y 145 al método de Gravimetría. Las estaciones de MT incluyen en forma coincidente a su posición una estación TEM, las restantes estaciones TEM se ubican casi coincidentes a Estaciones Gravimétricas del Perfil LG2. Las estaciones MT-TEM se distribuyeron en 8 perfiles, 6 transversales de aproximadamente 6 kilómetros (Perfiles 3 a 8), mientras que los perfiles longitudinales (denominados 11 (Sector Sur) y 2 (Sector Norte)) se extienden por más de 40 kilómetros.

El espaciamiento de estaciones MT-TEM fue de 1.5 y 2 kilómetros para los perfiles longitudinales y de 1.5 kilómetros en los perfiles transversales a la cuenca. Respecto de las Estaciones Gravimétricas y las restantes TEM, la separación aproximada fue de 1 km.

2 TRABAJO DE TERRENO

Los datos Magnetotelúricos (MT), Transiente Electromagnético (TEM) y de Gravimetría fueron medidos por 2 grupos de terreno a cargo de técnicos especializados, movilizados en vehículos 4x4 doble cabina, sistemas de localización GPS y equipo de apoyo general. La campaña de terreno se realizó entre el 22 de Julio y el 17 de agosto del 2015. Esta presentó complejidades de acceso respecto a permisos solicitados y condiciones de terreno. Se debió realizar gestiones de ingreso con Comunidades del Sector, Observatorio Alma, SQM Salar. Debido a la existencia de letreros con información de "campos minados" en áreas donde se planificaron mediciones geofísicas, fue necesario recurrir a la autoridad militar para planificar y efectuar las mediciones en lugares seguros. Algunas mediciones en el interior del Salar debieron realizarse mediante accesos a pie, debido a la imposibilidad de ingreso de vehículos (Costra salina), en otros sectores se construyó puentes debido a presencia de terrenos muy blandos (**Anexo E**).

La **Figura 2 (Anexo)**, muestra la ubicación de las Estaciones MT, TEM y de Gravimetría medidas.

Las coordenadas y elevaciones de las estaciones fueron replanteadas con instrumental GPS diferencial, en Sistema Coordinado **DATUM WGS84, método de Proyección UTM Huso Zona 19S**. El **Anexo A** presenta las coordenadas y cotas de cada sondeo MT, TEM y Gravimetría.

2.1 Magnetoteléurico (MT)

2.1.1 Instrumental MT

El equipo empleado para la adquisición de datos de MT es un sistema fabricado por Metronix Geophysics compuesto por los siguientes elementos:

Tres unidades de Adquisición modelo ADU-07e que usa un sistema de adquisición dual para alta y baja frecuencia que no producen interferencias entre sí. Las especificaciones de la unidad de adquisición ADU-07E son las siguientes:

Sincronización por GPS: +/- 30 nanosegundos.

3 Bandas de Frecuencia: DC-512 Hz, DC-16 KHz AND 1 Hz- 250 KHz.

Número de canales: 10.

Convertidor Análogo Digital: 24 bit.

Máxima razón de muestreo: 1000 muestras/segundo.

Dual LF/HF 24 bit A/D por canal.

Auto-Ganancia para campo eléctrico.

Peso: 7 kg.

Nueve sensores magnéticos modelo MFS-07e, que utiliza un diseño de retroalimentación que permite una respuesta plana y estable en amplitud y fase para un rango amplio de frecuencias. Las especificaciones de los sensores magnéticos son las siguientes:

Rango de Frecuencia: 0.0001 to 50 KHz.

Bandas de Frecuencia: 0.01 Hz- 500 Hz; 10 Hz – 50 KHz.

Sensibilidad (región plana): 1.6 V/nT (standard).

Tubo de 70 cm de largo, 7,5 cm de diámetro y peso 6.1 Kg.

Quince electrodos no polarizables de la marca Wolf Chemical Ltd. tipo WL, los cuales están diseñados para que no sean afectados por los potenciales causados por la acción electroquímica entre los electrodos y el suelo. Las especificaciones son las siguientes:

Electrodo No Polarizable tipo WL:

Composición: Pb-PbCl

Resistencia de contacto interna: 50-3000 Ohm

Superficie de la base: 27 cm².

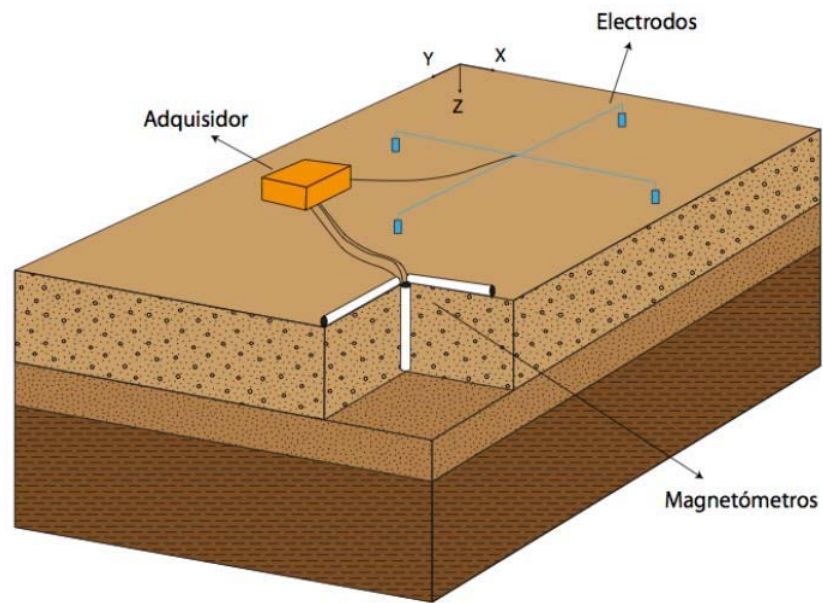
Dimensiones: 64 mm de diámetro y 114 mm de alto.

Peso: 0.7 kg.

2.1.2 Medición MT

Las estaciones MT se distribuyeron en 8 perfiles (L2 a L8 y L11) como se muestra en la **Figura 2 (Anexo)**, siendo localizadas y replanteadas en terreno de acuerdo a la disponibilidad de acceso y al espacio para la instalación del equipo.

La disposición de la estación de MT consistió, en primer lugar, en alinear dos dipolos eléctricos en direcciones perpendiculares (E_x y E_y) con una longitud de 100 metros en cada uno de los dipolos y con una orientación para E_x de N-S y E_y de E-O. Dichos dipolos permiten medir la variación del campo eléctrico a partir de la diferencia de potencial entre ellos como se muestra en el **Esquema 1**. En cuanto al campo magnético, se dispusieron dos de las tres bobinas magnéticas horizontales y ortogonales entre sí (H_x y H_y) en dirección N-S y E-O, mientras que la tercera bobina se situó en posición vertical (H_z), de manera que se obtiene una medición de las fluctuaciones del campo magnético en las tres direcciones espaciales.



Esquema 1: Distribución de una estación magnetotelúrica.

Los sensores se conectan al dispositivo de control y adquisición (Esquema 1), el cual realiza las medidas en varias bandas con diferentes frecuencias de muestreo, siendo en concreto para este proyecto la siguiente relación de frecuencias medidas:

Frecuencia	Duración
16384 Hz	5 minutos
4096 Hz	10 minutos
512 Hz	20 minutos
128 Hz	3 horas

La calidad de los datos fue monitoreada durante la adquisición mediante la visualización de la curva de resistividad aparente, fase y coherencia entre canales. Las series de tiempo fueron grabadas en el formato Metronix para cada estación, para eventuales procesos posteriores. El periodo de adquisición fue determinado en terreno en base al

análisis de los datos y fue de al menos 12 horas con lo cual se da seguridad de una alta calidad de los datos en toda la banda de adquisición.

Dentro de las 24 horas desde la adquisición, los datos fueron transferidos del equipo MT a un PC para luego ser editados y procesados por Geodatos. Los datos procesados son incluidos en CD-ROM y en formato EDI (una estación por archivo EDI).

2.2. Transiente Electromagnético (TEM)

2.2.1 Instrumental y Medición TEM

Las estaciones TEM se distribuyeron en 9 perfiles (L2 a L9 y L11), siendo los perfiles L2 a L8 y L11 coincidentes con las Estaciones MT y las estaciones TEM del perfil L9 casi coincidentes con parte del perfil Gravimétrico LG2, como se muestra en la **Figura 2 (Anexo)**, siendo localizadas y replanteadas en terreno de acuerdo a la disponibilidad de acceso y al espacio para la instalación del equipo.

El personal de campo estuvo formado por un operador geofísico especializado y un ayudante técnico. El equipo de apoyo logístico está formado por 1 vehículo 4WD doble tracción e instrumental GPS. El equipo de apoyo técnico incluye computadora portátil y radios de intercomunicación. El equipo geofísico de adquisición de datos de Transiente Electromagnético es marca Zonge Engineering and Research Organization, compuesto por:

- Receptor digital multipropósito modelo GDP-32
- Transmisor TEM modelo ZT-30, con baterías como fuente de energía
- Computador de campo y equipo de apoyo

El receptor funciona en un intervalo de frecuencias desde DC hasta 8 KHz y puede ser utilizado para métodos eléctricos y electromagnéticos como TEM, NanoTEM, IP (en los

dominios del tiempo y de la frecuencia), CSAMT, AMT, etc. El instrumento posee filtros digitales controlados por software. Los datos son grabados en la memoria de estado sólido del receptor y transferibles electrónicamente a computadoras.

Las mediciones de TEM se obtuvieron con la configuración "Coincident Loop", en la cual la antena transmisora es una espira cuadrada de cable aislado desplegada sobre la superficie del terreno. La antena receptora corresponde a otra espira de dimensiones similares con el cable tendido paralelamente al anterior. Los parámetros de medición fueron los siguientes:

Frecuencias de repetición	Intervalo binario de 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 y 32 Hz
Configuración	'Coincident Loop'
Antena receptora	Espira cuadrada de 200 m x 200 m
Antena transmisora	Espira cuadrada de 200 m x 200 m
Variable medida	Componente vertical del campo magnético

Las estaciones TEM fueron ejecutadas en correspondencia con las localizaciones MT, verificándose la calidad de los datos mediante el uso de voltajes normalizados.

2.3 GRAVIMETRÍA

2.3.1 Mediciones Gravimétricas

En el área de trabajo se estableció una base general de terreno llamada Base 0, la que sirvió para amarrar diariamente todas las estaciones medidas en la zona de estudio. La estación base se ubicó en un lugar estable de fácil acceso y libre de ruido cultural. Cada día se efectuaron mediciones en terreno las cuales fueron registradas para evaluación de repetitividad.

El posicionamiento de la red de bases gravimétricas se realizó mediante GPS diferencial en modo RTK y Pos-proceso, con una precisión de +/- 1 cm en la vertical y +/- 10 cm en la horizontal.

La **Figura 2 (Anexo)**, corresponde a la ubicación de las estaciones medidas. Algunas estaciones TEM se usarán de referencia en el modelamiento gravimétrico, como antecedente de la profundidad al basamento, si así aplicase.

Cada estación gravimétrica fue medida usando un método de "loop" ligado a una estación base que es registrada al inicio y al final del "loop". El error de cierre se distribuyó proporcionalmente al intervalo de tiempo entre lecturas.

Las mediciones gravimétricas fueron efectuadas de acuerdo al siguiente procedimiento:

- El gravímetro es nivelado en la estación de medición al menos un minuto antes de tomar la medida con el fin de permitir su estabilización.
- Cada medición gravimétrica fue repetida al menos una vez. En caso de exceder la precisión del equipo por causa de ruido cultural, se repitió la medida las veces que fue necesario para obtener un buen promedio.
- En casos en que la estación planificada estaba ubicada en un lugar de topografía inaccesible, el operador procedió a re-localizarla en el lugar más cercano de acceso aceptable.

Las coordenadas de las estaciones gravimétricas levantadas mediante GPS diferencial se presentan en el **Anexo A**, y corresponden a la proyección WGS84 Huso 19S.

2.3.2 Instrumental Gravimétrico

El instrumental usado para las mediciones gravimétricas y topográficas es el siguiente:

- Gravímetro Scintrex CG-5 Digital Automatizado

- GPS Doble Frecuencia CHC X9000 RTK, estación base y un móvil (error

Horizontal: 10 milímetros ± 1 ppm, Vertical: 20 milímetros ± 1 ppminiciación
10 segundos)

- GPS de navegación en tiempo real Garmin 45 (error ~ 30 m)

Gravímetro Scintrex modelo CG-5

Este gravímetro del tipo "microgravity meter" tiene una resolución geodésica de 0.001mgals. Estos instrumentos están basados en un microprocesador que tiene un rango de operación de 8000 mgal sin necesidad de inicializar. Las mediciones gravimétricas son corregidas automáticamente por mareas y errores de nivelación y son almacenadas en una memoria sólida que puede ser extraída por un computador o directamente hacia una impresora.

Especificaciones CG-5:

Tipo de sensor:	Cuarzo fundido con NULO electrostático
Resolución de lectura:	1 microgal (0.001 mgal)
Desviación Standard:	menor que 10 microgal
Rango de Operación:	8,000 mgal sin reseteo
Deriva residual estática:	menos que 0.02 mgal por día
Compensación por nivelación automática:	+/- 200 arcseg.
Correcciones automáticas:	Marea, Nivelación, Temperatura, Ruidos
Memoria:	Flash Technology 12 Mbytes 200.000 lecturas.
Temperaturas de Operación:	-40°C a +45°C
Salida digital:	2 RS-232 puertas seriales y 1 USB puerta de 12 Mbits/sec.

Sistema de posicionamiento de GPS diferencial.

Se usó un sistema de posicionamiento GPS CHC doble frecuencia que consta de dos receptores, de los cuales uno es usado como estación base en la modalidad RTK acompañada de una radio base de 20W Huace DL5 y otro GPS receptor como estación de campo en modalidad RTK.

Características GPS CHC

- 72 canales paralelos
- L1, L2, L2c, Glonass.

- 1 RS232 serial port y 1 high-speed USB
- Comunicación vía Bluetooth integrado
- Comunicación vía radio modem (2) internalRx: 410/430 - 430/450 - 450/470 MHz
- Protocolo RTCM2.1, RTCM2.3, RTCM3.0, CMR, CMR+ input, NMEA0183 y GSOF
- Salida RINEX and HCN

Especificaciones de Precisión RTK

- Horizontal: 10mm+1ppm
- Vertical: 20mm+1ppm RMS
- Tiempo de iniciación 10s

Especificaciones de Precisión Post Proceso

- Horizontal: 5mm+1ppm RMS
- Vertical: 10mm+2ppm RMS

3 DESCRIPCIÓN MÉTODOS GEOFÍSICOS EMPLEADOS

3.1 Método Magnetotelúrico (MT)

El método Magnetotelúrico (MT) es una técnica de exploración geofísica perteneciente al campo del electromagnetismo que permite obtener información de las propiedades geoelectricas del subsuelo mediante las fluctuaciones temporales del campo electromagnético generadas en la ionosfera, debido principalmente a la actividad solar. La fuente de esos campos electromagnéticos proviene principalmente de dos fenómenos naturales diferentes, dependiendo de la frecuencia de la señal.

- Frecuencias > 1 Hz: los campos son originados por tormentas eléctricas y magnéticas entre la ionosfera y la superficie de la Tierra.
- Frecuencias < 1 Hz: los campos son originados por la interacción entre el viento solar y la magnetosfera terrestre.

Cuando esta energía llega a la superficie, conocida como campo primario, penetra en la Tierra en forma de onda plana y con incidencia vertical, de manera que la Tierra actúa como conductor, induciendo un campo eléctrico (o corriente telúrica) y un campo magnético secundarios.

La conductividad eléctrica del subsuelo y la frecuencia son las responsables de la distribución de los campos, ya que los medios conductores dificultan más la penetración que los medios resistivos. Además, como las frecuencias bajas se atenúan a mayor profundidad que las frecuencias altas, las medidas para diferentes frecuencias darán información de la distribución de resistividades en profundidad. Esta distribución es determinada por la relación entre las componentes de la variación de los campos eléctrico y magnético medidos.

3.2 Método Transiente Electromagnético (TEM)

La técnica de TEM (Transiente Electromagnético) es un método electromagnético de prospección geofísica que funciona en el dominio del tiempo. Operacionalmente, consiste en la aplicación de una corriente eléctrica variable a una espira de cable aislado desplegado con una forma usualmente cuadrada sobre el terreno. Esta corriente genera un campo magnético (principal) que induce corrientes de conducción en el subsuelo. Luego se interrumpe la corriente y se mide el campo magnético (secundario) generado por las corrientes de conducción, el cual posee una respuesta transiente, es decir, dependiente del tiempo. Este transiente magnético se mide como voltaje inducido en un loop receptor o bobina receptora.

Las corrientes inducidas en el subsuelo se distribuyen en profundidad de acuerdo al mecanismo físico de difusión y el comportamiento que muestran depende de las resistividades, tamaños y formas de las estructuras geoelectricas subsuperficiales. En zonas de bajas resistividades, la difusión de las corrientes es lenta, con una amplitud inicial pequeña, a diferencia de zonas con altas resistividades, donde se tiene una amplitud inicial mayor, pero el decaimiento es más rápido. El análisis numérico de la curva transiente, o de decaimiento en el tiempo del voltaje registrado, permite inferir información cuantitativa acerca de los parámetros geoelectricos del subsuelo. Es una técnica inductiva, es decir, evita el problema que enfrentan los métodos galvánicos al intentar inyectar corriente directamente al subsuelo en terrenos de muy alta resistencia de contacto; por ejemplo, costras salinas secas superficiales muy resistivas (como el caliche), característico en ciertos lugares del norte chileno.

La curva transiente se mide en una serie de intervalos de tiempo (ventanas) de pequeña duración (fracciones de segundo), obteniéndose así datos de resistividad aparente la cual está directamente relacionada al decaimiento de la curva transiente dentro de los intervalos de registro. El equipo de medición genera una corriente alterna de tipo positiva-

nula-negativa-nula, registrando el transiente durante los intervalos de corriente transmisora nula.

El método TEM emplea frecuencias de repetición que usualmente fluctúan entre 0.5 y 32 Hz, con paso binario. En general, el método electromagnético TEM es muy apropiado para detectar y visualizar capas conductoras; sin embargo, no tiene buena capacidad para detectar estructuras resistivas subyacentes a estratos conductores.

En general, los métodos electromagnéticos como el TEM son muy apropiados para detectar y visualizar capas conductoras; sin embargo, no tienen buena capacidad para detectar estructuras resistivas subyacentes a estratos conductores.

3.3 Método Gravimetría

El método gravimétrico consiste en la medición de las variaciones laterales de la atracción gravitatoria del suelo que están asociadas a cambios en la densidad cercanos a la superficie. La teoría del método gravimétrico se basa en la ley de Newton que define la atracción mutua entre partículas en función de su masa y su separación.

Una de las aplicaciones más usadas corresponde a la medición de la distribución de la atracción de gravedad en función del espesor de un relleno sedimentario sobre una roca basal donde el origen de las variaciones está relacionada con el contraste de densidad entre ambos medios.

4 REDUCCION Y PROCESO DE DATOS

4.1 Datos MT

El proceso de los datos de terreno consistió en: a) análisis espectral de las series de tiempo mediante *FFT* o *DFT*, b) remoción de los efectos instrumentales del receptor y las bobinas, c) edición y proceso robusto de múltiples segmentos de series de tiempo usando el algoritmo de reducción de ruido más adecuado a la calidad de los datos obtenidos, d) cálculo, representación y almacenamiento de los datos procesados en formato EDI. Este proceso se realizó mediante el software Mapproos del proveedor de equipos Metronix.

Los parámetros de calidad usados consideran datos con valores de coherencia > 0.75 en los canales eléctricos para al menos el 70% del ancho de banda investigado. Al menos el 70% de las curvas de resistividad aparente y fase deben ser repetibles con una tolerancia máxima del 5%. Las curvas de suavizado (a obtenerse mediante algoritmo D^+) deben ser bien definidas tanto para la resistividad como para la fase sobre todo el rango de frecuencia investigado.

Para el proceso de inversión se utiliza el software WinGLink de Geosystem, el cual permite la definición de perfiles, inversiones unidimensionales e inversiones bidimensionales.

El primer paso en la modelación consiste en efectuar una Inversión Unidimensional de las curvas de Resistividad obtenidas para cada Estación de MT, lo que se presenta en el **Anexo B** para las 51 Estaciones MT medidas.

Las curvas de resistividad aparente fueron corregidas por distorsión galvánica o *static shift* usando la curva de resistividad del TEM. Dicho fenómeno se produce por la existencia de heterogeneidades superficiales que presentan cambios importantes respecto a la resistividad circundante. Debido a esto, se puede llegar a producir una acumulación de cargas en las discontinuidades que distorsionan los campos eléctricos, dando lugar a una alteración de la respuesta magnetoteléfica. Es por ello que es conveniente usar un método de fuente artificial como el TEM, considerándose representativo de las primeras capas del modelo MT.

4.2 Datos TEM

El proceso de los datos de terreno incluye: a) análisis de calidad de los datos examinando las curvas de decaimiento del voltaje y de la resistividad aparente para cada estación, b) generación de gráficos para revisión, c) selección de la frecuencia de mejor respuesta y preparación de información al procedimiento de inversión. Estos pasos son realizados mediante los sistemas IX1D, Oasis Montaj y programas propios de Geodatos.

La interpretación geofísica de los datos de TEM incluye la inversión de las curvas de resistividad aparente para obtener las resistividades intrínsecas y los espesores de los estratos del subsuelo, asumiendo un modelo estratificado o 1D de la resistividad sub-superficial. Este modelo 1D se considera válido en la vecindad de cada estación. La medición de sondeos TEM a lo largo de un perfil permite detectar cambios laterales en los parámetros geoelectricos, lo que conduce a una visión 2D del subsuelo en cada perfil, esto es, a una sección geoelectrica. La posible distorsión de los datos observada en una inversión 1D es también indicativa de la presencia de efectos 2D y aún 3D bajo la estación.

El software usado para las inversiones es el sistema interactivo IX1D de Interpex, el cual posee dos métodos de inversión. Con el procedimiento 'smooth model' el programa

realiza una inversión semi-automática de los datos entregando una variación relativamente continua de la resistividad, definida en un gran número de capas delgadas. Utiliza para ello el método de Occam, con el cual se obtienen modelos que prescinden de características que no son esenciales en el ajuste de las observaciones.

Con el procedimiento 'layered model' el sistema permite variar interactivamente un modelo de un número suficiente de capas para ajustar apropiadamente la curva teórica a la observada, mediante el método de Marquardt ('ridge regression'). En general, el 'modelo smooth' de resistividad puede ser visto como una versión suavizada del 'modelo layered'.

Comparativamente, el primero puede contener más detalles de resistividad, mientras que el segundo puede dar mayor precisión de las profundidades de las interfaces de los estratos.

El **Anexo C1** muestra en forma gráfica los resultados de la inversión 1D de las 90 estaciones TEM. En la ventana izquierda se presentan los datos observados y la curva teórica del modelo, y en la ventana derecha el modelo de resistividad. Esta representación es muy importante para el control de calidad de los datos registrados y de los resultados de las inversiones realizadas.

El **Anexo C2** muestra una tabla con los resultados de la inversión 1D "Layered Model", indicando la resistividad, profundidad, elevación y espesor de las diferentes unidades geoelectricas y las coordenadas y elevación de todas las estaciones TEM.

4.3 Datos Gravimétricos

La información gravimétrica ha sido procesada en forma estándar. Cabe hacer notar que el gravímetro Scintrex CG-5 corrige en forma automática la deriva instrumental y los efectos de marea, sin embargo, por tratarse de instrumentos nuevos y sometido además a fuertes vibraciones, se ha considerado necesario efectuar cierres diarios sobre un punto de referencia. Los cierres diarios corresponden a un ejercicio de control de calidad que se realiza debido a los efectos en las lecturas diarias asociadas a la deriva instrumental (tendencia de las lecturas) o evidenciada en la diferencia en la lectura de gravedad tomada en una misma coordenada en dos instantes de tiempo, al inicio de la jornada laboral y al término de ésta, con el objeto de corregir las lecturas de ese día. La diferencia en la lectura es compensada sobre el universo de estaciones diarias en función del tiempo. En general las lecturas de cierre son inferiores a 0.02 [mgal], lo cual es un valor razonable para las exigencias del tipo de trabajo efectuado.

Las correcciones aplicadas para la obtención de la Anomalía de Bouguer (Δg), son las siguientes:

$$\Delta g = G_{obs} + \Delta_{atmos} - G_{teo} - \Delta_{boug} + \Delta_{a_libre} + \Delta_{topo}$$

- * G_{obs} : **Gravedad observada.**
- * Δ_{atmos} : corrección atmosférica = $0.87 \exp(-0.116 h^{1.047})$
h: altura sobre el nivel del mar
- * G_{teo} : **Gravedad teórica** [mGal] (Formula correspondiente al World Geodetic

System de 1984, WGS84) = $G_0 (1+C_1 \sin^2 \alpha)/(1-C_2 \sin^2 \alpha)^{1/2}$

$$G_0 = 978032.67714$$

$$C_1 = 0.00193185138639$$

$$C_2 = 0.00669437999013$$

$$\alpha = \text{latitud}$$

* Δ_{boug} : **Corrección de Bouguer** = $2\pi G\rho h$
[mGal].

G: constante de gravitación universal = 0.00667 (densidades en [gr/cc]
y alturas en [m])

ρ : densidad media de la corteza (2.6 gr/cc).

Δ_{a_libre} : **Corrección de aire libre** = 0.3086 h

* Δ_{topo} : **Corrección topográfica** (ver estimación en párrafo siguiente)

La corrección de Bouguer considera el efecto que se origina sobre la gravedad, la masa interpuesta entre el nivel del mar y la estación considerada, en la hipótesis de que esta masa es una placa horizontal, infinitamente extendida de espesor "h" y densidad ρ .

La corrección de aire libre hace referencia al hecho de que la aceleración de gravedad disminuye según el cuadrado de la distancia al centro de la Tierra, por lo tanto, se debe corregir la lectura gravimétrica por encontrarse a un nivel distinto al de referencia.

La corrección topográfica fue calculada para cada estación de acuerdo al procedimiento contenido en el software Oasis Montaj para lo cual se usó un modelo digital de terreno, obtenido de la topografía pública S.R.T.M. (**Shuttle Radar Topography Mission**), con resolución espacial de 90.2 m.

Aplicando las correcciones a los valores de gravedad observados, se obtienen las anomalías de Bouguer. Una vez obtenido el campo regional, se pueden discriminar y separar las anomalías de diferentes longitudes de ondas, restando este campo al de Anomalías de Bouguer, obteniendo lo que se denomina Anomalía Residual, y representa el efecto de las masas más superficiales.

El algoritmo que se utiliza en este software está basado en los métodos descritos por Kane (1962) y Nagy (1966). Esta corrección topográfica ha sido agregada a la Anomalía Simple de Bouguer, obteniendo así, la Anomalía de Bouguer.

5 MODELOS

5.1 Modelamiento MT 2D

La inversión 2D se llevó a cabo en el módulo *2D Inversion* de WinGLink, el cual usa la solución de Rodi y Mackie (2001) mediante gradientes no lineales conjugados.

Se definió en primera instancia una malla de celdas en un espacio semi-infinito y con una profundidad de hasta 10.000 m.b.n.m. A dicha malla se le fue asignado un valor de 100 Ohm-m para que el modelo pudiese partir de un espacio homogéneo y teniendo en cuenta las irregularidades de la topografía.

Se consideró un nivel base de error o *error floor* de un 5% para resistividad aparente y de un 5% para la fase, estableciendo que el mínimo error posible que puede tener un dato en el proceso de la inversión es de un 5%.

Los parámetros propios de la inversión suavizada (*smooth inversion*) usados en el presente proyecto fueron los siguientes:

Parámetro de regularización τ	4
Suavizado horizontal α	1
Suavizado vertical β	2

Estos parámetros controlan el grado de compensación entre el desajuste de los datos y el suavizado del modelo en el caso del parámetro de regularización, mientras que el suavizado horizontal y vertical procuran un grado de uniformidad al modelo con una combinación óptima de ambos parámetros.

5.1.1 Secciones de Resistividad

El resultado de las inversiones 2D son secciones de Resistividad en función de la profundidad. Las **figuras MT-L2 a MT-L8 y MT-11 (Anexo 1)** corresponden a las secciones de Resistividad obtenidas para los perfiles **MT-L2 a MT-L8 y MT-11**.

Los datos obtenidos a partir del software de inversión fueron re-grillados dentro del propio software para evitar geometrías anómalas debido al tamaño de celda. Además, la zonificación de resistividades usadas para la representación del modelo es en escala logarítmica dado el gran rango de valores existentes en los modelos, con valores de 10-10.000 Ohm-m].

5.1.2 Secciones de Interpretación

A partir de los modelos de resistividad 2D de MT procedentes de la inversión bidimensional de los datos se va a realizar la interpretación de los perfiles y la correlación entre ellos. En cada uno de los modelos se incluye una leyenda con las unidades interpretadas y la descripción breve de cada una de ellas (**Figuras I-MT-L2 a I-MT-L11 (Anexo 1)**).

Estos gráficos se realizaron mediante el software de dibujo Autocad, distinguiéndose los diferentes estratos por distintos colores y tramados. Las secciones se presentan a escala 1:50.000 para el perfil MT-L2, dada su longitud, y de 1:25.000 para los perfiles MT-L3 a MT-L11.

En el área de estudio se han definido las siguientes unidades geoelectricas:

- a) Unidad Resistiva Somera:** Esta unidad somera presenta espesores de aproximadamente hasta 1000 metros, siendo éste variable debido a las diferentes estructuras detectadas y que producen una mayor acomodación del relleno y por

lo tanto, un incremento de la potencia. Se caracteriza por valores de resistividad de 1 a 3000 [Ohm-m], con un promedio de 200 a 300 [Ohm-m]. Esta unidad ha sido interpretada como el Relleno Sedimentario de la Cuenca del Salar de Atacama. Esta unidad se compondría por sedimentos de origen aluvial-coluvial así como diferentes tramos de depósitos volcanosedimentarios. Dentro de esta unidad se distinguen núcleos de menor resistividad que se encuentran presentes en todas las secciones, bien de manera aislada o relacionadas con estructuras tectónicas. Estos núcleos pudieran ser interpretados como zonas de paso preferente de flujos subterráneos.

b) Unidad Resistiva Profunda: Se encuentra subyaciendo a la unidad resistiva somera, apreciándose en todas las secciones de estudio. Presenta una morfología heterogénea e irregular debido a la presencia de estructuras tectónicas que provocarían su hundimiento o alzamiento. Se caracteriza por valores de resistividad superiores a 3000 [Ohm-m], interpretándose como el Basamento Impermeable de la Cuenca del Salar del Atacama.

5.2 Modelamiento TEM

5.2.1 Secciones de Resistividad

Sobre la base de las figuras que contienen los modelos de resistividad a lo largo de cada perfil, se realizó una diferenciación de estratos geoelectricos dando continuidad a los modelos de sondeos adyacentes. Las figuras denominadas **T-2 a T-9 y T-11 (Anexo 1)** muestran las secciones de resistividad de los perfiles TEM, obtenidas a partir de los modelos 1D, utilizando el sistema de inversión *'layered model'* de las estaciones, en una representación de grillas de color.

En forma análoga, las figuras **T-2s a T-9s y T-11s (Anexo 1)**, muestran las secciones de resistividad, obtenidas a partir de los modelos 1D, utilizando el sistema de inversión "*smooth model*". La zonificación de colores para la resistividad eléctrica está en escala logarítmica (para dar cuenta de la gran variación de resistividad detectada), con valores aproximados entre 1 - 1000 [Ohm-m], que abarcan apropiadamente las unidades detectadas.

5.2.2 Secciones de Interpretación

Tomando como base las secciones de resistividad, generadas a partir del sistema de inversión modelo de capas, se realizará una correlación entre rangos de resistividad, con estratos de diferentes características hidrogeológicas. En cada una de las secciones de interpretación de los perfiles se incluye una leyenda con la descripción de las unidades geoelectricas determinadas para este proyecto (**Figuras I_T-2 a I_T-9 e I_T-11 (Anexo 1)**).

Cabe señalar que los perfiles L2 al L8 y L11 se ubican preferentemente fuera del salar, sólo en algunas estaciones se observa la incidencia del salar, estación 51 del perfil 1, estaciones 78, 79 y 80 del perfil L3 y estación 82 del perfil L4, descartando estas estaciones, en este sector es posible correlacionar rangos de resistividad con variaciones litológicas.

La mayor parte del perfil L9 se ubica dentro del salar (estaciones 300 a 327) en este lugar, es posible correlacionar rangos de resistividad con estratos saturados con diferente concentración de sales.

Estos gráficos se realizaron mediante el software de dibujo *Autocad*, distinguiéndose los diferentes estratos por distintos colores y tramados. Las secciones se presentan a escala vertical 1:10000 y horizontal 1:50000, es decir, con un factor de exageración vertical igual a 5.

En el área de estudio, se ha definido las siguientes unidades geoelectricas:

- a) **Gravas y arenas secas:** Estrato superficial que se observa en los perfiles L2 al L8 y L11 y en el extremo del perfil L9, con resistividad comprendida entre 50 y 700 ohm-m y espesor variable entre 21 y 167 m.
- b) **Gravas y arenas saturadas:** Unidad geoelectrica con resistividad variable entre 15 y 40 ohm-m, y espesor comprendido entre 49 y 422 m (estación 55 perfil L11 donde no se detectó el piso de este estrato), se observa en los perfiles L2, L3, L6, L7, L8 y L11, bajo la unidad superficial y en algunos casos bajo un estrato arcilloso. Esta unidad correspondería al acuífero principal.
- c) **Gravas arcillosas saturadas:** Unidad geoelectrica con resistividad variable de 8 a 15 ohm-m y espesor de 37 a 400 m (estación 51 perfil L11), correspondería a un acuífero de menor permeabilidad y/o saturado con aguas de mayor salinidad, que explicaría la disminución de la resistividad.
- d) **Arcillas:** Unidad conductora con valores de resistividad menores que 10 ohm-m de baja permeabilidad, se detectó en algunos casos como una capa delgada bajo los sedimentos superficiales (perfil L8), en forma de lentes (perfil L11) y como una capa con mayor potencia 280 m (perfil L7).
- e) **Salmueras:** Unidad muy conductora (> 1 ohm-m) asociada a estratos saturados con soluciones salinas de alta concentración, se detecta principalmente en el extremo Este del perfil L9, estaciones 300 a 339. Entre las estaciones 300 a 327 se ubica bajo la costra salina con un espesor variable entre 50 y 70 m, en algunas estaciones no se detectó el piso de esta unidad (estaciones 320, 321, 323, 325, 326 y 327). Desde la estación 328 a 330 el techo de esta unidad se profundiza hacia el Este.

- f) **Salmueras con arcillas:** Unidad detectada en la estación 51 del perfil L11 (extremo sur), estación 78 perfil L3 y en la estación 82 del perfil L4, (extremo Este en ambos perfiles) con valores de resistividad variables entre 1.3 y 6 ohm-m y espesores de 45 a 118 m.
- g) **Sedimentos compactos:** Unidad geoelectrica de baja permeabilidad, con resistividad de 51 y 70 ohm-m y potencia de 114 y 140 m, detectada en las estaciones 80 y 81 del perfil L3.
- h) **Depósitos volcánicos:** Unidad geoelectrica con resistividad mayor que 60 ohm-m se detecta a una profundidad variable entre 120 y 337 m (perfil L2).
- i) **Depósitos volcans sedimentarios:** Se detecta en la mayoría de los casos como última capa, con valores de resistividad comprendidos entre 8 y 40 ohm-m, y espesor de 21 a 155 m, preferentemente bajo los depósitos volcánicos.
- j) **Costra salina:** Unidad superficial que se observa en el perfil L9, entre las estaciones 300 a 327, con espesor que fluctúa entre 3 y 14 m, y resistividad variable entre 1.5 y 13 ohm-m, se detecta sobreyaciendo las salmueras.
- k) **Gravas, arenas, limos y sedimentos salinos:** Unidad geoelectrica detectada en el perfil L9 bajo las salmueras, entre las estaciones 300 a 324, presenta valores de resistividad de 1.6 a 25 ohm-m. El piso de este estrato no se detectó probablemente por la pérdida de señal, debido a, presencia de las salmueras, que al ser tan conductoras no permiten que la señal se profundice. Es posible que el techo de esta unidad presente un estrato de poco espesor que contenga cristales de carbonato de calcio, que actúa como una barrera impermeable que impide que las salmueras se infiltren.

5.3 Modelamiento Gravimétrico 2D

El modelamiento gravimétrico se orienta a determinar la interface entre el relleno y el basamento bajo la cuenca. De acuerdo a la información geológica regional disponible, el relleno está conformado principalmente por depósitos aluviales, coluviales y fluviales de edad Pleistoceno-Holoceno y depósitos piroclásticos, principalmente riolíticos de edad Pleistoceno que se ha denominado Formación Tambores – San Pedro. El basamento que se ha considerado para este caso corresponde al grupo Purilactis con edades desde Eoceno al Cretácico compuesto por rocas volcánicas y sedimentarias

La interface relleno / basamento se ha determinado con el modelamiento de las líneas gravimétricas mediante el sistema Model_Vision_Pro, considerando un modelo 2D de cuencas formado por unidades de densidades homogéneas, que representan los depósitos del relleno y la roca basal. En los 2 perfiles (**Figuras LG.1 y LG.2 (Anexo 1)**) existe amarre a roca en los extremos lo que fija el regional, quedando libre la variable contraste de densidad (que hace referencia a un valor relativo entre la diferencia en el comportamiento de lo que se asocia a relleno y basamento). En **Anexo D** se presenta las Tablas con Gravedad Bouguer Final, Elevación y Profundidad al Basamento de ambos perfiles.

6 ANTECEDENTES CONSIDERADOS

Como antecedentes a considerar, se pueden indicar los siguientes:

6.1 Estudio Geofísico Año 2014

La Dirección General de Aguas a través de la Empresa ICASS Ltda realizó un Estudio Geofísico en el Sector Este del Salar de Atacama, cuyo Informe Final corresponde a:

ICASS LTDA-DGA
Estudio Geofísico mediante MT-TEM
Proyecto Borde Oriental Cuenca Salar de Atacama
Región de Antofagasta, Chile
Noviembre, 2014
GEODATOS SAIC

Este estudio forma parte de las gestiones que la Dirección General de Aguas (DGA), del MOP, lleva a cabo para caracterizar flujos subterráneos en el Salar de Atacama, permitiendo determinar la dinámica existente en dicha cuenca.

El proyecto comprendió la adquisición de 100 estaciones geofísicas, 50 de ellas corresponden al método MT mientras que la otra mitad son TEM de Loop 200x200m, situándose prácticamente coincidentes espacialmente, distribuyéndose en 5 perfiles, 4 transversales de aproximadamente 6 km (T1 a T3) y 8 km el T4, mientras que el perfil longitudinal (denominado L1), se extiende por más de 40 km. El espaciamiento de estaciones fue de 2 km para el perfil longitudinal y de 1 km en los perfiles transversales a la cuenca, tal como se presenta en la figura 2, en la que se incluye la ubicación de estaciones de los estudios realizados en ambos años, 2014 y 2015.

Los datos de terreno de este Estudio Geofísico fueron reprocesados y sus resultados se presentan en el **Anexo 2: Reproceso Estudio MT-TEM 2014**, donde se ha incluido lo siguiente:

MT: Secciones de Resistividad (Figs. MT-*) e Interpretación (Figs. I-MT-*)

TEM: Secciones de Resistividad de capas (Figs. *) y suavizadas (Figs. *-s), e Interpretación (Figs. I-*).

En los **Anexos F1 a F4** se presentan las tablas de coordenadas y cotas, Modelos 1D MT, Modelos 1D TEM y Tablas con Resultados de la Inversión 1D de TEM.

La interpretación de los resultados TEM del año 2014, se realizó considerando las unidades reconocidas en el año 2015. Para la Interpretación de los resultados MT se ha mantenido las unidades del año 2014.

6.2 Información Geológica

Se recopiló información geológica correspondiente al área del Margen Este de la Cuenca del Salar de Atacama con el objeto de realizar un cruce espacial y analizar la correlación entre la respuesta geoeléctrica con la geología local.

Los estudios realizados en la zona y que se centran en la arquitectura de la cuenca se basan en la sísmica de reflexión medida por ENAP y sus compañías asociadas en la década de 1980 con el objetivo de exploración de hidrocarburos. Para el presente estudio se hizo uso de artículos científicos en los cuales se realiza un análisis detallado de dicha sísmica, así como su interpretación en términos geológicos. Además, para poder conocer la secuencia de sedimentos que componen el relleno de la cuenca se tomó como guía la columna estratigráfica simplificada del pozo Toconao-1 (**Fig.Geol-1**).

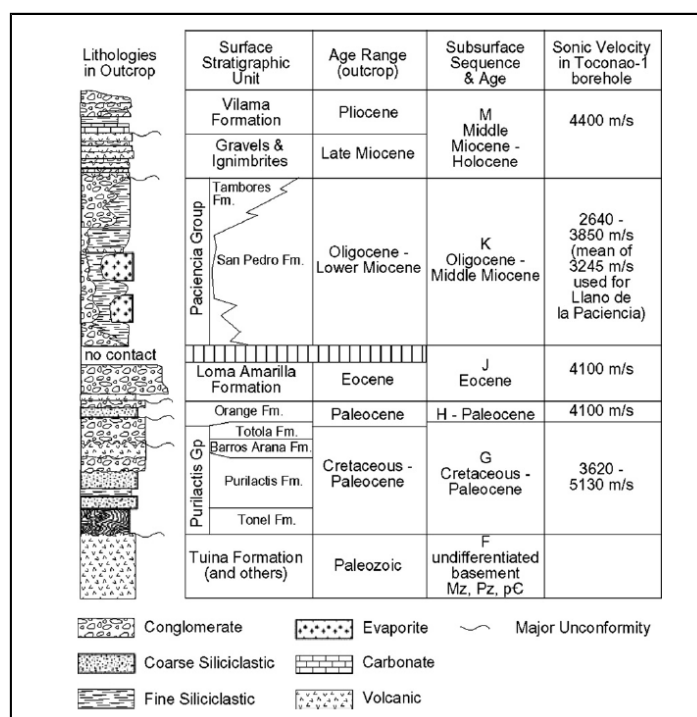


Fig. Geol-1. Estratigrafía del pozo Toconao-1 y su correlación con las velocidades sísmicas de cada unidad. (Extraído de T.E. Jordan et al., 2007. Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar Atacama Basin, northern Chile. *Journal of South America Earth Sciences* 23, p. 122-146).

La **Fig. Geol-2** muestra una imagen del relleno de la cuenca basada en la información sísmica entregada por la sección Sísmica G 16-A de la publicación: "The Salar de Atacama Basin: a Subsiding Block within the Western Edge of the Altiplano Puna Plateau" (Klauss et al).

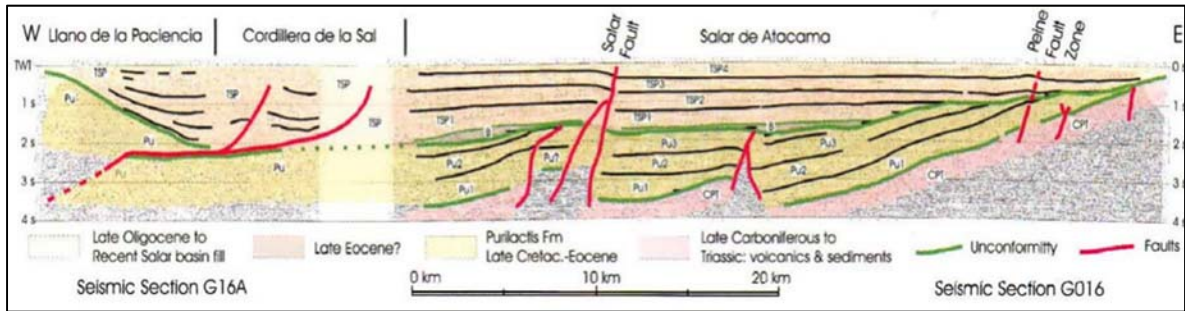


Fig. Geol-2. Interpretación de las líneas sísmicas G016 y G16A realizadas por ENAP en el Salar de Atacama. (Extraído de K.J. Reutter et al., 2006. Chapter 14 -The Salar de Atacama Basin: a Subsiding Block within the Western Edge of the Altiplano-Puna Plateau. The Andes - Active Subduction Orogeny, Part III, p. 303-325)

7 RESULTADOS

El trabajo efectuado ha permitido definir diferentes unidades que han sido interpretadas geológicamente en base a criterios geofísicos. El método TEM ha permitido alcanzar una profundidad de investigación óptima con información válida hasta 300 m para caracterizar la zona de estudio mientras que el método MT ha permitido alcanzar los 3000 m.b.n.m., lo que corresponde a una profundidad de aproximadamente 5.500 m. bajo el terreno.

Con el objetivo específico de realizar una exploración hidrogeológica que estuviese orientada a la determinación del nivel freático, así como la profundidad hasta el basamento impermeable, se pidió realizar un estudio geofísico para determinar las características geoelectricas en profundidad que permitan obtener información de la ubicación de posibles sectores que constituyan pasos preferenciales de flujos subterráneos desde el Este hacia la cuenca del Salar de Atacama.

Para este objetivo, se confeccionó una disposición de estaciones MT y TEM que permitiesen una caracterización en detalle del borde Este de la cuenca, midiéndose un total de 51 Estaciones MT y TEM con un trazado sub-coincidente entre métodos geofísicos. Además, se midió 2 perfiles Gravimétricos que cruzan el Salar de Oeste a Este que contienen un total de 145 estaciones, el Perfil Gravimétrico LG2 es parcialmente coincidente al Perfil TEM L9. Estos resultados fueron complementados con los del año 2014 realizados en el Sector Este del Salar el que consistió en la medición de 100 estaciones geofísicas, donde 50 estaciones corresponden a MT y 50 estaciones a TEM, situándose prácticamente coincidentes espacialmente.

7.1 Resultados MT

Los resultados de la presente campaña de MT muestran una correlación lateral con los resultados observados en el Estudio 2014.

Se ha determinado una interpretación similar a la del trabajo anterior (2014) con tres unidades fundamentales que caracterizan el Salar. Una unidad sedimentaria con depósitos aluviales y volcans sedimentarios de edades recientes.

La segunda unidad comprende núcleos de **sedimentos saturados** de resistividades menores a 300 Ohm-m, estando algunos de estos núcleos relacionados mediante estructuras tectónicas, además de estar relacionados con cambios de resistividad a diferentes porosidades.

El basamento observado en esta oportunidad presenta mayores variaciones de resistividad destacándose la alta resistividad indicada por el perfil MT-L11, lo cual estaría asociado a la formación CAS (Triásico inferior - Medio) constituida por Tobas, Brechas volcánicas y Lavas andesíticas brechizadas, con intercalaciones de areniscas de grano grueso.

Situación distinta a lo resultante en el perfil MT-L2 del norte el cual muestra resistividades similares a las encontradas en el sector Sur. En este caso se observa una estratificación relacionada con Ignimbritas y Cenizas intercaladas durante el Pleistoceno.

Se realizaron dos perfiles que cruzaron el perfil L1 del estudio anterior, encontrándose bolsones de sedimentos saturados similares a los detectados en la campaña del 2014. Se debe precisar que se trata de un sector altamente contaminado por ruido electromagnético asociado a la explotación de pozos de aguas y por lo tanto las interpretaciones están sujetas a estas condiciones.

Es importante resaltar que en estas interpretaciones los valores de resistividad no son uniformes en toda la cuenca. Sin embargo, cabe destacar que los resultados asociados

a los cruces de los perfiles presentan una buena correlación en cuanto a valores de resistividad, así como de espesor de unidades.

Se puede decir entonces que la potencia de los Sedimentos en el borde Este del Salar es de aproximadamente 1 kilómetro, resultado similar a lo encontrado por el modelo gravimétrico. Sería deseable hacer perfiles perpendiculares al perfil MT-L11 para ver y comparar las profundidades de la roca basal al internarse hacia el Salar.

7.2 Resultados TEM

Los resultados de TEM, interpretados de acuerdo a las variaciones de resistividad tanto lateral como vertical, muestran un comportamiento de resistividades decrecientes en profundidad. Estas zonas de resistividad mínima han sido interpretadas como salmueras que se corresponderían a la cuña salina existente en los márgenes del Salar de Atacama.

Además, las variaciones laterales de los valores de resistividad presentes en todas las secciones TEM dentro de las unidades interpretadas como sedimentos finos saturados y sedimentos gruesos saturados pudieran ser debido a cambios de granulometría. Estos cambios podrían deberse a la heterogeneidad dentro de las formaciones aluviales propias de la interdigitación de diferentes conos aluviales con aportes de flujos sedimentarios variables según el área.

7.3 Resultados Gravimetría

Los dos perfiles gravimétricos medidos atraviesan la cuenca desde afloramientos cercanos ubicados en el Este del Salar hasta afloramientos al Oeste de la cordillera de La Sal. La interpretación gravimétrica considera un relleno de la cuenca compuesto por depósitos sedimentarios de edad Pleistoceno-Holoceno y depósitos piroclásticos, principalmente riolíticos de edad Pleistoceno que se ha denominado **Formación Tambores – San Pedro**. Por su parte, el basamento que se ha considerado para este

caso corresponde a rocas del **grupo Purilactis** con edades desde Eoceno al Cretácico compuesto por rocas volcánicas y sedimentarias que sobreyacen mediante contacto discordante un basamento volcánico sedimentario de edad carbonífera a triásica.

Las **figuras LG.1 y LG.2 (Anexo 1)** muestran la forma del contacto entre el relleno y el basamento constituido por Purilactis donde se alcanza profundidades superiores a 3.000 metros.

Para la interpretación gravimétrica se usó un campo regional de tendencia recta, lo que puede ser una fuente de error en el cálculo de la forma y profundidad del basamento, ya que las variaciones de densidad en el basamento pre-triásico bajo la cuenca, puede generar cambios en el campo regional que no han sido considerados.

Basados en la información aportada por el sondaje Toconao como también de las velocidades de ondas sísmicas, se determinó un contraste de densidad entre relleno y basamento de $0,2 \text{ gr/cm}^3$. Por su parte, se modeló la cordillera de la sal donde se consideró un contraste de densidad de $0,33 \text{ gr/cm}^3$ entre los sedimentos de la cordillera de la sal y el basamento de la formación Purilactis.

8 CONCLUSIONES

Se ha dado cumplimiento a la etapa final del estudio geofísico en el Salar de Atacama para la Dirección de Aguas. En este caso el estudio comprendió tres métodos Geofísicos: Transiente Electromagnético TEM, Magnetotelúrico MT y de Gravimetría.

Mediante el TEM se ha podido definir variaciones de resistividad que pueden estar relacionadas con cambios laterales de granulometría en el relleno sedimentario, como también por la presencia de salmueras que en la parte Este del salar se presentan como Cuña Salina.

Los resultados obtenidos mediante el MT y el TEM se condicen con los resultados mostrados del Estudio 2014, pudiéndose generar un modelo continuo a lo largo de prácticamente todo el borde Este de la Cuenca del Salar de Atacama. Asimismo, y con el fin de representar esa continuidad, se generó la figura MT-L2-L1, la cual contiene la unión de los modelos MT-L2 del presente estudio y el modelo MT-L1 del Estudio 2014. Dicha figura muestra cómo el espesor del relleno sedimentario reciente del borde del Salar presenta una potencia homogénea, con sectores en donde profundiza, ganando espesor, debido posiblemente a estructuras tectónicas que crean subsidencia.

En cuanto a los resultados de los métodos Magnetotelúrico y Gravimétrico, se ha determinado con éxito la profundidad al basamento, encontrándose en los perfiles gravimétricos la necesidad de caracterizar los sedimentos con dos unidades de diferente contraste de densidad respecto del basamento. Este requerimiento fue debido a la presencia de la Cordillera de la Sal, la cual presenta una densidad menor a la considerada como densidad promedio del relleno. Es por ello que el método gravimétrico, en el caso de los extremos Oeste de los perfiles, ha conseguido resolver satisfactoriamente la presencia de un cuerpo de diferente densidad con respecto a lo que lo rodea.

Se ha considerado la geología de la zona, en la que se manifiesta claramente que los sedimentos no son homogéneos y el basamento contiene distintas unidades geológicas, consideración importantísima para continuar con los estudios de la cuenca de este Salar.

Se debe mencionar que los resultados de Sísmica hechos en el Salar por la Empresa Nacional del Petróleo se encuentran en tiempo y no en profundidad, lo cual sería de vital importancia a la hora de calibrar los resultados de la geofísica.

BIBLIOGRAFIA

1. *T.E. Jordan et al., 2007. Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar Atacama Basin, northern Chile. Journal of South America Earth Sciences, 23, p. 122-146.*
2. *K.J. Reutter et al., 2006. Chapter 14 -The Salar de Atacama Basin: a Subsiding Block within the Western Edge of the Altiplano-Puna Plateau. The Andes - Active Subduction Orogeny, Part III, p. 303-325.*
3. *ICASS LTDA – DGA, Estudio Geofísico mediante MT-TEM Proyecto Borde Oriental Cuenca Salar de Atacama Región de Antofagasta, Chile, Noviembre, 2014.*