

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



Análisis interpretativo del recurso hídrico subterráneo utilizando el método transiente electromagnético en el dominio del tiempo en la cuenca del Río Limarí, IV Región de Coquimbo, Chile.

Rodrigo Alejandro Yáñez Vidal

Habilitación Profesional

para optar al Título Profesional de Geofísico

Enero 2017

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

Análisis interpretativo del recurso hídrico subterráneo utilizando el método transiente electromagnético en el dominio del tiempo en la cuenca del Río Limarí, IV Región de Coquimbo, Chile.

Rodrigo Alejandro Yáñez Vidal

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Profesor guía:

Dr. Arturo Belmonte-Pool Villanueva

Comisión:

Dr. Elías Ovalle - Dr. Arturo Belmonte-Pool - Dr. Matt Miller



Enero 2017

Dedicatoria

A mi familia

Por la paciencia, el esfuerzo, la confianza depositada en mi y por todo el apoyo incondicional a lo largo de estos años, sabemos que no fue fácil pero de ustedes aprendí que hay que dar la pelea, esta tesis se las dedico a ustedes. Los quiero!

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a **Carlos Toledo**, la persona que me abrió las puertas para que yo realice mi práctica profesional y posteriormente mi habilitación profesional, sin duda que fue algo muy provechoso para mi experiencia como futuro geofísico, agradezco también la paciencia cuando no entendía cosas, llamadas por algunas dudas y por los consejos cuando estuve perdido y también las salidas a terreno.

A mi **madre** por el constante apoyo a través de los años, por corregirme cuando no hacía lo correcto y por siempre darme mucho ánimo.

A mi profesor guía, **Arturo Belmonte** por dejar aventurarme en este el mundo de los métodos electromagnéticos y por siempre tener una muy buena disposición.

A **Bárbara Blanco** por todos los consejos, ayuda, paciencia y llamadas cuando tenía dudas.

A **Eric, Vale, Kellen, Franz** y **Ariel** por los buenos momentos que compartimos durante la universidad, cuando estaba en el liceo me decían que en la universidad uno no hace amigos, hoy día puedo decir que eso es mentira, en la universidad uno si hace amigos y de los buenos, ejemplo de esto son las personas que nombre anteriormente, compartimos mucho mas que los ramos, trabajos o carretes, de verdad muchas gracias por su amistad!.

A mi familia adoptiva durante estos dos últimos años, **Andrés** y **Fer**, agradecido de haberlos conocido y haber compartido bastantes momentos junto a ustedes.

Finalmente a todas las personas que tuve el agrado de conocer mientras permanecí en la ciudad de Concepción, gracias por hacer más ameno mi paso por esta ciudad.

Índice general

Lista de figuras	VI
Lista de tablas	VIII
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Metodología	3
1.5. Estructura de la tesis	3
2. Marco geográfico de referencia	4
2.1. Localización	4
2.2. Vías de comunicación	5
2.3. Servicios	5
2.4. Hidrografía	6
2.5. Precipitación	6
2.6. Clima	7
2.7. Vegetación	8
2.8. Temperatura	8
2.9. Suelo	8
3. Fundamentos teóricos	9
3.1. Teoría Electromagnética	9
3.1.1. Ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo	9
3.1.2. Las ecuaciones de onda	12
3.1.3. Condiciones de borde o frontera	15
3.1.4. Solución de las ecuaciones de onda	16
3.2. Métodos Electromagnéticos	18

3.2.1. Clasificación	18
3.2.2. Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo	19
3.2.3. Configuraciones geométricas de los sondeos TEM	25
3.2.4. Fuentes de error en los sondeos TEM	26
3.2.5. Ventajas y Desventajas	27
3.3. Resistividad eléctrica en las rocas	27
4. Marco Geológico	29
4.1. Geología de la cuenca Del Limarí	29
4.2. Unidades de Rocas	30
5. Exploración Geofísica	36
5.1. Parámetros	36
5.2. Zona de estudio	37
5.3. Adquisición de datos	37
5.4. Características del instrumento	38
5.4.1. Especificaciones técnicas	39
6. Resultados	41
6.1. Tratamiento de datos TEM	41
6.2. Resultados Modelo 1-D	42
6.3. Corte geoelectricos	45
6.3.0.1. Corte geoelectrico 1	45
6.3.0.2. Corte geoelectrico 2.1	47
6.3.0.3. Corte geoelectrico 2.2	48
6.3.0.4. Corte geoelectrico 2.3	49
6.3.0.5. Corte geoelectrico 3	50
7. Discusión	52
8. Conclusiones	54
8.1. Recomendaciones	55
9. Anexo	58
9.1. Anexo A	58
9.2. Anexo B	60
9.2.1. Localidad Barraza	60
9.2.2. Localida de La Isla	60
9.2.3. Localidad de Sol de las Praderas	61

- 9.2.4. Localidad de Valle Hermoso 62
- 9.2.5. Localidad Hinojo 65
- 9.2.6. Localidad de Guampulla 71
- 9.3. Anexo 3 72
- 9.4. Resultados Choapa 72

Índice de figuras

2.1. Área de estudio sondeos TEM.	4
2.2. Relieve IV región de Coquimbo.	5
2.3. Clima Regional [14].	7
3.1. Clasificación de los métodos electromagnéticos según su fuente.	18
3.2. Generación de campo electromagnético y eléctrico.	19
3.3. Gráfica de la forma de onda en el tiempo de medición. Extraído de [2]	20
3.4. Flujo de corriente en superficie y profundidad. Extraído de [1].	21
3.5. Representación básica de un circuito TEM . Modificado de [18].	22
3.6. Comportamiento de un conductor y comportamiento de la conductividad. Modificado de [10].	23
3.7. Campo magnético vertical y su derivada respecto al tiempo [18].	24
3.8. Ruido cultural.	26
3.9. Resistividad eléctrica para diferentes compuestos . Extraído de [12]	28
4.1. Mapa Geológico de la cuenca Del Limarí. Extraído de [4]	34
4.2. Simbología de 6.13. Extraído de [4]	35
5.1. Localización de sondeos TEM realizados en la Provincia de Limarí (Imagen obtenida de Google Earth).	37
5.2. Equipo utilizado en la realización de sondeos TEM.	39
5.3. Fotos de la campaña de adquisición de datos.	40
6.1. Imagen de planta para el sondeo TEM en la localidad de Barraza(Google Earth).	42
6.2. Modelo de resistividad para sondeo Barr1	42
6.3. Imagen de planta para el sondeo TEM en la localidad de La Isla(Google Earth).	43
6.4. Modelo de resistividad para sondeo CLO01	43
6.5. Imagen de planta para el sondeo TEM en la localidad de Sol de las Praderas(Google Earth).	44
6.6. Modelo de resistividad para sondeo SLP1	45
6.7. Imagen de planta para los sondeo TEM en la localidad de Guampulla(Google Earth).	46
6.8. Corte geoelectrico 1, localidad de Guampulla	46

6.9. Imagen de planta para los sondeo TEM en la localidad de El Hinojo(Google Earth).	47
6.10. Corte geoeléctrico 2.1, localidad de El Hinojo	48
6.11. Corte geoeléctrico 2.2, localidad de El Hinojo	49
6.12. Corte geoeléctrico 2.3, localidad de El Hinojo	50
6.13. Corte geoeléctrico 3, localidad de Valle Hermoso	50
6.14. Corte geoeléctrico 3, localidad de Valle Hermoso	51
9.1. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Barr1.	60
9.2. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para COL01.	61
9.3. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para SLP1.	61
9.4. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT1.	62
9.5. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT3.	62
9.6. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT5.	63
9.7. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT7.	63
9.8. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT9.	64
9.9. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6.	65
9.10. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-3.	65
9.11. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-5.	66
9.12. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-6.	67
9.13. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-7.	67
9.14. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-8.	68
9.15. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-9.	69
9.16. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-12.	70
9.17. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-13.	70
9.18. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Guam1.	71
9.19. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Guam3.	71
9.20. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Guam5.	72
9.21. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para AV6.	73
9.22. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para AV7.	73
9.23. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para AV8.	74
9.24. Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para AV9.	74

Índice de tablas

- 2.1. Registro de precipitación en la IV Región [3]. 6
- 5.1. Tabla de sondeos que fueron procesados en la Provincia de Limarí. 38
- 6.1. Interpretación sondeo Barr1 42
- 6.2. Interpretación sondeo CLO01 44
- 6.3. Interpretación sondeo SLP1 44
- 6.4. Hola. 45
- 9.1. Parámetros de adquisición, Provincia de Limarí. 58
- 9.2. Parámetros de adquisición, Provincia de Choapa. 59
- 9.3. Lista de puntos que fueron procesados en Provincia de Limarí. 59
- 9.4. Interpretación sondeo Barr1 60
- 9.5. Interpretación sondeo CLO01 60
- 9.6. Interpretación sondeo SLP1 61
- 9.7. Interpretación sondeo MAT1 62
- 9.8. Interpretación sondeo MAT3 62
- 9.9. Interpretación sondeo MAT5 63
- 9.10. Interpretación sondeo MAT7 63
- 9.11. Interpretación sondeo MAT9 64
- 9.12. Interpretación sondeo Hic6 65
- 9.13. Interpretación sondeo Hic6-3 66
- 9.14. Interpretación sondeo Hic6-5 66
- 9.15. Interpretación sondeo Hic6-6 67
- 9.16. Interpretación sondeo Hic6-7 68
- 9.17. Interpretación sondeo Hic6-8 68
- 9.18. Interpretación sondeo Hic6-9 69
- 9.19. Interpretación sondeo Hic6-12 70

9.20. Interpretación sondeo Hic6-13	70
9.21. Interpretación sondeo Huam1	71
9.22. Interpretación sondeo Huam3	71
9.23. Interpretación sondeo Huam5	72
9.24. Parámetros de adquisición, Provincia de Choapa.	72
9.25. Interpretación sondeo AV6	73
9.26. Interpretación sondeo AV7	73
9.27. Interpretación sondeo AV8	74
9.28. Interpretación sondeo AV9	74

Resumen

La campaña de medición consistió en la realización de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo, estos se llevaron a cabo en sectores cercanos a las ciudades de Ovalle y Combarbalá, Provincia Del Limarí en la IV Región de Coquimbo. El objetivo de esta campaña era la localización de recursos hídricos subterráneos y la vez detectar el espesor, su profundidad y valores de resistividad asociados.

El método del transiente electromagnético en el dominio del tiempo es una técnica de prospección geofísica la cual consiste en medir el campo magnético secundario que se genera al inducir una corriente en el terreno; obteniendo de esta forma valores de resistividad aparente de la zona de estudio.

Durante la campaña se utilizó el instrumento TEM-FAST 48 de fabricación holandesa, en el cual el transmisor actúa de receptor a la vez y los datos obtenidos son almacenados en un receptor digital. En total se realizaron 46 mediciones utilizando un tamaño de lazo de 25x25 m (1 vuelta) y también de 13x13 m (1 vuelta), utilizando en todas estas mediciones la configuración *single loop*.

De los análisis de estos sondeos se evidencia que los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo son efectivos para la caracterización de recursos hídricos, debido a la sensibilidad que presenta el instrumento a las variaciones de resistividad que se producen en el subsuelo. De la experiencia en terreno se demuestra la efectividad de estos sondeos en ambientes estratificados, como lo son los depósitos aluviales, los cuales son excelentes para la exploración y monitoreo de aguas subterráneas.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

La escasez hídrica durante los últimos años en las zonas norte, centro y centro-sur de Chile se debe a la disminución de las precipitaciones, los caudales y a un aumento considerable en la isoterma cero. A esto se agrega el cambio climático, lo que afecta la disponibilidad de agua superficial, así como la humedad del suelo y posteriormente la recarga de aguas subterráneas. La provincia Del Limarí en la IV Región de Coquimbo, fue declarada zona de escasez por un período de 6 meses a partir del 11 de Mayo del 2016 (Decreto MOP N°180).

Con respecto a las aguas subterráneas, estas a menudo son de buena calidad y suelen estar a bastante profundidad. Se recomienda localizarlas con la mayor precisión posible y realizar una evaluación, tanto en términos de cantidad como de calidad antes de emprender trabajos de perforación, los cuales suelen tener un costo elevado, evitando así pérdidas monetarias y también perforaciones innecesarias.

De lo expuesto anteriormente, desde el área de la geofísica es posible colaborar en la solución de este problema, debido a que existen diferentes métodos de exploración del subsuelo en el campo de la geofísica; tales como métodos sísmicos, eléctricos, gravimétricos y también electromagnéticos.

En esta investigación, se utilizó el método electromagnético llamado Transiente Electromagnético, conocido también como TDEM o simplemente TEM por su nombre en inglés (*Time Domain Electromagnetic Method*). Este método mide las variaciones de resistividad eléctrica que existen en las capas del subsuelo o roca causada por las variaciones laterales y verticales en las diferentes propiedades físicas que poseen. A la vez utiliza ampliamente para la búsqueda de agua subterránea porque la variable resistividad del suelo se correlaciona con la presencia de humedad (o saturación con agua). Al ser un método inductivo se elimina el problema de la capa de alta resistividad superficial que impide la inyección de corriente en el suelo. En relación a la profundidad que se logra alcanzar con este método, esta fructua entre escasos metros hasta cientos de metros, por lo que el rango de profundidad es adecuada para la determinación de aguas subterráneas. Una de las limitaciones de este método es la topografía debido a que en terrenos irregulares se impide la instalación del equipo para realizar las mediciones.

1.2. Planteamiento del problema

Al ser la cuarta región una zona donde muchas comunidades presentan problemas de accesibilidad al agua se tiene como objetivo detectar lugares desde los cuales se pueda extraer este recurso. Con el fin de lograr este objetivo se utilizó el método de transiente electromagnético en el dominio del tiempo, TEM.

La realización de esta tesis se encuentra dentro del marco de un estudio geofísico realizado por la empresa Geopacific.E.I.R.L. en la Provincia de Limarí durante Septiembre del año 2015.

Con los datos obtenidos se pretende caracterizar las zonas elegidas para el estudio, es decir, detectar el espesor de estos cuerpos de agua, su profundidad y los valores de resistividad a los que están asociados en el caso que existan. Sabiendo que los valores de resistividad del agua dulce van desde los 20 hasta 40 ohm-m para esta zona, se realizará un análisis de la resistividad arrojada en los sondeos y también de la geología de la zona de estudio para ver si existe coherencia en los valores de resistividad entregados por los sondeos y la asociación de estos con la presencia de agua subterránea.

1.3. Objetivos

Objetivo principal

- Mediante la utilización del método transiente electromagnético en el dominio del tiempo (TEM) se pretende localizar recursos hídricos en el subsuelo y ser capaz de caracterizarlos, es decir, conocer profundidad, que área ocupan y también conocer la resistividad a la que están asociados.

Objetivos específicos

- Obtener perfiles de resistividad en función de la profundidad.
- Realizar secciones geoelectricas de los lugares donde se realizaron los sondeos .
- Identificar la composición de las capas a partir de las mediciones de transiente electromagnético y la caracterización geológica.
- Evaluar la capacidad del método respecto a la caracterización de recursos hídricos.

1.4. Metodología

La metodología aplicada en esta tesis se resume de la siguiente manera:

1. Recolección de información acerca de las aplicaciones, usos y parámetros relacionados a sondeos TEM en la búsqueda y delimitación de agua subterránea. En paralelo se analizan publicaciones sobre geología y estudios hidrogeológicos realizados en la provincia Del Limarí.
2. Se determina las zonas óptimas para las mediciones, es decir, lugares en lo posible planos, que tengan espacio igual o mayor a $25 \times 25 [m^2]$ ó $13 \times 13 [m^2]$, que se encuentren alejados de torres de alta tensión.
3. A partir de las mediciones adquiridas se realiza el procesamiento de datos, el cual consiste en realizar un modelamiento de la curva de resistividad aparente, obteniendo para cada medición un modelo de capas, el cual refleja los cambios de resistividad eléctrica en función de la profundidad. Para esto se utilizó el software comercial *Tem Research*.
4. Se comparan e interpretan los diferentes modelos de capas obtenidos con la información geológica existente para la zona.

1.5. Estructura de la tesis

La presente tesis esta dividida en los siguientes capítulos:

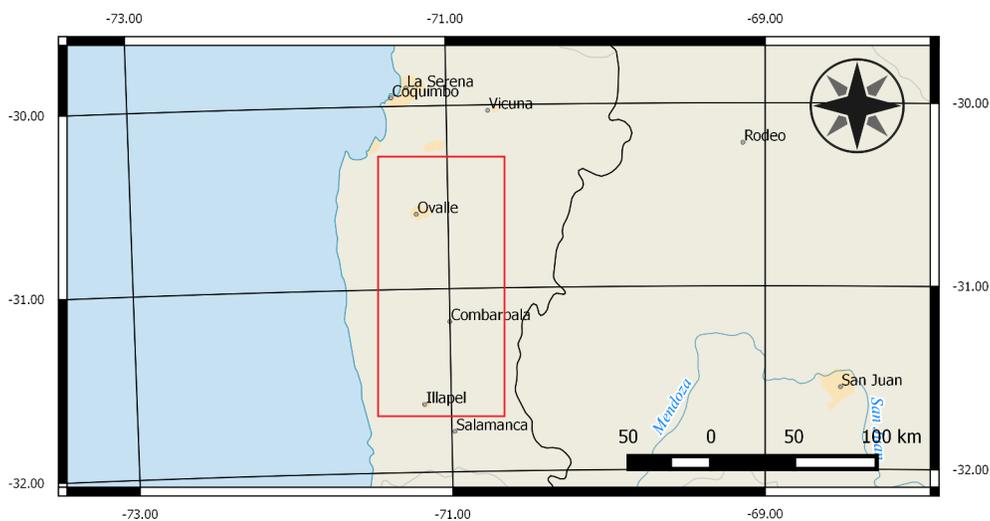
- El **capítulo uno** describe la motivación de la tesis, el plantamiento del problema y además la metodología utilizada así como los objetivos.
- El **capítulo dos** hace referencia a la geografía de la zona de estudio, presentando las principales características de la Provincia Del Limarí tales como tipo de clima, vías de comunicación, entre otros aspectos.
- El **capítulo tres** presenta las bases teóricas del método empleado y a la vez detalla el funcionamiento del mismo.
- El **capítulo cuatro** corresponde a la recopilación de información geológica de la cuenca Del Limarí.
- El **capítulo cinco** detalla el proceso de obtención de datos utilizados en la presente tesis así como las características del equipo y las posibles fuentes de ruidos que afectaron los sondeos.
- El **capítulo seis** muestra los resultados obtenidos en esta tesis, dentro de estos se encuentran los modelos 1-D y cortes geo-eléctricos de las secciones generados a partir de los modelos de capas; Además del análisis interpretativo.
- El **capítulo siete** abarca los temas de discusión a partir de lo expuesto en el capítulo seis.
- Por último, **capítulo ocho**, presenta una conclusión general del trabajo realizado en la tesis.

Capítulo 2

Marco geográfico de referencia

2.1. Localización

El área de estudio donde se realizaron los sondeos TEM comprende la IV región de Coquimbo. La región limita al norte con la región de Atacama, al sur con la región de Valparaíso, al oeste con el océano Pacífico y al este con la provincia de San Juan, Argentina. Sus coordenadas geográficas son $29^{\circ}02'$ y $32^{\circ}16'$ de latitud sur y desde los $69^{\circ}49'$ de longitud hasta el océano Pacífico. Las áreas elegidas para los sondeos comprenden localidades que se ubican en la Provincia de Limarí.



Zona de Estudio

Figura 2.1: Área de estudio sondeos TEM.

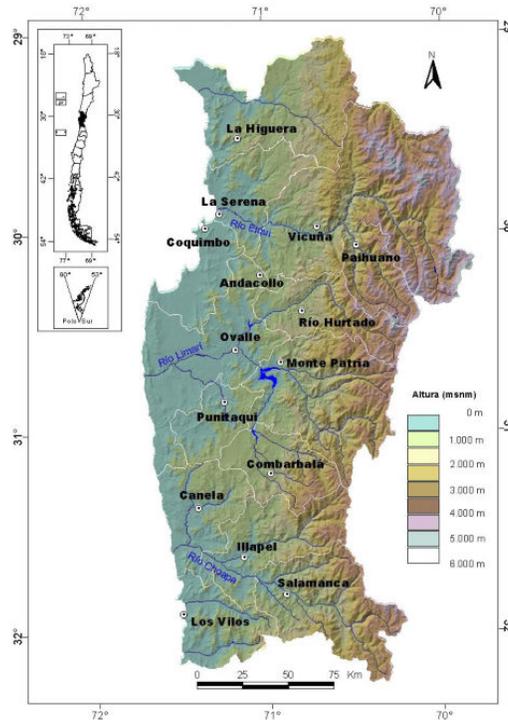


Figura 2.2: Relieve IV región de Coquimbo.

Los asentamientos principales cercanos a los lugares donde se realizaron las mediciones son Ovalle, Combarbalá, Punitaqui, Monte Patria y Río Hurtado.

2.2. Vías de comunicación

La zona cuenta con una amplia red de carreteras que conecta a toda la región con el resto del país. La principal vía de conexión es la ruta 5 que atraviesa la región en sentido norte-sur. La ruta 43 es la vía que une La Serena con la ciudad de Ovalle en sentido Norte-Sureste. Existen a la vez rutas interiores las cuales se encuentran pavimentadas y conectan con las localidades de Monte Patria, Guampulla, Varillar, Valle Hermoso, Cogotí entre otros.

2.3. Servicios

La zona de estudio cuenta con energía eléctrica, transporte urbano, teléfono, en algunas zonas, algunos lugares no tiene acceso al agua potable y no cuentan con alcantarillado.

2.4. Hidrografía

Dentro de la IV región los ríos más importantes son tres: Elqui, Limarí y Choapa, los cuales nacen en la Cordillera de Los Andes y desembocan en el océano Pacífico. En la Provincia de Limarí se encuentra el río del mismo nombre el cual da el nombre a la Provincia y sus principales tributarios son el río Grande, Hurtado y Guatulame. Además existen tres embalses que se conectan con el río los cuales son: Recoleta, La Paloma y Cogotí. Las aguas de los ríos anterior mente mencionados así como los embalses se destinan principalmente a la agricultura.

2.5. Precipitación

Las precipitaciones presenta un régimen frontal, con máximos en invierno (Junio, Julio y Agosto) donde precipita el 80 % del total anual, éstas aumentan hacia el sur y con la altura.

En la región existe un superávit pluviométrico, con valores cercanos al 25 % sobre promedios históricos.

Estaciones	2015[mm]	2016[mm]	Promedio[mm]	Exceso o Déficit % 2015	Exceso o Déficit % 2016
La Serena	64	28	85	-25	-68
Ovalle	119	61	100	19	-39
Salamanca	196	197	228	-14	-14

Tabla 2.1: Registro de precipitación en la IV Región [3].

2.6. Clima

Se presentan diversos climas, por ejemplo, el estepárico costero o nuboso, de estepa cálido o templado frío de altura. La influencia del estepárico costero alcanza hasta los 40 kilómetros desde la costa hacia el interior, tiene como características principales la nubosidad, humedad y temperaturas moderadas. Posee un período seco que va desde los ocho a nueve meses. En el interior, sobre los 800 msnm domina el clima estepa cálido, como característica principal tiene la ausencia de nubosidad y sequedad del aire. Las temperaturas son mayores que en la zona costera y los períodos de sequía son característicos.

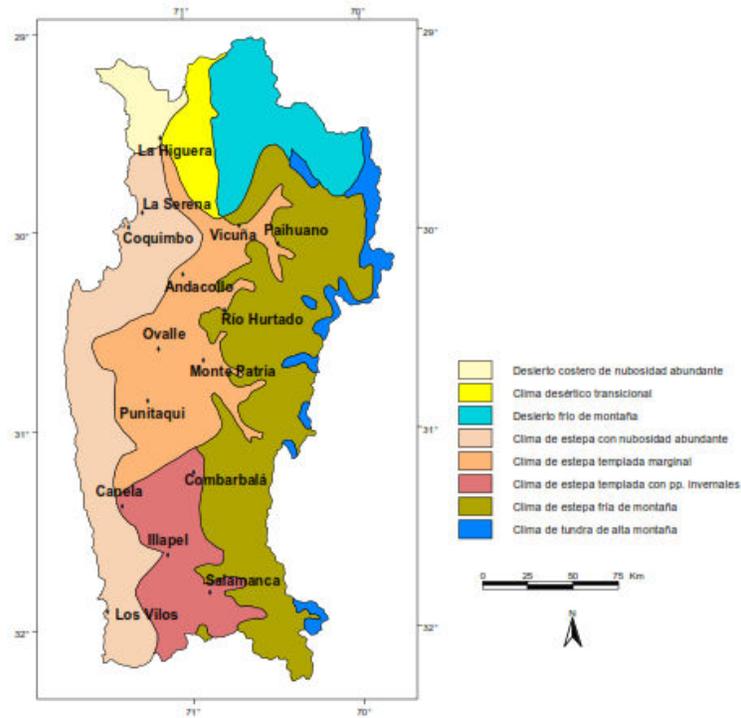


Figura 2.3: Clima Regional [14].

2.7. Vegetación

La zona posee una vegetación de tipo arbustiva donde predomina el espino a la vez existen cultivos, irrigados de forma artificial por los embalses, los que compensan la escases de lluvia. Los principales productos que se cultivan son uvas, damascos, paltas, duraznos y en menor medidas hortalizas.

Cercanos a los embalses de Cogotí y Recoleta se encuentran bosques de sauce chileno.

2.8. Temperatura

La temperatura promedio en esta zona es de 17°C y presenta leves variaciones en sus oscilaciones diarias y anuales.

2.9. Suelo

Todos los suelos de la región se enmarcan dentro de un régimen arídico, que corresponden a Aridisoles (sector interior) y Entisoles (sector costero), son suelos derivados de materiales gruesos y escaso desarrollo en posiciones de cerros escarpados y fuertes pendientes.

Capítulo 3

Fundamentos teóricos

3.1. Teoría Electromagnética

Para comprender las bases y técnicas de interpretación del método transiente electromagnético es necesario tener conocimiento sobre las herramientas de la teoría electromagnética. Todos los fenómenos electromagnéticos son gobernados por las ecuaciones de Maxwell; por lo que se debe empezar dando una revisión a estas ecuaciones. Las ecuaciones de Maxwell se utilizan para realizar una modelación del campo magnético y eléctrico del subsuelo.

Es necesario realizar algunas convenciones para los problemas en el subsuelo, estas convenciones serán tratadas en el presente capítulo.

3.1.1. Ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo

Un campo electromagnético cualquiera se puede definir a través de cuatro vectores, **e**, **b**, **d** y **h** donde

e	Es la intensidad del campo eléctrico	(V/m)
b	Es la inducción magnética	(Wb/m ² o Tesla)
d	Es el desplazamiento dieléctrico	C/m ²
h	Es la intensidad del campo magnético	A/m

Las variables en el presente capítulo que se utilicen en negrita representan vectores, aquellas en minúsculas representan dominio del tiempo y en mayúsculas representan dominio de la frecuencia.

Las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo se pueden escribir de la siguiente manera :

- Ley de Faraday

$$\nabla \times \mathbf{e} + \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = 0, \quad (3.1)$$

- Ley de Ampere

$$\nabla \times \mathbf{h} - \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} = \mathbf{j} \quad (3.2)$$

- Ley de Gauss para campos magnéticos

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0 \quad (3.3)$$

- Ley de Gauss para campos eléctricos

$$\nabla \cdot \mathbf{d} = \rho \quad (3.4)$$

En la ecuación (3.2), \mathbf{j} es la densidad de corriente eléctrica en (A/m^2) y en (3.4), ρ representa intensidad de carga eléctrica en (C/m^3).

Para entender el fenómeno electromagnético es necesario utilizar las ecuaciones constitutivas, estas se obtienen a partir de las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia [18]. Las ecuaciones constitutivas son las siguientes:

$$\mathbf{D} = \varepsilon(\omega, \mathbf{E}, \mathbf{r}, t, T, P, \dots) \cdot \mathbf{E}, \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu(\omega, \mathbf{H}, \mathbf{r}, t, T, P, \dots) \cdot \mathbf{H}, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\omega, \mathbf{E}, \mathbf{r}, t, T, P, \dots) \cdot \mathbf{E}, \quad (3.7)$$

Donde los tensores ε , μ y σ describen la permitividad dieléctrica, la permeabilidad magnética y la conductividad eléctrica respectivamente; como funciones de la frecuencia angular ω , fuerza del campo eléctrico \mathbf{E} o inducción magnética \mathbf{B} , posición \mathbf{r} , tiempo t , temperatura T , y presión P .

Como una manera de simplificar el análisis de problemas relacionados a la Tierra se asume lo siguiente [18] :

- Todos los medios son lineales, isotropicos, homogéneos, estos poseen propiedades eléctricas que son independientes del tiempo, temperatura y presión.
- La permeabilidad magnética μ en el espacio libre se define como $\mu = \mu_0$.

Aplicando la transformada de Fourier a la Ley de Faraday y de Ampere, utilizando las relaciones constitutivas se obtienen las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, las cuales tiene la siguiente forma:

$$\nabla \times \mathbf{E} + i\mu\omega\mathbf{H} = 0 \quad (3.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - (\sigma + i\varepsilon\omega)\mathbf{E} = 0 \quad (3.9)$$

Definiendo la impedancia $\hat{z} = i\mu\omega$ y la admitancia como $\hat{y} = \sigma + i\varepsilon\omega$ [6], las ecuaciones anteriores se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \hat{z}\mathbf{H} = 0 \quad (3.10)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \hat{y}\mathbf{E} = 0 \quad (3.11)$$

3.1.2. Las ecuaciones de onda

Aplicando el rotor a la Ley de Faraday (3.1) y la Ley de Ampere (3.2) obtenemos lo siguiente:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{e}) + \nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.12)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{h}) - \nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} \right) = \nabla \times \mathbf{j} \quad (3.13)$$

Las relaciones constitutivas en el dominio del tiempo restringidas a casos no dispersivos donde μ , ε y σ son del tiempo son:

$$\mathbf{d} = \varepsilon \mathbf{e} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{b} = \mu \mathbf{h} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{e} \quad (3.16)$$

Sustituyendo las relaciones constitutivas en el dominio del tiempo en las ecuaciones (3.12) y (3.13), y luego reduciendo términos se llega a lo siguiente:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{e} + \mu \nabla \times \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

y

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{h} - \varepsilon \nabla \times \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} = \sigma \nabla \times \mathbf{e} \quad (3.18)$$

Al ser \mathbf{h} y \mathbf{e} funciones continuas que poseen primeras y segundas derivadas continuas, las ecuaciones anteriores se pueden escribir de la siguiente forma :

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{e} + \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{h}) = 0 \quad (3.19)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{h} - \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{e}) = \sigma \nabla \times \mathbf{e} \quad (3.20)$$

Los términos $\nabla \times \mathbf{h}$ y $\nabla \times \mathbf{e}$ también son continuos, por lo que las ecuaciones anteriores se pueden transformar a lo siguiente:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{e} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} = 0 \quad (3.21)$$

y

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{h} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} = 0 \quad (3.22)$$

Como una forma de simplificar las ecuaciones anteriores se puede utilizar la siguiente identidad vectorial, $\nabla \times \nabla \times \mathbf{a} \equiv \nabla \nabla \cdot \mathbf{a} - \nabla^2 \mathbf{a}$. Teniendo en cuenta que para regiones homogéneas se cumple que $\nabla \cdot \mathbf{e} = 0$ y $\nabla \cdot \mathbf{h} = 0$ las ecuaciones anteriores se convierten en

$$\nabla^2 \mathbf{e} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} = 0 \quad (3.23)$$

y

$$\nabla^2 \mathbf{h} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} = 0 \quad (3.24)$$

Las anteriores son las ecuaciones de onda para el campo eléctrico y magnético respectivamente en el dominio del tiempo. Si aplicamos la transformada de Fourier a las ecuaciones obtenemos lo siguiente en el dominio de la frecuencia

$$\nabla^2 \mathbf{E} + (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)\mathbf{E} = 0 \quad (3.25)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)\mathbf{H} = 0 \quad (3.26)$$

Las cuales son las ecuaciones de onda en el dominio de la frecuencia, también se conocen como las ecuaciones de Helmholtz en \mathbf{E} y \mathbf{H} . Para este caso μ , ϵ y σ son funciones de la frecuencia en el dominio del tiempo estas permanecían constantes. Es importante decir que para materiales en la tierra que poseen frecuencias menores a 10^5 Hz se tiene que $\mu\epsilon\omega^2 \ll \mu\sigma\omega$; es decir, las corrientes de desplazamiento son mucho más pequeñas. Las ecuaciones se reescriben de la siguiente forma:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - i\mu\sigma\omega\mathbf{E} = 0 \quad (3.27)$$

y

$$\nabla^2 \mathbf{H} - i\mu\sigma\omega\mathbf{H} = 0 \quad (3.28)$$

De lo anterior, el número de onda esta dado por[18]:

$$k = (-i\mu\sigma\omega)^{\frac{1}{2}} \quad (3.29)$$

3.1.3. Condiciones de borde o frontera

Las condiciones de borde se derivan de las ecuaciones de Maxwell en su forma integral [18].

- La componente normal B_n de \mathbf{B} es continua a través de la interfase de un medio 1 y un medio 2.

$$B_{n1} = B_{n2} \quad (3.30)$$

- El componente normal D_n de \mathbf{D} es discontinuo en la interfase, debido a la acumulación en la densidad de carga superficial.

$$D_{n2} - D_{n1} = \rho_s \quad (3.31)$$

- La componente tangencial E_t de \mathbf{E} es continua a través de la interfase.

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (3.32)$$

- La componente tangencial H_t de \mathbf{H} es continua a través de la interfase si no existen corrientes superficiales.

$$H_{t1} = H_{t2} \quad (3.33)$$

- La componente normal J_n de \mathbf{J} es continua a través de la interfase.

$$J_{n1} = J_{n2} \quad (3.34)$$

3.1.4. Solución de las ecuaciones de onda

Las ecuaciones de la parte anterior se pueden utilizar para dar solución a la ecuación de la onda debido a que son ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden [18]. A continuación se toma el caso en el que existe una onda plana con dependencia sinusoidal en el tiempo de la forma $e^{i\omega t}$, es decir que varía de forma armónica.

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}_0^+ e^{-i(kz - \omega t)} + \mathbf{e}_0^- e^{i(kz + \omega t)} \quad (3.35)$$

y

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_0^+ e^{-i(kz - \omega t)} + \mathbf{h}_0^- e^{i(kz + \omega t)} \quad (3.36)$$

Al ser k un número complejo se puede escribir de la siguiente forma:

$$k = \alpha - i\beta \quad (3.37)$$

Donde α y β son reales, estos valores están dados por [17].

Usualmente en prospección eléctrica se considera que las corrientes de conducción dominan sobre las corrientes de desplazamiento, en tal caso α y β son cantidades iguales y reales definidas de la siguiente forma:

$$\alpha = \beta = \left(\frac{\omega \mu \sigma}{2} \right)^{1/2} \quad (3.38)$$

Por lo que las soluciones de las ecuaciones que decaen en la dirección positiva de z se escriben de la siguiente manera

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (3.39)$$

y

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (3.40)$$

De las ecuaciones anteriores se puede concluir que al ser β real, $e^{-\beta z}$ disminuye a medida que aumenta el valor de z , esto representa la atenuación. Una onda electromagnética decae en amplitud por un factor de $1/e$ con la distancia, dentro de un medio, queda descrita por el *skin depth* δ que se define como:

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right)^{1/2} = 503 \left(\frac{1}{f \sigma} \right)^{1/2} [m] \quad (3.41)$$

La ecuación representa la penetración nominal del campo electromagnético .

Se puede observar que al aumentar la frecuencia, ω o la conductividad, σ , δ disminuye su valor por lo que los campos electromagnéticos se atenúan con la distancia.

En exploración geofísica es importante esta ecuación debido a que se deben conocer los parámetros electromagnéticos en función de la profundidad, para poder analizar a partir de estos los cambios de resistencia de conductores y así conocer los contactos geológicos que se producen en el subsuelo.

3.2. Métodos Electromagnéticos

Estos métodos comenzaron a desarrollarse en Rusia en los años 80, a partir de 1985 se empezó a aplicar en la geología, ingeniería y temas medio ambientales. Hoy en día representa un método potencial para la investigación de parámetros eléctricos del subsuelo.

3.2.1. Clasificación

Dentro de los métodos electromagnéticos existen diferentes clasificaciones de acuerdo a diferentes parámetros, una de ellas el dominio en el cual se trabaje y el cual puede ser la **frecuencia** ó en el dominio del **tiempo**. En el caso del dominio de la frecuencia, la corriente varía sinusoidalmente con el tiempo en una frecuencia fija que es seleccionada, la cual se relaciona con la profundidad que se quiera alcanzar. El método utilizado trabaja en el dominio del tiempo, es decir, la corriente en el transmisor se mantiene periódica. En la presente tesis se describirá de forma más detallada la manera de operar en el dominio del tiempo conforme avance este capítulo.

También existe otra clasificación que es según la fuente o emisor que se utilice para generar el campo.

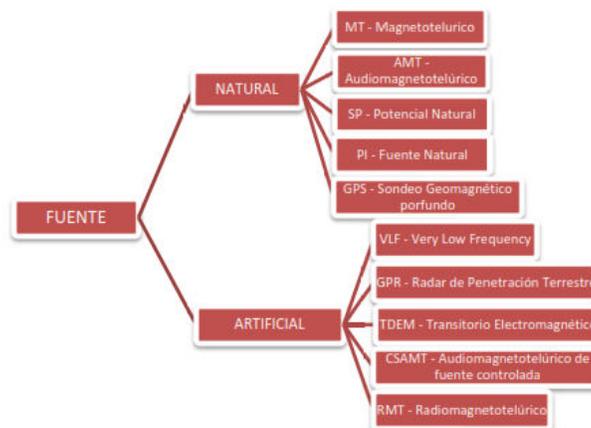


Figura 3.1: Clasificación de los métodos electromagnéticos según su fuente.

El estudio se centra en los métodos electromagnéticos en el dominio del tiempo. Sus principios físicos son simples, una corriente circula en un lazo transmisor, la cual genera un campo magnético primario en los alrededores. Por ley de Faraday se producirá inducción electromagnética de una corriente eléctrica en el subsuelo, la cual mantiene al campo magnético primario. Las variaciones del campo magnético secundario con el tiempo inducen un voltaje en la bobina que se conoce como transiente.

3.2.2. Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo

Un sondeo electromagnético en el dominio del tiempo, al cual nos referiremos de aquí en adelante como TEM consiste en medir las variaciones de resistividad eléctrica o su inverso, la conductividad eléctrica del subsuelo ó de roca causada por las variaciones laterales y verticales de las diferentes propiedades físicas del suelo o la roca.

El principio operativo de los sondeos TEM consiste en hacer circular de forma periódica por un pequeño lapso de tiempo una corriente eléctrica a través de un lazo transmisor (también se conoce como *loop transmisor* ó bobina transmisora), durante este tiempo se va a generar un campo magnético el cual se conoce como campo magnético primario. Al cortar la corriente de forma abrupta, el campo magnético primario causa corrientes parásitas (*corrientes de Eddie*) que se propagan a través del terreno y de los conductores cercanos, estas corrientes van a disminuir con el tiempo debido a que existe pérdida de resistencia calórica, provocando un campo magnético decreciente en superficie conocido como campo magnético secundario.

Este campo magnético secundario va a producir un decaimiento de voltaje variable en el receptor, el decaimiento va a entregar información sobre la resistividad en el subsuelo, ya que la distribución y también la magnitud van a tener relación con la resistividad que se presente en el subsuelo.

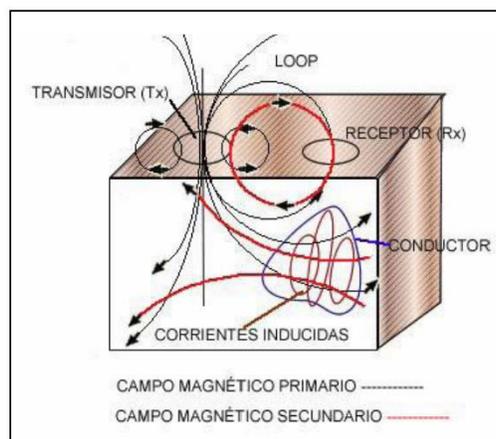


Figura 3.2: Generación de campo electromagnético y eléctrico.

Una de las ventajas de este método es que al trabajar en el dominio del tiempo sólo se mide el campo secundario, por lo que no se producirá una filtración del campo primario.

A continuación se presenta la forma de la corriente en el transmisor cuando se aplica sobre un terreno. En la primera fila se muestra la corriente en el lazo transmisor al hacerla circular y luego se ve reducida al cortarse abruptamente, en esta parte se mide la intensidad y se produce atenuación donde el tiempo de apagado es el mismo que el tiempo de encendido. En la segunda fila se aprecia la fuerza electromotriz inducida en el suelo producto del corte abrupto de la corriente, éstas se propagan de forma cerrada y creciente avanzando en profundidad al pasar el tiempo la intensidad de la corriente disminuye lo que genera un campo magnético secundario que disminuye en superficie. En la tercera se observa cuando la corriente está cortada y se realizan las mediciones en la bobina receptora, el campo magnético secundario varía en el tiempo y las mediciones se agrupan en ventanas de muestreo.

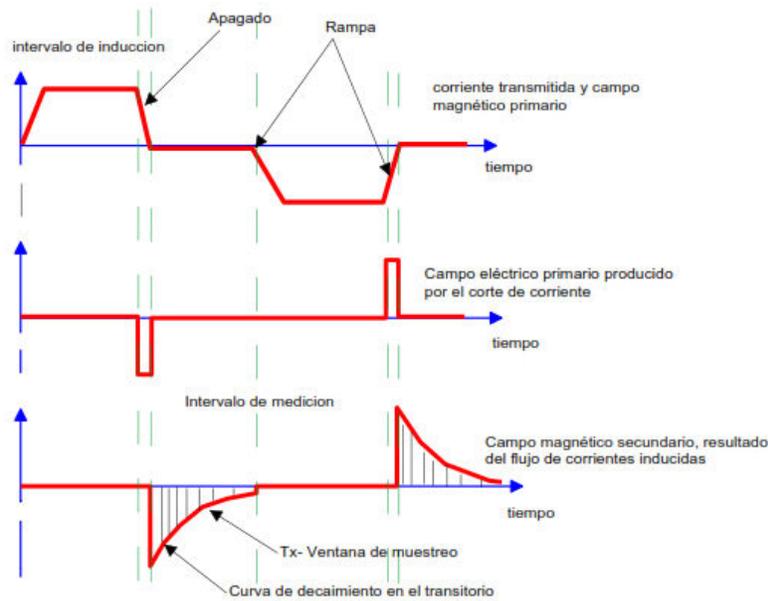


Figura 3.3: Gráfica de la forma de onda en el tiempo de medición. Extraído de [2]

La corriente inducida en el tiempo t_0 se encuentra en superficie y posteriormente comienza a propagarse en profundidad al pasar el tiempo, es decir desde t_1 hasta t_4 , como se ve esquemáticamente en la figura siguiente.

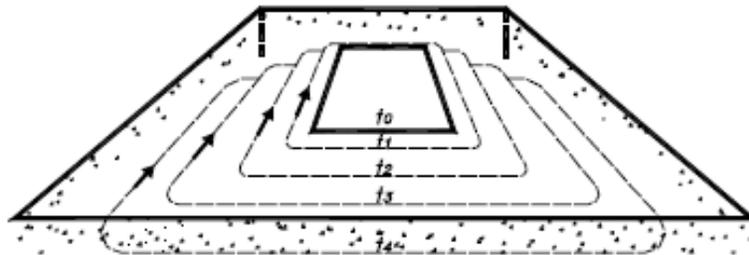


Figura 3.4: Flujo de corriente en superficie y profundidad. Extraído de [1].

Cuando decae el campo magnético se pueden diferenciar tres etapas: etapa temprana, etapa intermedia y etapa tardía.

- Etapa Temprana** Durante ésta etapa se hace circular una corriente por el lazo transmisor, después de un tiempo se corta de forma abrupta, ver figura (3.4); Por ley de Faraday se produce inducción electromagnética de una corriente electromagnética en los conductores cercanos.

Durante t_0 , cuando la corriente en el transmisor es cortada abruptamente, las corrientes superficiales inducidas bajo la aproximación cuasiestática, estarán distribuidas de forma que mantengan el campo magnético que existía antes de que se corte la corriente. Estas corrientes se localizan en las cercanías del lazo transmisor e imitarán la forma del lazo transmisor.

- Etapa Intermedia**

En esta etapa las corrientes inducidas tenderán a disiparse generando un nuevo campo magnético que varía con el tiempo e inducirá nuevas corrientes en los conductores cercanos que comenzarán a fluir, las que no fluyen hacía el interior.

- Etapa Tardía**

Las corrientes inducidas serán invariantes en el tiempo. La inductancia y la resistencia de cada filamento de corriente alcanzan valores asintóticos teniendo sólo una amplitud de decaimiento.

La tasa de cambio de estas corrientes y sus campos magnéticos asociados dependen de la conductividad, tamaño y forma del conductor; Durante el tiempo inicial t_0 , la distribución de corriente es independiente de la conductividad y del cuerpo, sólo depende del tamaño y forma del conductor. Durante la etapa temprana existe una dependencia débil de las corrientes respecto a la conductividad del cuerpo.

A partir de la transmisión de una función escalón en el lazo transmisor la corriente que fluye en el conductor esta dada por [5]:

$$I(t) = \frac{M_{01}I_0}{L}e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t \geq 0 \quad (3.42)$$

Donde M_{ij} es la inductancia, R y L son la resistencia e inductancia del conductor respectivamente, I_0 es la corriente en el transmisor y $\tau = L/R$ es la constante de tiempo para el subsuelo. Una discontinuidad en la corriente que se transmite creará una corriente en el subsuelo la cual decaerá de forma exponencial con una constante τ .

En la bobina receptora, el voltaje registrado, $e_s(t)$, el cual es proporcional a la variación temporal del campo magnético secundario creado por las corrientes en el subsuelo es de la siguiente forma:

$$e_s(t) = M_{12} \frac{\partial I}{\partial t} = I_0 \frac{M_{01}M_{12}}{L} \left[\delta(t) - \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \right] \quad t \geq 0 \quad (3.43)$$

En la ecuación anterior $\delta(\tau)$ es el impulso o función delta.

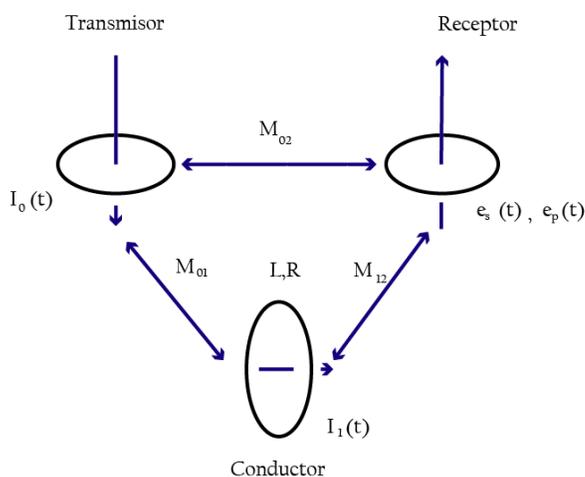


Figura 3.5: Representación básica de un circuito TEM . Modificado de [18].

La ecuación anterior incluye las características principales de los campos transitorios. Para malos conductores, es decir, τ pequeño, el voltaje inicial es grande pero el campo decae de forma rápida. Para buenos conductores, τ grande, el voltaje inicial es pequeño pero el campo decae de forma lenta.

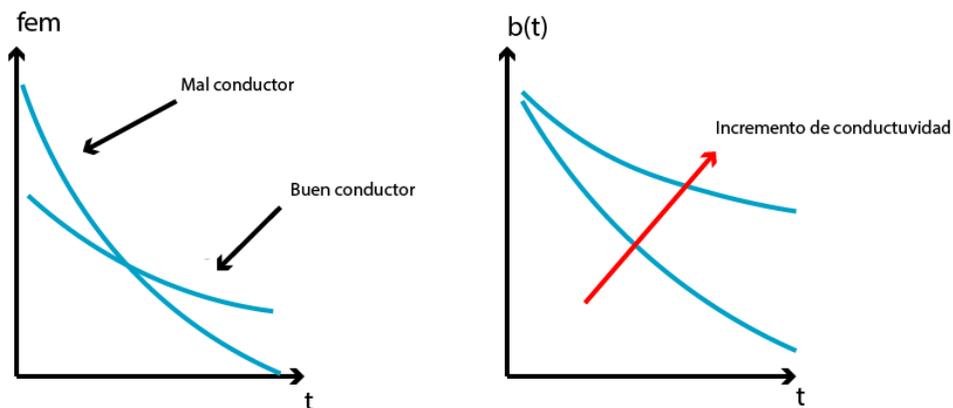


Figura 3.6: Comportamiento de un conductor y comportamiento de la conductividad. Modificado de [10].

Respuesta de transientes y resistividad aparente

Un sondeo TEM en el dominio del tiempo genera un campo magnético vertical, el cuál se obtiene para reducir los efectos de variaciones laterales. La expresión que se utiliza [18] es la siguiente:

$$H_z = -\frac{I}{k^2 a^3} \left[3 - (3 + 3ika - k^2 a^2) e^{-ika} \right] \quad (3.44)$$

Donde a es el radio de la bobina. Para obtener la respuesta magnética primero debemos dividir la función de transferencia entre $i\omega$, dado que la función impulso es la derivada de la función escalón $\delta(t) = du/dt$. Luego de esto se aplica la transformada de Laplace de la componente del campo magnético en el centro de la bobina y se deriva respecto al tiempo obteniéndose la respuesta de la función escalón que es de la siguiente forma:

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} = -\frac{I}{\mu_0 \sigma a^3} \left[3 \operatorname{erf}(\theta a) - \frac{2}{\pi^{1/2}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (3.45)$$

En la función anterior $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ y $\theta = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}}$.

Utilizando la relación cuando la función escalón es positiva y negativa, el campo magnético en el centro de la bobina cuando se corta la corriente de forma abrupta, está dado por la siguiente ecuación:

$$h_z = \frac{I}{2a} \left[\frac{3}{\sqrt{\pi \theta a}} e^{-\theta^2 a^2} + \left(1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2} \operatorname{erf}(\theta a) \right) \right] \quad (3.46)$$

El término $\frac{I}{2a}$ representa el campo magnético que estaría presente en el espacio libre antes de que se corte la corriente. Al multiplicar el término anterior por el segundo, obtenemos el decaimiento del campo magnético debido a las corrientes que se mueven en el subsuelo.

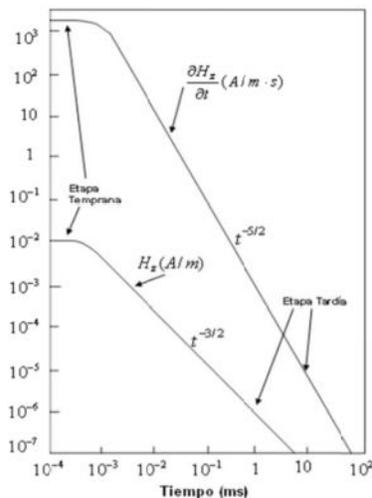


Figura 3.7: Campo magnético vertical y su derivada respecto al tiempo [18].

De la figura anterior se observa que el decaimiento del campo magnético y su derivada durante la etapa temprana en tiempos cortos son constantes, mientras que en la etapa tardía (tiempos largos), ambos decaen en intensidad de la forma $t^{-3/2}$ para el campo magnético y $t^{-5/2}$ para su derivada.

El campo magnético generado por los transientes se debe a un sistema de corrientes circulares que se desplazan en la dirección de la corriente transmitida y también en profundidad, tomando una forma de *smoke rings* o anillos de humo con un radio $\sqrt{4,37t/\sigma\mu_0}$ y una velocidad de $2/\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}$ [10].

Para tiempos largos (*late times*) la ecuaciones anteriores se aproximan quedando de la siguiente forma:

$$h_z \approx \frac{I\sigma^{3/2}\mu_0^{3/2}a^2}{30\pi^{1/2}}t^{-3/2} \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} \approx \frac{-I\sigma^{3/2}\mu_0^{3/2}a^2}{20\pi^{1/2}}t^{-5/2} \quad (3.48)$$

La resistividad aparente, ρ_a , se define como la resistividad de un semiespacio homogéneo que produce la misma respuesta que la resistividad media en la tierra real a partir de los mismos parámetros. En la realidad los valores de resistividad aparente y resistividad real son diferentes entre sí. La resistividad aparente en función del tiempo sirve para tener una aproximación de la variación de la resistividad en función de la profundidad.

Al depender del tiempo, la resistividad aparente va a depender de la serie de tiempo que se utilice (etapa temprana o tardía) cada una de estas series genera una formula de resistividad aparente.

En esta tesis, por el método empleado se utiliza la resistividad aparente en la etapa tardía. Esta resistividad se puede conocer a partir del campo magnético en el semi-espacio homogéneo y a partir del voltaje.

De la respuesta del campo magnético en el semi-espacio homogéneo se puede conocer la respuesta asintótica para la serie de tiempo.

$$h_z^l = \frac{I\sigma^{3/2}\mu^{3/2}a^2}{30\sqrt{\pi}t^{3/2}} \quad (3.49)$$

Del voltaje es necesario conocer la respuesta del voltaje definida por

$$V = \frac{ml}{\sigma a^3} \left[3\text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\pi} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (3.50)$$

En esta ecuación m representa el número de vueltas de la bobina y su área, conocido como momento receptor. De lo anterior se puede conocer el comportamiento asintótico de viaje para la serie de tadía [16].

$$V^l = \frac{I\sigma^{3/2}\mu^{5/2}ma^2}{20\sqrt{\pi}t^{5/2}} \quad (3.51)$$

Los procedimientos para para obtener la resistividad aparente son de tipo iterativos o de series de expansión y la solución importante es :

$$\rho_a^{Vl} = \frac{I^{2/3}a^{4/3}m^{2/3}\mu^{5/3}}{20^{2/3}\pi^{1/3}t^{5/3}V^{2/3}} \quad (3.52)$$

3.2.3. Configuraciones geométricas de los sondeos TEM

Para realizar un sondeo TEM existen diversos tipos de arreglos, estos se van a diferenciar según la posición de la bobina transmisora y de la bobina receptora, algunas formas pueden ser elípticas, rectangulares ó cuadradas. Siendo la cuadrada la forma más utilizada debido a su práctica instalación en terreno. De igual manera el tamaño del transmisor y/o receptor va a variar dependiendo de la profundidad que se quiera estudiar. A continuación se describen las configuraciones más comunes.

- **Single Loop** esta configuración fue muy popular en la Unión Soviética, utiliza un lazo que es transmisor y receptor a la vez. Mientras la corriente circula por el *loop*, este actúa como transmisor. En cuanto la corriente es cortada, el terminal del *loop* esta conectado al receptor y la señal del transiente se puede medir durante el tiempo de apagado. El *loop* puede tener forma cuadrada o rectangular y el tamaño varía desde los 5m hasta 200m.
- **Loop Coincidente** este arreglo es de la misma forma que el anterior, a excepción de que los lazos estan separados pero espacialmente son coincidentes. Están conectados al transmisor y receptor respectivamente.
- **Central loop** en este caso el arreglo es una variante del *Loop Coincidente*, en el cual un dipolo receptor es localizado en el centro del lazo transmisor.
- **Bobinas separadas** en este arreglo el transmisor y el receptor están separados por una distancia fija.

En la presente investigación se utilizó la configuración *Single Loop* para todos los sondeos realizados. El instrumento utilizado viene configurado para trabajar en esta forma.

3.2.4. Fuentes de error en los sondeos TEM

Como cualquier método geofísico de exploración existen ciertas limitantes, las que se deben tener en cuenta a la hora de realizar campañas de terreno. En relación a los tipos de ruido que se pueden generar a partir de la utilización de este método se encuentran el ruido geométrico, el ruido cultural y el ruido electromagnético. Es importante conocer y entender los diferentes tipos de ruidos debido para así obtener una buena calidad de datos.

Las fuentes de error en los sondeos TEM se pueden agrupar en cuatro categorías, descritas por [10] :

- **Error Geométrico:** este error incluye todas las relaciones geométricas entre el transmisor y el receptor. Este error es insignificante en un sondeo en el dominio del tiempo debido a que las mediciones se realizan cuando el transmisor está apagado. También existen errores geométricos debido a la topografía en donde se realicen las mediciones.
- **Ruido Cultural:** las corrientes que se inducen en conductores metálicos cercanos como líneas telefónicas, pueden producir respuestas anómalas porque se acoplarán a la respuesta. Lo anterior se debe a que estos actuarán como conductores dando como resultado un campo magnético secundario si se encuentran cercanos al lugar donde se realicen los sondeos. La respuesta se puede reducir alejando el *loop* transmisor del lugar donde se encuentra la fuente de ruido cultural.
- **Ruido electromagnético:** puede ser provocado por señales geomagnéticas las cuales tienen una frecuencia cercanas a 1 Hz, pueden estar dentro o fuera de la ionósfera, tales como tormentas eléctricas y tormentas solares. Las tormentas eléctricas son más frecuentes en zonas ecuatoriales.

Cables de alta tensión (50 o 60 Hz) y estaciones de VLF (*very low frequency*) crean ruido de alta frecuencia (10 a 25 kHz). Este tipo de ruido se puede evitar utilizando filtros en el instrumento antes de empezar a hacer las mediciones.

Virtualmente todos los sistemas TEM transmiten una señal, la cual es repetitiva y usa una forma de acumulación de mediciones para mejorar la tasa de señal/ruido(*stacks*). Una forma de mejorar las mediciones es aumentando la fuente de poder.



Figura 3.8: Ruido cultural.

3.2.5. Ventajas y Desventajas

Es importante determinar el método a utilizar, dependiendo de lo que se requiera explorar hay ventajas de aplicar un método geofísico por sobre otro. En relación a este método y su gran popularidad para la búsqueda de agua subterránea frente a otros métodos resistivos, se presenta las siguientes ventajas y desventajas [8]:

Ventajas

- Rápida velocidad de medición.
- La resolución lateral es buena .
- Resolución mejorada de conductores que poseen equivalencia eléctrica.
- No presenta problemas cuando existen capas superficiales que son resistivas.

Desventajas

- No funciona bien en materiales muy resistivos.
- Las interpretaciones de sondeos en estructuras 3D aún está en desarrollo.
- El costo de estos instrumentos suele ser más elevado en relación a otros instrumentos como por ejemplo SEV y presentan mayor complejidad a la hora de interpretación y tratamiento de datos.

De lo anterior, las ventajas de utilizar TEM es significativa, por lo que este método es ampliamente utilizado para sondeos geo-eléctricos.

3.3. Resistividad eléctrica en las rocas

La resistividad en las rocas puede variar de acuerdo a diferentes factores, ésta es inversamente proporcional a la conductividad , la cual es determinada por la cantidad de corriente que pasa una roca al aplicar una diferencia de potencial.

Algunos factores que pueden alterar la resistividad de la roca son:

- **Porosidad:** es la relación entre el volumen total de los poros y el volumen de la roca. En los poros se pueden almacenar diferentes fluidos los cuales pueden poseer un valor diferente de resistividad. Si la roca presenta alta porosidad y estos poros están cubiertos por fluidos, presentarán una menor resistividad, en caso contrario, a menor porosidad presentará una mayor resistividad eléctrica.
- **Salinidad de las soluciones acuosas:** a mayor salinidad de las soluciones, mayor es el contenido de iones que pueden conducir la corriente eléctrica.

- **Porcentaje de saturación:** es el porcentaje del volumen de poros que está ocupado por soluciones acuosas. De no estar los poros ocupados por soluciones acuosas, el medio presentará una mayor resistividad. La resistividad disminuye con el grado de saturación de la Ley de Archie:

$$\frac{\rho}{\rho_{100}} = a\phi^{-m}S^{-n} \quad (3.53)$$

Donde ρ_{100} es la resistividad de máxima saturación, n es un número entero (2), m y a son constantes dentro de un rango variable, que dependen del tipo de roca. ($0.5 < a < 2.5$; $1.3 < m < 2.5$), ϕ es la porosidad y S es la saturación.

- **Temperatura:** a mayor temperatura disminuye la viscosidad de las soluciones acuosas, facilitando la movilidad de los iones lo que provoca una disminución de la resistividad.
- **Presión:** Cuanto mayor sea la presión en rocas sedimentarias, aumenta el grado de compactación, lo que disminuye la porosidad y aumenta la resistividad. En las rocas ígneas y metamórficas, se produce un fracturamiento por la presión lo que disminuye la resistividad de las rocas.

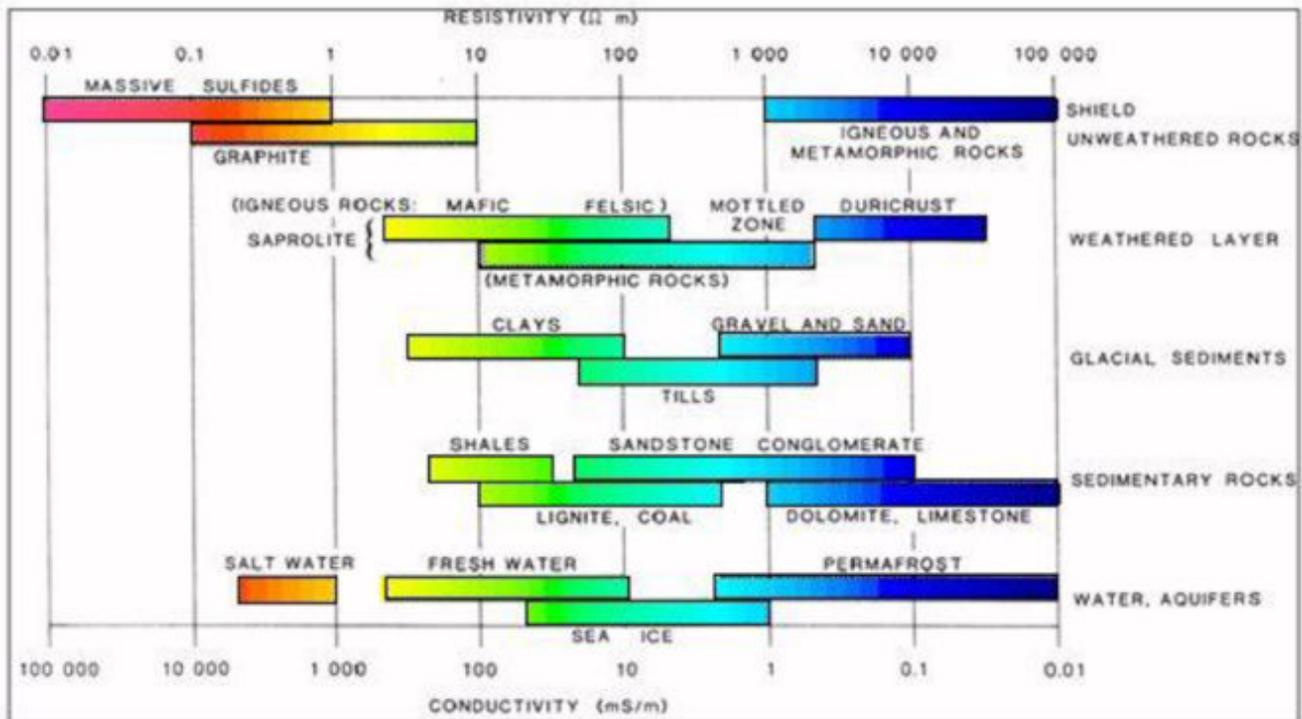


Figura 3.9: Resistividad eléctrica para diferentes compuestos . Extraído de [12]

Capítulo 4

Marco Geológico

En el presente capítulo se presenta información geológica de la cuenca del Río Limarí, lugar en donde se realizaron todos los sondeos TEM.

4.1. Geología de la cuenca Del Limarí

En la cuenca del río Limarí se encuentran estrados de rocas volcánicas y sedimentarias principalmente mesozoicos que se presentan en cuatro segmentos de orientación norte-sur aproximadamente. Los segmentos orientales forman un sinclorium, el cual es atravesado en su parte central por estructuras de trazas de orientación norte-sur.

En el segmento oriental del sinclorium, el cual se ubica en la alta cordillera, corresponde a un bloque alzado. Esta constituido por rocas volcánicas, sedimentarias continentales y marinas de edades triásica, jurásica y cretácica, intruida por granodioritas terciarias. En dirección este de este segmento aflora un complejo intrusivo de edad paleozoica el cual principalmente esta constituido de granitos. El segmento occidental del sinclorium corresponde a un bloque hundido. Está constituido por rocas estratificadas de origen continental con interlacaciones marinas, las que pertenecen al Cretácico y probablemente al Terciario Superior, y en una menor proporción por rocas intrusivas. Las rocas estratificadas están constituidas principalmente por rocas sedimentarias y volcánicas. En dirección oeste del sinclorium desaparecen las rocas estratificadas mesozoicas y aparece un segmento constituido por rocas intrusivas y depósitos aluviales de terrazas. Las rocas intrusivas corresponden principalmente a granodioritas y tonalitas de grano grueso de color gris oscuro, de edad jurásica media, se presentan meteorizadas en diversos sectores. También se encuentran afloramientos de granito de menor expresión superficial.

El cuarto segmento se ubica en la zona costera y corresponde a un complejo de rocas paleozoicas (filitas, esquistos, micáceos y migmatitas) afectadas por metamorfismo regional. Este segmento se encuentra limitado hacia el este por una falla normal longitudinal norte-sur, la cual pone en contacto las rocas metamórficas con rocas intrusivas jurásicas y rocas estratificadas, posiblemente del Mesozoico Inferior. Las rocas metamórficas se extienden hasta el mar y forman las serranías costeras y terrazas de abrasión, las cuales se presentan con un manto hacia el oeste, lo que vendría a evidenciar la existencia de un pliegue de tipo sinclinal. En las serranías costeras se encuentran además rocas intrusivas: granitos, tonalitas, granodioritas y dioritas.

4.2. Unidades de Rocas

Rocas Metamórficas Paleozoicas (Devónico-Carbonífero)

Consiste en metaareniscas, filitas y en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados. Estas rocas afloran en el área de la Cordillera Principal en la zona de estudio.

Intrusivos Paleozoicos (Carbonífero-Pérmico)

Intrusivos del Carbonífero-Pérmico: Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. En la precordillera y Cordillera Principal de la Cuarta Región: batolitos compuestos, 'stocks' y cuerpos hipabisales (Batolito Elqui-Limarí). Intrusivos del Pérmico-Triásico: Granitos hololeucocráticos, pórfidos graníticos y granodioritas de biotita. En la cordillera Principal de las regiones III y IV: Batolito Elqui-Limarí (Unidad Ingaguás). Intrusivos del Pérmico-Triásico: Secuencias volcánicas continentales y complejos subvolcánicos: tobas, brechas, lavas y domos riolíticos y dacíticos con intercalaciones de areniscas y conglomerados. Incluye pórfidos riolíticos. En la cordillera Principal de las regiones III y IV: Formación Pantanoso y Estratos de Guanaco Sonso.

Formación Tres Cruces (Jurásico Inferior-Medio)

Aproximadamente a 3 kilómetros al sur de Rivadavia (Valle de Elqui) aparece hacia el este la quebrada Tres Cruces. Se le ha asignado una edad Jurásica y está compuesta principalmente por sedimentos de origen marino. Está integrada por areniscas y conglomerados y calizas fosilíferas con intercalaciones volcanoclásticas y lávicas; basaltos almohadillados.

Formación La Negra (Jurásico Inferior)

Fue definida por García (1967) en la Quebrada La Negra, al sur de Antofagasta. Consiste en una secuencia de rocas volcánicas, sedimentarias, continentales y marinas; constituidas por lavas y aglomerados basálticos a andesíticos con intercalaciones de tobas riolíticas. Aflora en el sector norte del área (noroeste de la ciudad de Ovalle), subyaciendo a la Formación Arqueros.

Formación Mostazal (Jurásico Medio-Superior)

Corresponde a secuencias sedimentarias y volcánicas continentales del Jurásico Medio-Superior compuesta por rocas epiclásticas, piroclásticas, y lavas andesíticas a riolíticas.

Formación Arqueros (Hauteriviano-Barremiano)

Fue definida por Aguirre y Egert (1962) en el Llano de Arqueros, al noroeste de La Serena. Consiste en una secuencia de rocas sedimentarias marinas con intercalaciones volcánicas que aflora como una franja longitudinal de aproximadamente 60 km de largo y que alcanza un ancho máximo de 10 km en el sector de Ovalle. Se encuentra constituida por andesitas porfídicas, calizas marinas, areniscas continentales y calcáreas, donde se aprecia un paso gradual de sedimentos marinos en el norte a continentales en el sur. En el área de estudio aflora al este de las terrazas aluviales, hacia el centro de la zona de estudio, como una franja elongada de orientación norte-sur. Su espesor se estima entre 2.000 a 3.000 m y 4.000 a 5.000 al norte y al este de la ciudad de Ovalle, respectivamente. Su techo lo constituye la Formación Quebrada Marquesa con la que se encuentra en contacto concordante. Su edad se determina en base

a relaciones estratigráficas perteneciendo al rango Hauteriviano-Barremiano.

Formación Río Tascadero (Neocomiano)

Corresponde a secuencias sedimentarias marinas litorales del Cretácico Inferior compuestas por calizas, calcarenitas, areniscas, margas y coquinas.

Formación Quebrada Marquesa (Aptiano-Albiano)

Fue definida por Aguirre y Egert (1962) como una secuencia continental, compuesta por conglomerados, brechas, lavas y una base formada por areniscas marinas. Se emplaza como una franja de orientación norte-sur al oeste de las formaciones Arqueros y Viñita, separada de la primera por una franja de intrusivos mesozoicos. En el sector de Ovalle la secuencia se encuentra constituida completamente por andesitas y su espesor varía de 1.200 a 2.500 m. Sobreyace a la formación Arqueros y su edad se ha determinado en base al contenido fósil presente en sus estratos, asignándose al Aptiano-Albiano. Subyace a la formación Viñita.

Formación Viñita (Albiano Superior-Cenomiano)

Fue definida por Aguirre y Egert (1965) como una unidad de origen volcánico continental constituida por conglomerados y areniscas volcánicas, lavas y tobas ignimbríticas traquíticas y riolíticas, lavas y brechas andesíticas y balsatos. Aflora en el sector oriental del área de estudio como una franja de orientación norte-sur. No se han encontrado fósiles en ella, por lo que su edad se ha establecido en base a su posición estratigráfica, perteneciendo al rango Albiano Superior-Senoniano. Sobreyace a la Formación Quebrada Marquesa y subyace a la Formación Los Elquinos. Se encuentra intruida por granodioritas, monzogranitos y tonalitas cenozoicas. Su espesor varía entre 1.500 a 1.800 m.

Pórfidos Andesíticos (Cretácico Superior)

Consiste en pórfidos andesíticos-dioríticos, dacíticos y riolíticos, que se ubican entre las cordilleras de la Costa y Principal de las regiones III y IV, asociados a secuencias volcánicas de edad similar. En la cuenca del río Limarí presenta su mayor extensión superficial al oriente del embalse Cogotí.

Complejos Volcánicos Ácidos (Cretácico Superior)

Corresponde a secuencias y complejos volcánicos ácidos, compuestos por ignimbritas, domos e intrusivos dacíticos a riolíticos, asociados a calderas de colapso. Afloran en el norte de la cuenca del Limarí.

Formación Los Elquinos (Cretácico Inferior- Cretácico Superior)

Corresponde a secuencias volcanosedimentarias continentales: del Cretácico Superior compuestas por rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas que se ubican en la Precordillera.

Intrusivos Mesozoicos (Cretácico Inferior Alto- Jurásico Superior)

Consisten en rocas graníticas del Jurásico y Cretácico que afloran en el sector occidental y centro sur del área de estudio, respectivamente. Consisten principalmente en granodioritas y monzogranitos.

Intrusivos Cenozoicos (Paleógeno-Neógeno)

Intrusivos del Oligoceno: Granodioritas, monzogranitos, tonalitas, dioritas de hornblenda y biotita; gabros. Se ubican en la Cordillera Principal de la región conformando el Plutón Río Las Cuevas.

Intrusivos del Eoceno: Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, dioritas y monzodioritas de piroxeno y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos. Se ubican en la Precordillera y Cordillera Principal de la región.

Intrusivos del Paloceno-Eoceno: Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita, dioritas, gabros y pórfidos riolíticos y dacíticos, asociados a mineralización de Cu-Au. Se ubican en la cordillera Principal de la región.

Depósitos sedimentarios no consolidados

Corresponden a unidades sedimentarias de baja compacidad, depositadas entre el Mioceno Superior y el Holoceno.

Depósitos aluviales, coluviales y de remoción e masa (Pleistoceno-Holoceno)

Son depósitos en general de poca extensión, ubicados formando abanicos al pie de quebradas tributarias al cauce principal. Corresponden a sedimentos heterogéneos con baja compacidad de gravas, arenas, limos y arcillas. Su permeabilidad es muy variable, pero en general no son atractivos para captaciones, debido a que estos sedimentos normalmente no se encuentran saturados.

Depósitos fluviales (Pleistoceno-Holoceno)

Estos depósitos se encuentran a lo largo de los cursos de agua principales, variando su profundidad desde una decena de metros en las cabeceras de los valles hasta alrededor de 300 metros en la depresión Ovalle-Silala. En los cauces principales esta unidad se presenta en la forma de un estrato de depósitos actuales de alta permeabilidad que sobreyace a depósitos más antiguos que poseen una permeabilidad menor:

- **Depósitos de terrazas fluviales subactuales (Pleistoceno-Holoceno):** corresponden a escalones modelados por el río a medida que éste ha ido profundizando su cauce. Están constituidas principalmente por bolones, grava y arenas, aunque localmente en algunos sondeos se ha encontrado lentes de arcilla con espesores variables (2 a 20 m.)
En el sector de Ovalle se han diferenciado, mediante la interpretación de fotografías aéreas, cinco niveles de terrazas, ubicadas en la ribera norte del río. El espesor estimado del relleno varía entre 120 a 200 m y la diferencia de alturas entre las terrazas alcanza extremos de 5 a 70 m.
- **Depósitos fluviales actuales (Holoceno):** Corresponden a sedimentos de baja compacidad ubicados en el lecho actual del río, atravesando los depósitos de terrazas fluviales. Consisten en bolones, gravas y arenas. Los clastos son redondeados a subredondeados, evidenciando transporte y retrabajo. Presentan algunos lentes de gravas y limos arcillosos.

Depósitos morrénicos, fluvioglaciares y glacialacustres (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a diamictos de bloques y matriz de limo-arcilla, gravas, arenas y limos, ubicados en la Cordillera Principal. No existen pozos ubicados en este tipo de depósitos.

Depósitos lacustres (Mioceno Medio Superior)

Consisten en areniscas rojas blandas, arenas arcillosas, arcillas pardas, margas y calizas margosas (a veces lenticulares). La conductividad hidráulica de estos sedimentos es muy baja. Se encuentran al sur de la localidad de Chalinga.

Depósitos de terrazas aluviales (Mioceno Inferior-Holoceno)

Corresponden a un manto aluvial de origen torrencial constituido por secuencias detríticas de bolones y gravas, poco cementadas, con intercalaciones de capas y lentes de arenas. Este manto está conformado principalmente por estratos de gravas y arenas con una componente arcillosa, alternados con algunos estratos de bolones, gravas y arenas; pueden encontrarse también capas de arcilla, aparentemente continuas entre pozos vecinos.

Se reconocen dos niveles principales de acumulación de sedimentos, uno inferior de edad miocena inferior y uno superior de edad probable miocena media superior. Sobre ellas se encuentra una capa de sedimentos constituida por secuencias similares a las presentes en las capas inferior de edad pliocena a holocena.

Estos depósitos se ubican sobre un substrato rocoso de paleotopografía irregular formando una terraza que cubre la depresión Ovalle-Silala, entre la ciudad de Ovalle por el este y la Carretera Panamericana por el oeste; y entre quebrada Seca por el norte hasta Chalinga por el sur.

La permeabilidad de estos depósitos es variable y es donde se ubica la mayor cantidad de sondajes.

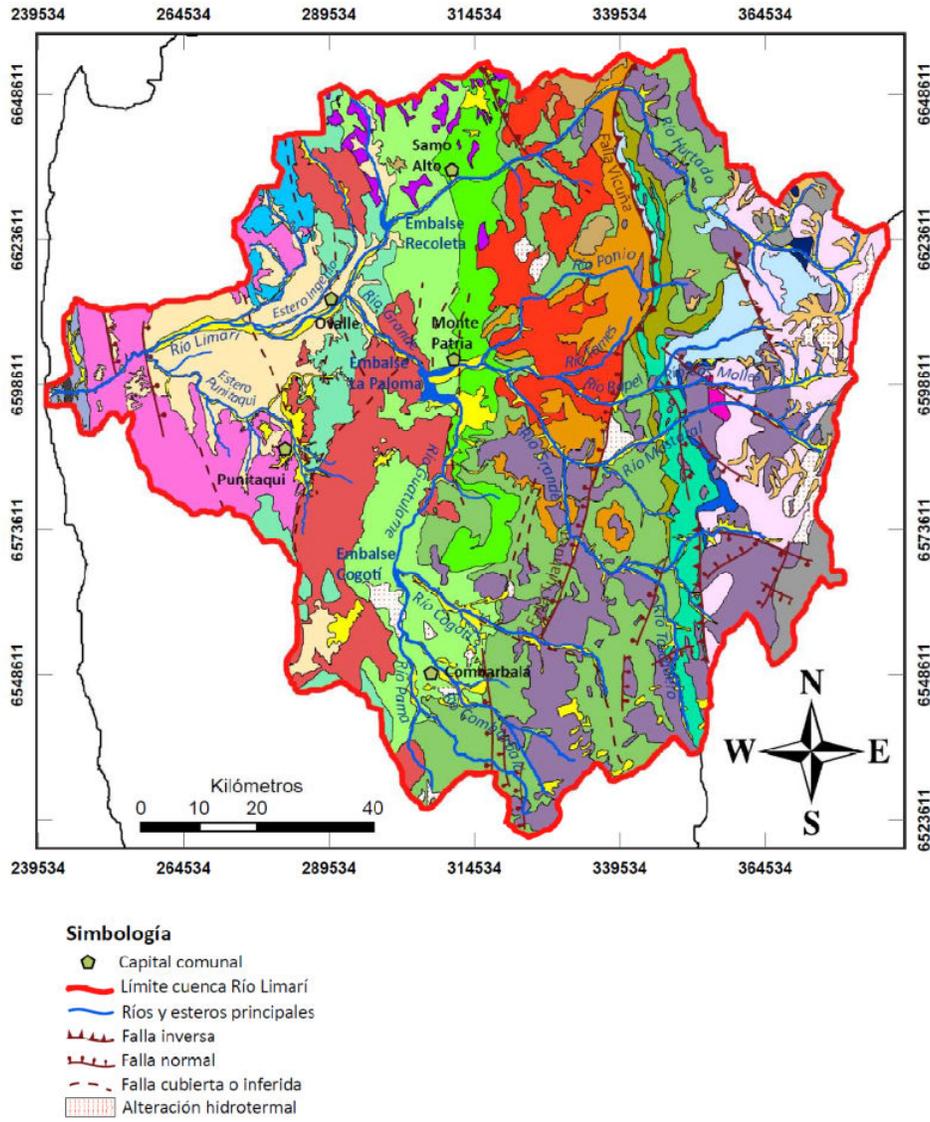


Figura 4.1: Mapa Geológico de la cuenca Del Limarí. Extraído de [4]

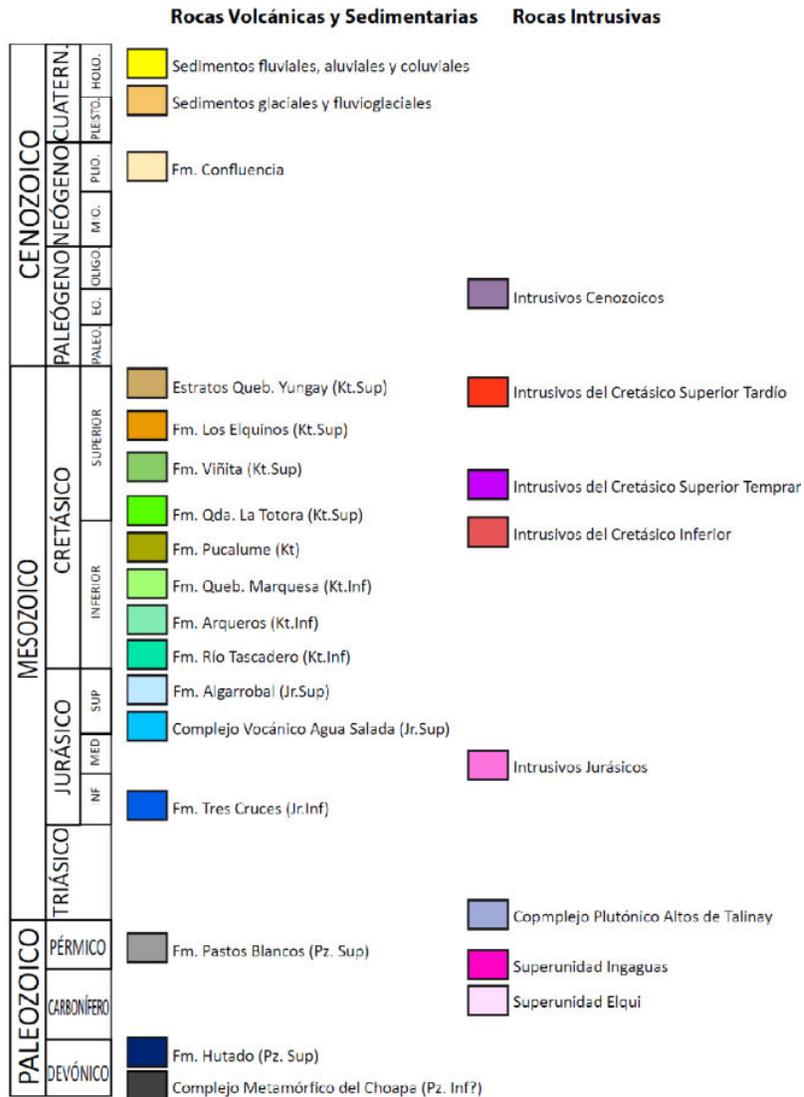


Figura 4.2: Simbología de 6.13. Extraído de [4]

Capítulo 5

Exploración Geofísica

5.1. Parámetros

A la hora de realizar sondeos TEM es necesario tener en consideración algunas especificaciones tales como: lugar donde se realizarán los sondeos, tipo de arreglo que se utilizará, cantidad de puntos que se van a medir, profundidad que se requiere explorar, resistividad que presenta el terreno y geología del terreno.

De lo anterior se puede configurar la medición, utilizando el tamaño y/o forma del *loop* transmisor acorde a la profundidad que se requiera explorar, la corriente, entre otros parámetros, como el número de vueltas de la bobina. Teniendo en cuenta lo anterior, hay mayor probabilidad de éxito en la obtención de datos para realizar una correcta interpretación.

Cuando se aplica el método TEM es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- En el caso que se necesite aumentar la profundidad de exploración se debe incrementar el momento magnético ($M=IAN$), donde I es la corriente que circula por el *loop*, A es el área del *loop* y N es el número de vueltas de la bobina o espira. Lo anterior se puede realizar de tres formas; La primera es aumentando la corriente, la segunda es aumentando el tamaño del *loop* transmisor y la tercera es aumentando el número de vueltas de la bobina.

1) Esto se puede realizar cuando nuestro *loop* transmisor no cumple con las necesidades del caso de estudio.

2) Se aplica en caso que las condiciones del terreno sean favorables.

3) Esto se lleva a cabo en casos donde por condiciones topográficas y restricción en el tamaño del *loop* transmisor no se alcance llegar a la profundidad deseada.

- Cables de alta tensión generan ruido en las mediciones por lo que se recomienda alejarse de esta fuente de ruido (ya que provoca error en las mediciones).

5.2. Zona de estudio

La campaña de adquisición de datos tuvo lugar en diferentes localidades de la Provincia de Limarí, cercanos a la ciudad de Ovalle, Combarbalá y Monte Patria. En la mayoría de los casos cercanos a los ríos cercanos existentes.

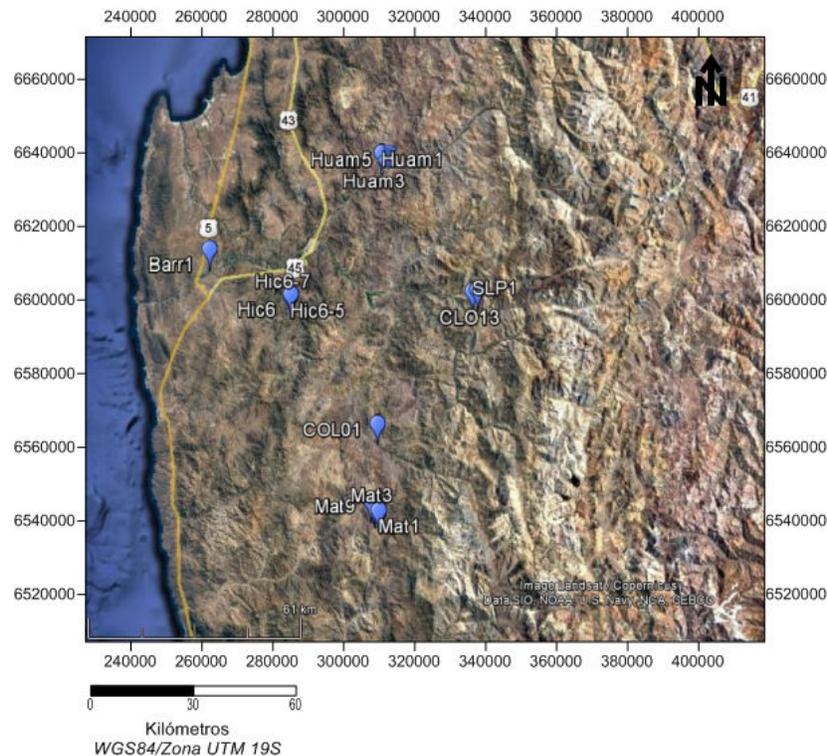


Figura 5.1: Localización de sondeos TEM realizados en la Provincia de Limarí (Imagen obtenida de Google Earth).

El nombre de cada sondeo TEM en el mapa tiene relación a la localidad en la cual se realizó la obtención de datos y al número de medición. Por ejemplo, en el caso de Barr1 es el sondeo TEM que se hizo en la localidad de Barraza, la cual se ubica a 6 kilómetros al suroeste de Ovalle. Los sondeos Huam fueron realizados en la localidad de Guampulla ubicada al noroeste de Ovalle. Mientras que los sondeos TEM Hic se realizaron en la localidad de Hinojo. Siguiendo esta lógica y más hacia la cordillera se encuentra el sondeo TEM SLP1 y CLO13 los cuales están asociados a las localidades de Sol de las Praderas y Los Clonquis respectivamente. En relación a COL01, este sondeo se realizó en La Colorada, una localidad cercana a la ciudad de Combarbalá. Por último los sondeos TEM que llevan por nombre Mat, corresponden a la localidad de Matancillo, la cual se ubica al sur de la ciudad de Combarbalá.

5.3. Adquisición de datos

La presente tesis se enmarca dentro de un estudio geofísico realizado por la consultora Geopacific E.I.R.L. durante Agosto y Septiembre del año 2016 en las Provincias de Limarí y Choapa, IV Región de Coquimbo.

Con el objetivo de conocer las variaciones de resistividad que presenta el subsuelo en diversas localidades de estas provincias, se utilizó el método de Transiente Electromagnético, TEM. Las mediciones fueron realizadas en 9 localidades con un total de 45

sondeos TEM. Se emplearon *loops* de 25×25 [m²] y de 13×13 [m²]. Se eligen sitios que posean un área igual ó mayor a 25×25 [m²], lejanos a torres de alta tensión ó cercos de alambre, ya que estos afectan a la calidad de los datos que se obtienen en las mediciones. En su gran mayoría los sondeos fueron realizados en terrenos de privados con previa autorización de los dueños o cuidadores y lugares cercanos a ríos.

Del total de mediciones TEM realizadas se seleccionan 21 sondeos, los cuales presentaban una mejor calidad en los datos, todos correspondientes a la Provincia de Limarí, los cuales se presentan en la siguiente tabla. La totalidad de mediciones realizadas en la campaña de adquisición se encuentran en el Anexo A.

Localidad	Nombre	Lazo Transmisor [m]	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Ventana	Time-Off [μ s]	Corriente [Amp]
Barraza	Barr1	25x25	261381	6606111	6	7	4
La Isla	COL01	25x25	309096	6561548	7	8	4
Sol de las Praderas	SLP1	25x25	334739	6596172	7	8	4
Los Clonquis 13	CLO13	12x12	336140	6596615	7	8	4
Valle Hermoso	Mat1	25x25	309860	6539085	7	8	4
Valle Hermoso	Mat3	25x25	310060	6538934	7	8	4
Valle Hermoso	Mat5	25x25	308769	6540366	7	8	4
Valle Hermoso	Mat7	25x25	308420	6541174	7	8	4
Valle Hermoso	Mat9	25x25	307625	6541620	7	8	4
Hinojo	Hic6	25x25	284219	6594678	7	8	4
Hinojo	Hic6-3	25x25	284087	6594443	7	8	4
Hinojo	Hic6-5	25x25	284144	6594362	6	7	4
Hinojo	Hic6-6	25x25	284201	6594038	6	7	4
Hinojo	Hic6-7	25x25	284138	6593982	6	7	4
Hinojo	Hic6-8	25x25	284045	6594502	7	8	4
Hinojo	Hic6-9	25x25	284066	6594651	7	8	4
Hinojo	Hic6-12	12x12	284101	6594607	7	8	4
Hinojo	Hic6-13	12x12	283996	6593616	7	8	4
Guampulla	Huam1	25x25	309066	6631645	6	7	4
Guampulla	Huam3	25x25	309052	6631677	7	8	4
Guampulla	Huam5	25x25	309002	6631778	7	8	4

Tabla 5.1: Tabla de sondeos que fueron procesados en la Provincia de Limarí.

5.4. Características del instrumento

El equipo utilizado para realizar los sondeos es el *TEM FAST-48* desarrollado por la compañía AEMR Ltd. Esta compuesto principalmente de una unidad transmisora y receptora, un PC manual o Palmtop y cable de circuitos (*loops*). Este instrumento utiliza para exploraciones electromagnéticas hasta los 500 m de profundidad.

Algunas área de aplicación son las siguientes:

- Búsqueda de depósitos minerales.
- Investigaciones hidrogeológicas.

- Investigaciones geológicas, previa a la construcción de estructuras.
- Investigaciones ecológicas.

5.4.1. Especificaciones técnicas

- Parámetro: TEM- FAST 48.
- Ventanas de tiempo: 48 espaciadas logarítmicamente.
- Interválo de tiempo: 4-16000 μ s.
- Corriente del transmisor: 1 ó 4 A.
- Tamaño del lazo: 5cm x 5cm - 500m x 500m.
- Rango de profundidad del sondeo: 1m - 500m.
- Batería interna: 12 V, 2-3 Ah.
- Filtros: 50/60 Hz.



(a) *loop* transmisor y receptor



(b) TEM- FAST 48



(c) *Data Logger*

Figura 5.2: Equipo utilizado en la realización de sondeos TEM.



(a) Equipo en terreno



(b) Localidad de Valle Hermoso



(c) *Sondeo en Barraza*



(d) *Sondeo en Sol de las Praderas*

Figura 5.3: Fotos de la campaña de adquisición de datos.

Capítulo 6

Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados de esta investigación. En primera instancia se presenta un resumen de la forma en que se realizó el tratamiento de datos, seguido de la presentación de modelos 1-D los cuales fueron obtenidos en localidades en donde se realizó sólo una medición, para finalizar este capítulo se presentan tres secciones geoelectricas las cuales fueron creadas a partir de múltiples sondeos TEM en algunas localidades.

6.1. Tratamiento de datos TEM

Para explicar como se realiza el procesamiento de datos, se dará un resumen sobre como tratar datos de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo obtenidos en la campaña de medición.

1. Los datos almacenados en el instrumento de medición (*TEM FAST-48*) se exportan mediante conexión USB a la computadora.
2. Una vez transpasados los datos en la computadora, son cargados en el programa que viene por defecto con el equipo, *Tem Research*, el cual es de uso comercial. Estos datos son mostrados en las coordenadas que fueron adquiridos, de no aparecer, se pueden agregar la ubicación.
3. Cada sondeo es interpretado de forma independiente utilizando programas matemáticos complejos, los cuales permiten obtener una relación entre resistividad y profundidad ajustando los valores de la curva del modelo a los valores obtenidos en el campo.
4. Obteniendo el modelo de la curva que mejor se ajusta se tiene un registro apropiado sobre la zona de estudio. Es importante tener noción técnica y experiencia ya que la interpretación de sondeos TEM es más compleja que la de otros métodos de exploración eléctrica.
5. Para los múltiples sondeos en algunas localidades se generó una tabla de datos los cuales fueron interpolados para así crear una grilla de datos y posteriormente ser representados. Para este desarrollo se utilizó el software *Surfer 11*.

6.2. Resultados Modelo 1-D

En la localidad de Barraza se realizó sólo un sondeo TEM utilizando un tamaño de *loop* de 25×25 m. los detalles para esta medición se encuentran en el anexo A. El procesamiento de la información se realizó con el software *Tem Research*, los resultados se encuentran en el anexo B. A continuación se presenta la imagen de planta (vista satelital) de la localización del sondeo.

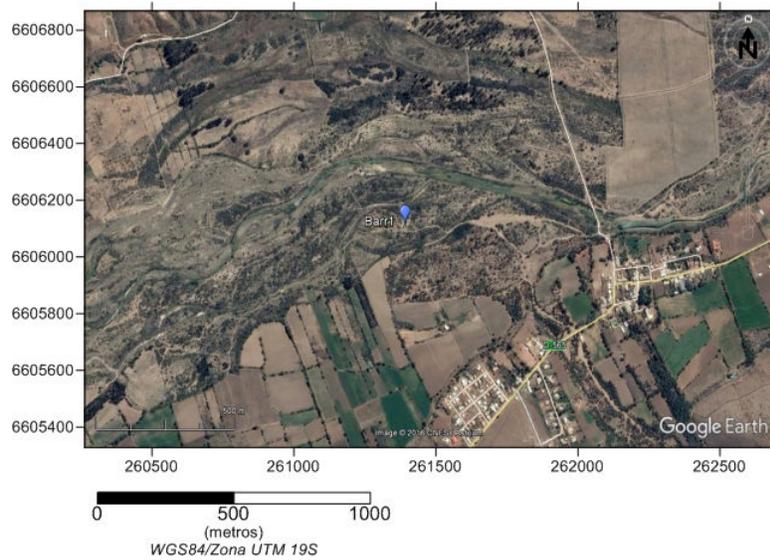


Figura 6.1: Imagen de planta para el sondeo TEM en la localidad de Barraza(Google Earth).

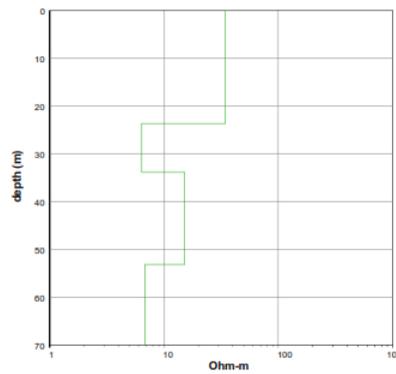


Figura 6.2: Modelo de resistividad para sondeo Barra1

Capa	Resistividad[Ω /m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	34	24	24
2	6.5	10	34
3	16	19	53
4	7	17	70

Tabla 6.1: Interpretación sondeo Barra1

Localidad de La Isla

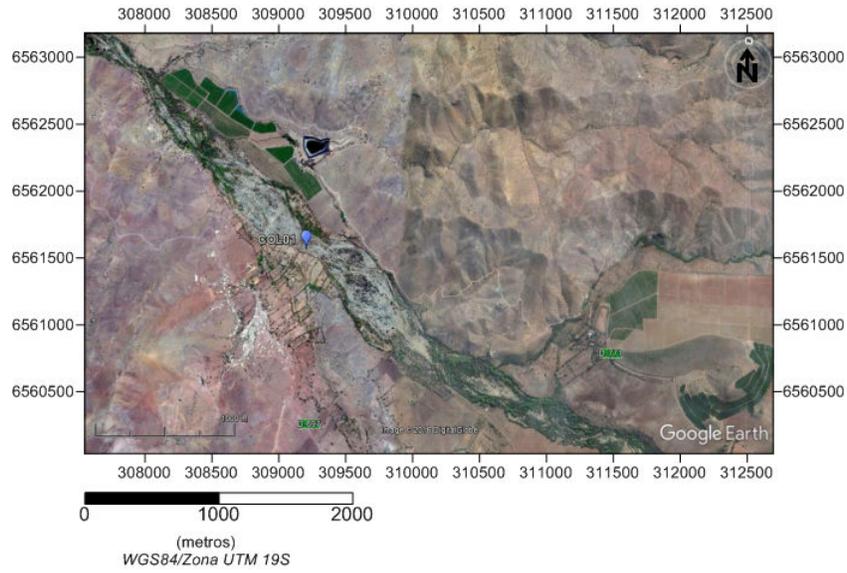


Figura 6.3: Imagen de planta para el sondeo TEM en la localidad de La Isla(Google Earth).

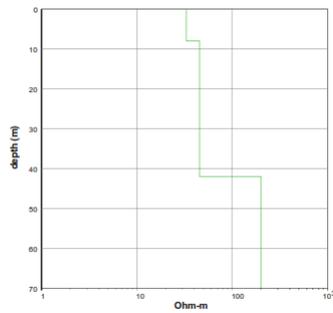


Figura 6.4: Modelo de resistividad para sondeo CLO01

En este sondeo se observa un aumento gradual de la resistividad, lo que denota la inexistencia de saturación por humedad. Los altos valores resistivos después de los 40 m. de profundidad se asocian a basamento rocoso. Las capas superficiales presentan bajas resistividades hasta los 44 m. Al no existir un contraste de resistividades en profundidad este sitio no es de interés en la presente tesis.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	32	8	8
2	45	36	44
3	200	26	70

Tabla 6.2: Interpretación sondeo CLO01

En la localidad de Sol de Las Praderas

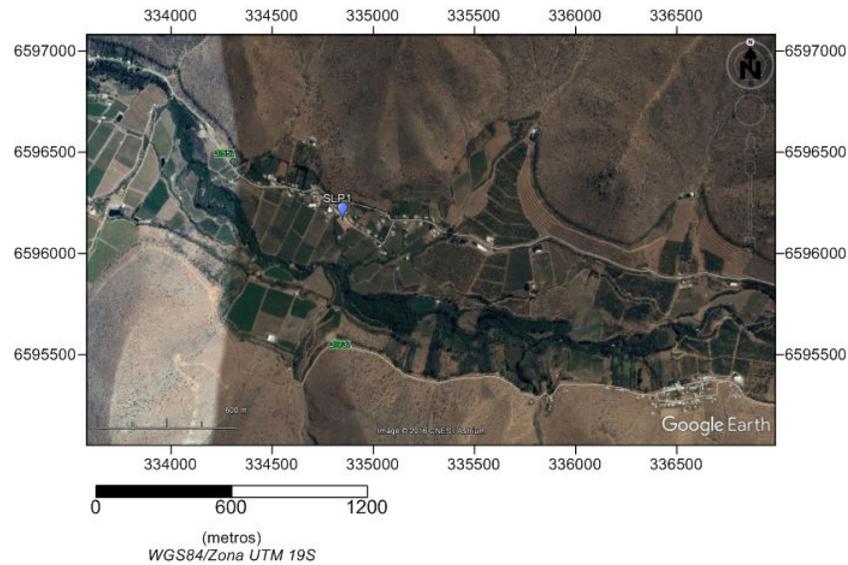


Figura 6.5: Imagen de planta para el sondeo TEM en la localidad de Sol de las Praderas(Google Earth).

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	37	7	7
2	200	25	32
3	26	15	47
4	30	16	63
5	100	7	70

Tabla 6.3: Interpretación sondeo SLP1

Los resultados obtenidos en esta localidad evidencia la presencia de una secuencia de alta resistividad a los 32 m. de profundidad lo cual es indicativo de presencia de roca. Subyaciendo a esta capa se encuentra una secuencia de baja resistividad con valores que van entre los 26 y 30 ohm-m de unos 30 m. de espesor. Bajo esta capa se encuentran nuevamente valores altos de resistividad, asociados también a presencia de roca.

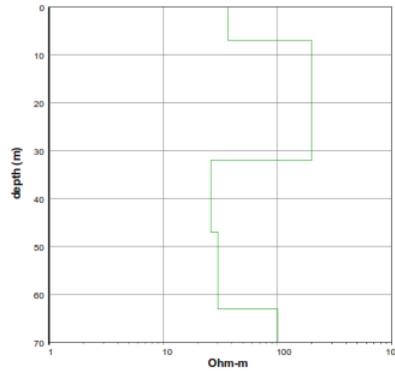


Figura 6.6: Modelo de resistividad para sondeo SLP1

6.3. Corte geoelectricos

De acuerdo a la posición en que se realizaron algunos sondeos TEM se construyeron secciones geoelectricas, las cuales permiten visualizar la geometría del subsuelo en cada caso. Los perfiles se presentan en cada imagen de planta asociada a la localidad donde se realizaron las mediciones.

6.3.0.1. Corte geoelectrico 1

Este perfil esta integrado por tres sondeos TEM, realizado en el sector de Guampulla, al noroeste de la ciudad de Ovalle. Tiene un total de 150 m. aproximadamente de largo y la dirección preferencial es noroeste-sureste.

Localidad	Nombre	Lazo Transmisor [m]	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Ventana	Time-Off [μ s]	Corriente [Amp]
Guampulla	Huam1	25x25	309066	6631645	6	7	4
Guampulla	Huam3	25x25	309052	6631677	7	8	4
Guampulla	Huam5	25x25	309002	6631778	7	8	4

Tabla 6.4: Hola.

La primera unidad presenta valores de resistividad baja y se distribuye de forma continua en el perfil, el mayor espesor se encuentra bajo el TEM Huam5 mientras que el menor espesor esta bajo el TEM Huam1. Para la segunda unidad se presentan valores de resistividad medios variando a alta, se presenta en el centro del perfil, por debajo de una capa de resistividad baja y por sobre una zona de alta resistividad, este posee un espesor variable. El mayor espesor se encuentra entre el TEM Huam5 y TEM Huam3, mientras que el menor espesor se encuentra bajo el TEM Huam5 y esta capa no se distribuye de forma continúa desapareciendo bajo el TEM Huam3 en dirección al TEM Huam1. La tercera unidad presenta valores de resistividad altos, los cuales se ubican bajo el TEM Huam1, siendo también la unidad que presenta un mayor espesor. Esta unidad no se distribuye de forma homogénea, presentando valores intermedios de resistividad bajo el TEM Huam3.

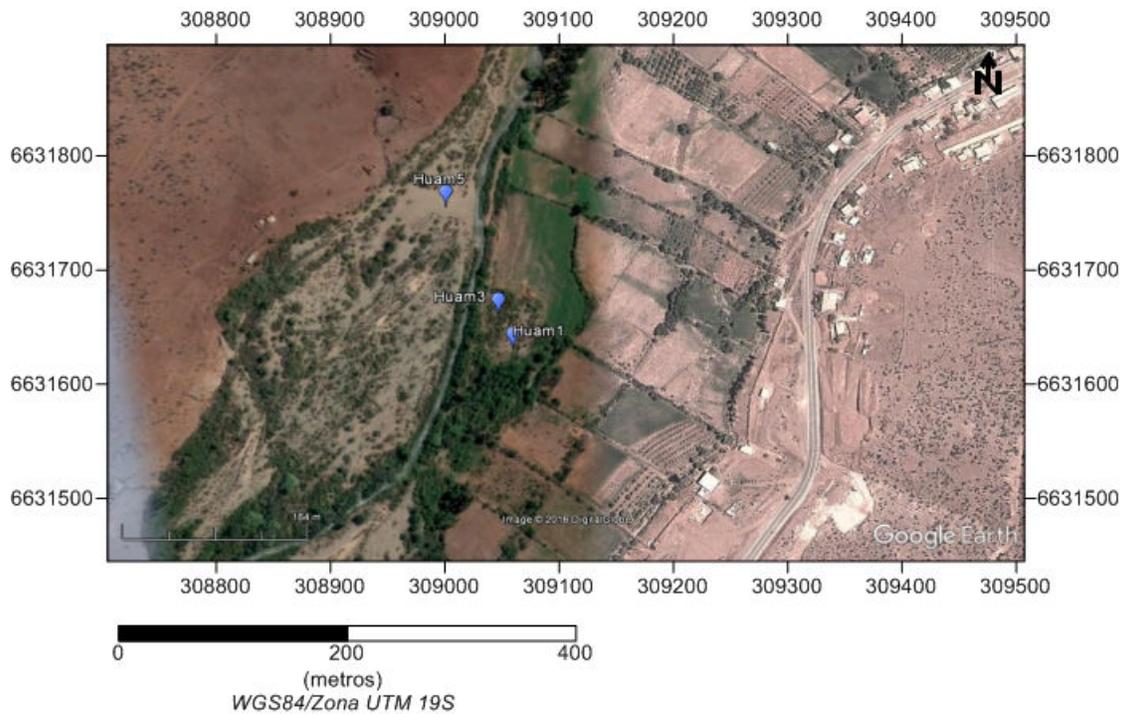


Figura 6.7: Imagen de planta para los sondeo TEM en la localidad de Guampulla(Google Earth).

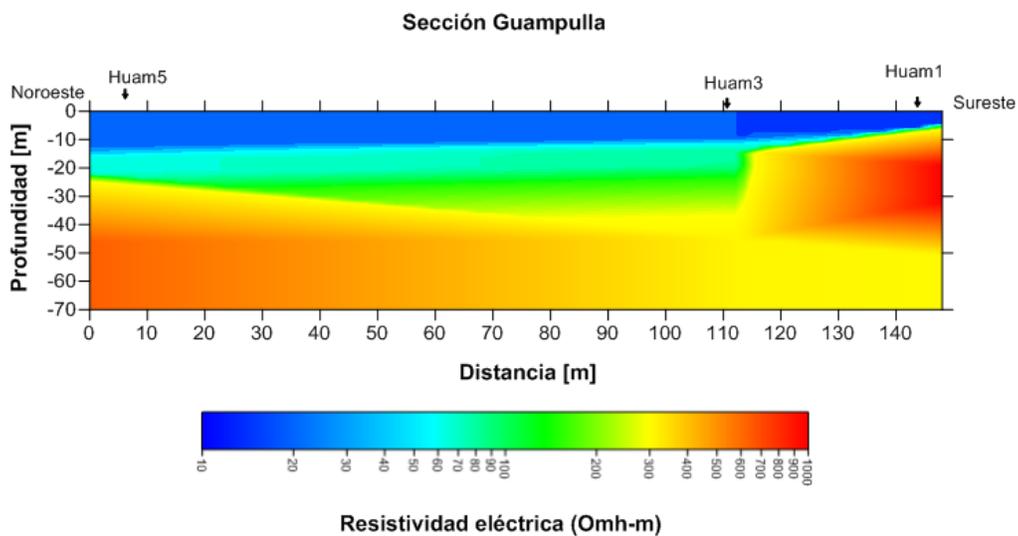


Figura 6.8: Corte geoelectrico 1, localidad de Guampulla

Los resultados obtenidos y representados para los sondeos Huam5, Huam3 y Huam1, evidencian la presencia de una secuencia superior que se distribuye hasta los 20 m. de profundidad bajo el sondeo Huam5 y cercano a los 6 m. en Huam1 con valores de resistividad que varían entre los 20 y 50 ohm/m. De la figura se aprecia la existencia de una capa delgada con resistividades cercanas a los 100 ohm/m que se asocian a sedimentos finos tipo arcilla, que se distribuyen entre los 20 y 30 m. Bajo esta secuencia, se encuentran valores de resistividad que alcanzan valores de 3000 ohm/m, los cuales pueden estar asociados a presencia de roca.

Para el sector de El Hinojo se realizaron varios sondeos TEM, debido a la cantidad de estos, se realizaron tres cortes geoelectricos para el sector con el objetivo de analizar los cambios de resistividad según la orientación de estos sondeos.

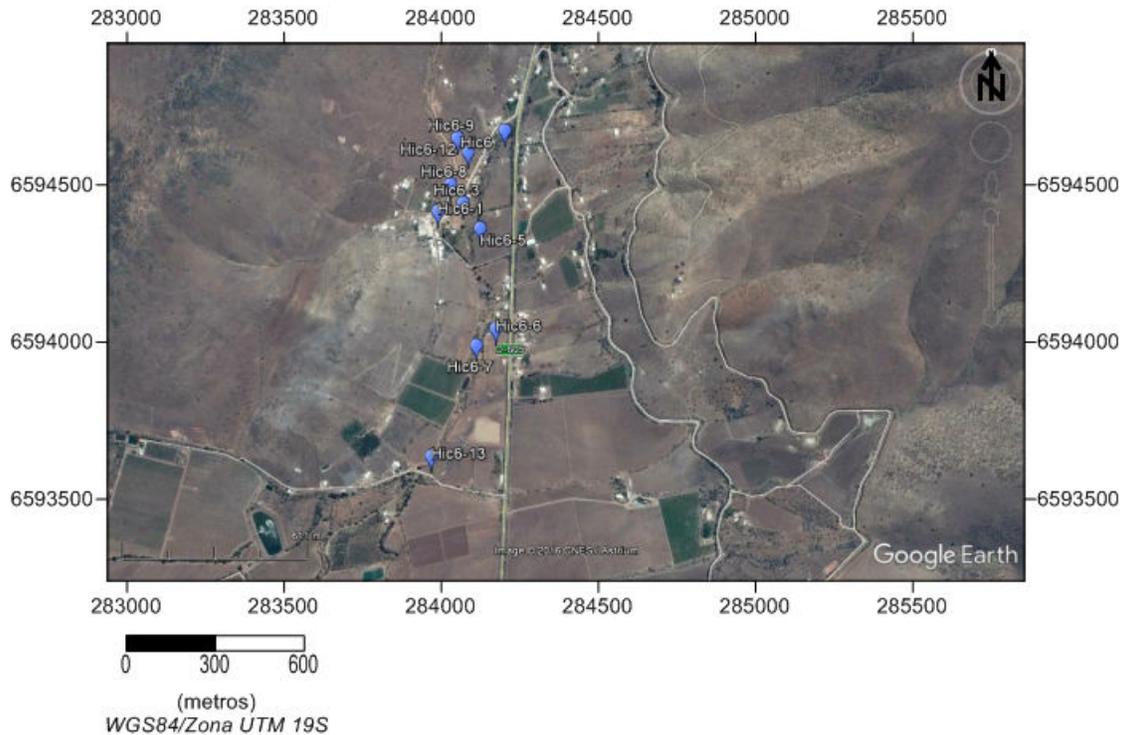


Figura 6.9: Imagen de planta para los sondeo TEM en la localidad de El Hinojo(Google Earth).

6.3.0.2. Corte geoelectrico 2.1

Este perfil está integrado por tres sondeos TEM realizados en el sector de El Hinojo, al sur de la ciudad de Ovalle. Tiene un total de 700 m. aproximadamente de largo. La dirección preferencial es en sentido Norte-Sur. Se interpretó hasta una profundidad del orden de los 70 m. Se presenta la primera unidad la cual posee baja resistividad que se distribuye aproximadamente de forma homogénea hasta los 35 m. de profundidad. Esta unidad presenta su mayor espesor bajo el TEM Hic6-5 el cual alcanza 70 m. los valores mas bajos se presentan entre los TEM Hic6-5 e Hic6-7. La segunda unidad presenta resistividad media-alta la cual tiene un espesor variable a lo largo del corte geoelectrico, es decir que no se distribuye de manera homogénea, es discontinua bajo el TEM Hic6-5. El mayor espesor se alcanza bajo el TEM Hic6-5 llegando a los 20 m. aproximadamente. La tercera unidad presenta valor altos de resistividad, al igual que la unidad anterior no se distribuye de forma homogénea, los valores más altos de resistividad se encuentran bajo el TEM Hic6. Bajo este mismo TEM se encuentra el mayor espesor de la unidad alcanzando los 25 m. aprox

Para los sondeos Hic6, Hic6-5 y Hic6-7 se evidencian la presencia de una secuencia superior que se distribuye hasta los 40 m. de profundidad bajo los sondeos Hic6 y Hic6-7. En el caso de Hic6-5 esta llega hasta los 70 m. presentando resistividades que varían entre los 20 y 65 ohm/m, lo cual puede ser indicativo de contenidos finos y presencia de arenas.

Cercano a los 45 y hasta los 70 m. se encuentran dos secuencias con valores que van desde los 100 hasta los 800 ohm/m aprox, los cuales pueden estar asociados a la presencia de roca.

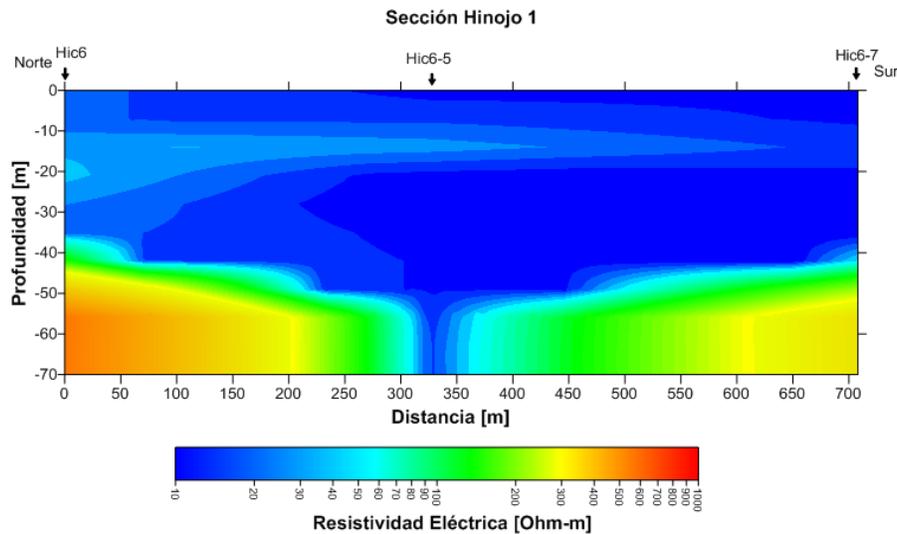


Figura 6.10: Corte geoelectrico 2.1, localidad de El Hinojo

6.3.0.3. Corte geoelectrico 2.2

Este perfil esta integrado por cuatro sondeos TEM, realizados en el sector de El Hinojo, al sur de la ciudad de Ovalle. Tiene un total de 650 m. aproximadamente de largo. La dirección preferencial es en sentido NO-SE. Se interpretó hasta una profundidad del orden de los 70 m.

La primera unidad está asociada a baja resistividad, se distribuye de forma homogénea a través del corte geoelectrico alcanzando el mayor espesor bajo el TEM Hic6-6. Su espesor mínimo es cercano a los 20 m. bajo el TEM Hic6-8. La segunda unidad es de resistividad media-alta, no se distribuye de forma homogénea. Se presenta bajo los TEM Hic6-9, Hic6-8 e Hic6-5. Los mayores valores de esta unidad estan bajo el TEM Hic6-9 y el mayor espesor se logra visualizar bajo el TEM Hic6-8 alcanzando los 50 m. aproximadamente, mientras que el espesor mínimo(el cual es cercano a los 25 m) se logra alcanzar bajo el TEM Hic6-5. La tercera unidad es de alta resistividad y se logra visualizar bajo el TEM Hic6-9 y también bajo el TEM Hic6-5. El mayor valor espesor es cercano a los 20 m. bajo el TEM Hic6-9, en donde también alcanza el mayor valor de resistividad.

Bajo estos sondeos se presenta una sección continua hasta cerca de los 40 m. de profundidad, con valores que van entre los 10 y 50 ohm/m a excepción del sondeo Hic6-8 en el cual se encuentran resistividades cercanas que van desde los 50 hasta los 90 ohm/m. Para la primera sección los valores de resistividad se pueden asociar a arenas y a contenidos finos. Se aprecia una sección en profundidad la cual presenta valores que fructúan entre los 100 hasta los 600 ohm/m que se asocian a presencia de roca, esto bajo el sondeo Hic6-9.

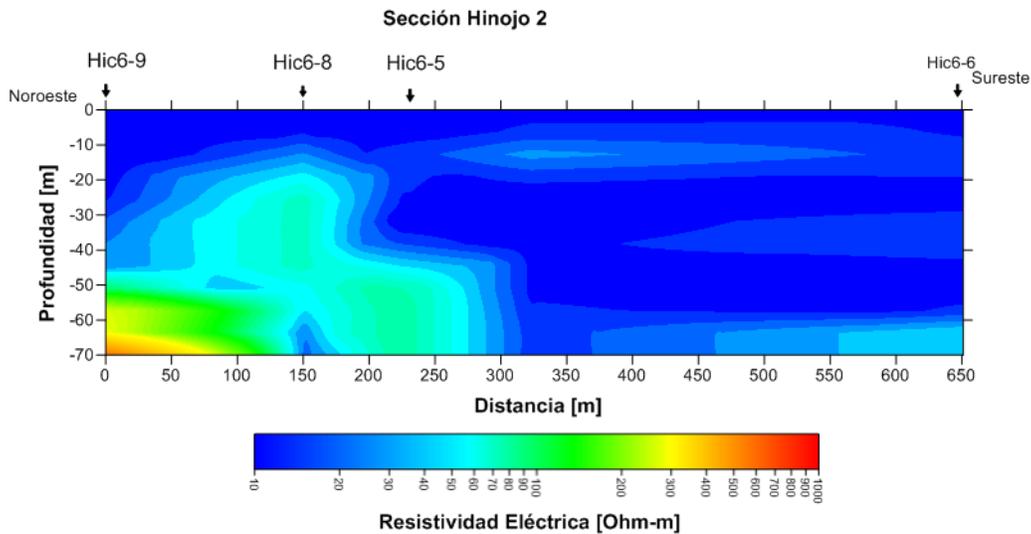


Figura 6.11: Corte geoelectrico 2.2, localidad de El Hinojo

6.3.0.4. Corte geoelectrico 2.3

Este perfil está integrado por tres sondeos TEM, realizado en el sector de El Hinojo, al sur de la ciudad de Ovalle. Tiene un total de 320 m. aproximadamente de largo. La dirección preferencial es en sentido NO-SE. Se interpretó hasta una profundidad del orden de los 70 m.

La primera unidad corresponde a resistividades bajas, la cual no se distribuye de forma homogénea a lo largo del corte geoelectrico. Presentan su mayor espesor bajo el TEM Hic6 en donde alcanza los 70 m. de profundidad. El menor espesor se encuentra bajo el TEM Hic6-3 en donde alcanza unos 40 m. aproximadamente. Los valores de resistividad más bajos se encuentran cerca de la superficie entre los TEM Hic6-8 e Hic6-3. También es posible observar estos valores bajo el TEM Hic6 entre los 20 y 30 m de profundidad y cerca de los 50 m. La segunda unidad corresponde a valores de resistividad media, encontrándose bajo el TEM Hic6-8. Aquí alcanza su mayor espesor cercano a los 30 m. Esta unidad no se distribuye de forma homogénea en el corte geoelectrico, ya que solo aparece bajo los TEM Hic6-8 e Hic6-3, en este último alcanza también un espesor considerable y con valores más altos que bajo el Hic6-8.

En este perfil compuesto por Hic6-9, Hic6-8 y Hic6-3 se presenta resistividades que van desde los 5 hasta los 55 ohm/m bajo los sondeos alcanzando una profundidad cercana a los 60 m. bajo Hic6-9 y cercana a los 20 m. bajo Hic6-8. En relación al sondeo Hic6-3 este alcanza los 40 m. de profundidad. Estos valores se pueden asociar a presencia de arenas con contenido de humedad en los casos donde la resistividad es muy baja, es decir cercana a los 5 ohm/m. Los valores que son cercanos a los 100 ohm/m están asociados a la presencia de roca bajo el sondeo Hic6-3.

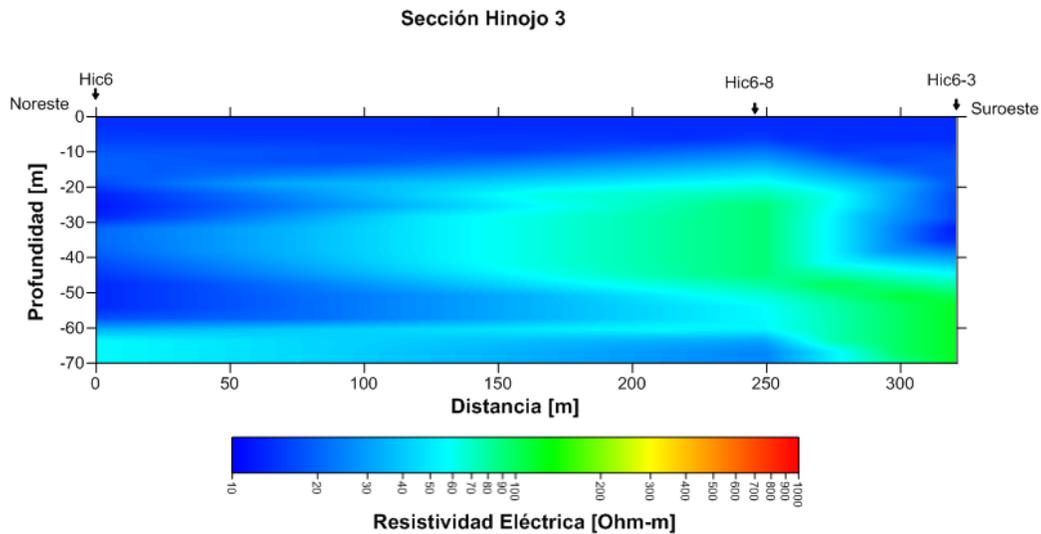


Figura 6.12: Corte geoelectrico 2.3, localidad de El Hinojo

6.3.0.5. Corte geoelectrico 3

Este perfil está integrado por cinco sondeos TEM, realizados en el sector de Valle Hermoso, al sur de la ciudad de Combarbalá. Tiene un total de 3700 m. aproximadamente de largo. La dirección preferencial es NO-SE.

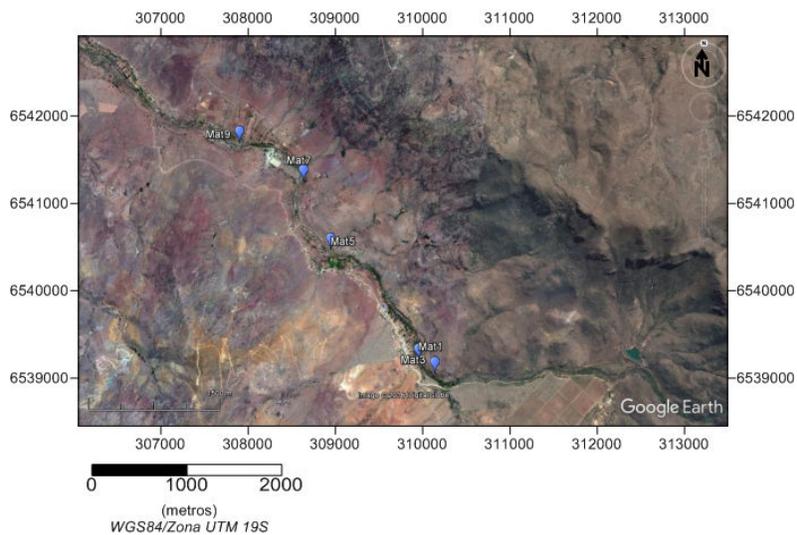


Figura 6.13: Corte geoelectrico 3, localidad de Valle Hermoso

La primera unidad presenta valores de resistividad baja teniendo un mayor espesor bajo el TEM Mat9, mientras que el espesor mínimo se encuentra bajo el TEM Mat5. Esta unidad reaparece bajo el TEM Mat1 hasta Mat3. Entre el TEM Mat9 y Mat5 cerca de los 65 m. de la unidad presenta una continuidad. La segunda unidad presenta valores de resistividad media a alta (es la unidad que presenta el mayor espesor) llegando a casi los 65 m. cerca del TEM Mat5 y el TEM Mat1. Esta unidad abarca casi la totalidad del corte geoelectrico, desde el TEM Mat7 hasta el TEM Mat3. Bajo el TEM Mat1 se encuentra el valor mínimo de esta capa el cual es

cercano a los 40 m. La tercera unidad presenta una resistividad alta y no se distribuye de forma homogénea. Se puede apreciar bajo el TEM Mat5, en el cual se encuentra el mayor valor de resistividad del corte geoelectrico y también el mayor espesor de la unidad, llegando a los 20 m. Bajo el TEM Mat1 se encuentra una zona de alta resistividad también pero que presenta un menor espesor y se ubica a una mayor profundidad.

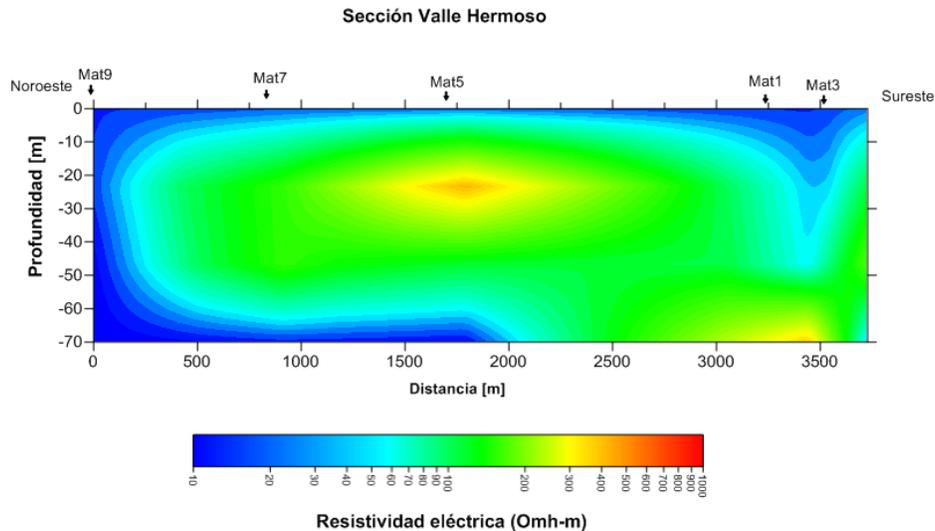


Figura 6.14: Corte geoelectrico 3, localidad de Valle Hermoso

En los sondeos Mat9, Mat7 y Mat5 se presenta una zona entre los 60 y los 70 m. de profundidad, con valores de resistividad que van desde los 4 hasta los 44 ohm/m, estos valores pueden estar asociados a arenas con alto contenido de humedad, por lo tanto sería una zona de alta saturación de agua para los valores cercanos a los 4 ohm/m a baja saturación de agua en el caso de valores de resistividad cercanos a los 44 ohm/m. Bajo los sondeos Mat7 y Mat5 se destaca una zona de alta resistividad mayor a los 100 ohm/m lo cual se puede deber a la presencia de roca al igual que cercano a los 70 m. bajo el sondeo Mat1.

Capítulo 7

Discusión

En relación a las localidades en donde se realizó sólo un sondeo por lugar, las cuales son Barraza, La Isla y Sol de las Praderas se hace énfasis en la primera y la última localidad, lo anterior debido a que el sondeo TEM CLO01 presenta altos valores de resistividad, los cuales aumentan con la profundidad descartando así la presencia de una zona de saturación de humedad.

Respecto a Barr1 (sondeo realizado en Barraza) presenta una zona de alta saturación lo que condice con la geología del sitio de sondeo, esto corresponde a depósitos aluviales. Los valores de resistividad obtenidos estarían asociados a la existencia de agua alrededor de los 34 m. aprox.

Al realizar sólo una medición en este lugar es imposible poder considerar una delimitación de la zona que presenta alta saturación, debido a que se alcanzaron 70 m. en este sondeo y los valores bajos de resistividad se mantienen hasta esa profundidad. En este caso sería necesario aumentar el tamaño del *loop* para conocer a que profundidad se encuentra la roca y a la vez realizar más sondeos en lugares cercanos sólo si las condiciones del terreno lo permiten y así hacer una aproximación de la napa subterránea.

Cabe destacar la presencia del Río Limarí a metros del lugar del sondeo por lo que estos valores se podrían asociar a que el posible acuífero existente en la zona podría utilizar a este río como recarga; Y a la vez, se identifica la presencia de un pozo perteneciente a la compañía sanitaria Aguas Del Valle, del cual se obtiene agua potable para la comunidad.

Como antecedente, el material de relleno fluvial de esta cuenca está constituido por clastos redondeados, localizados dentro de una matriz areno-limosa. El relleno es superior a los 100 m. y el relleno fluvial actual posee un espesor que varía entre los 10 y 20 m. en esta zona, constituyendo un horizonte acuífero de buena permeabilidad, dicha información ha sido obtenida a través de las perforaciones realizadas en la construcción de pozos en la cuenca.

Para el sondeo TEM SLP1, también es necesario realizar más mediciones en lugares cercanos para así determinar la dirección y forma de la napa subterránea. Al igual que en el caso de Barr1, cercano a este lugar se encuentra construido un pozo, que pertenece a la compañía sanitaria Aguas del Valle.

De los cinco cortes geoelectrónicos que se realizaron en las localidades de Guampulla, Hinojo y Valle Hermoso, tan sólo uno es de interés en esta tesis. Las secciones geoelectrónicas de Guampulla e Hinojo no presentan contrastes resistivos interesantes y en lo que respecta al método utilizado es preponderante. El corte geoelectrónico de la localidad de Valle Hermoso, presenta una zona de interés entre los 60 y 70 m. de profundidad el cual fue mostrado en el capítulo de resultados.

En los sondeos realizados con *loop* de tamaño 25×25 m. se presenta una mejor calidad en los datos que en los desarrollados con *loop* de 13×13 m. por lo que se optó trabajar con los datos obtenidos de los primeros, los cuales además de la calidad de datos, logran alcanzar una mayor profundidad.

El sondeo CLO13 realizado en la localidad de Los Clonquis, no fue procesado debido a la cantidad de ruido presente en las mediciones. La curva de resistividad aparente correspondiente a este sondeo TEM se encuentra en el anexo B.

Capítulo 8

Conclusiones

- De acuerdo al objetivo principal planteado en la presente tesis, la utilización de este método para la búsqueda de agua subterránea es efectivo pero en ambientes en donde exista contraste de resistividad entre las diferentes capas del subsuelo. La profundidad y el área que ocupa el recurso hídrico es posible aproximarlas siempre y cuando exista una zona de contraste entre las resistividades y el tamaño del *loop* esté acorde a la profundidad de dicho contraste, es decir, que este cambio de resistividad sea posible visualizarlo en los modelos de resistividad en función de la profundidad. Por último, de acuerdo a lo investigado los valores para el agua dulce están bajo los 40 ohm-m. aunque es más común expresar estos valores en niveles de saturación de agua. En virtud de lo anterior, el método del transiente electromagnético es útil para la exploración de aguas subterráneas.
- El objetivo específico de la obtención de perfiles se logró ajustando las curvas de resistividad aparente. Con este ajuste es posible obtener los modelos de resistividad en función de la profundidad, cabe señalar que en este proceso se debe ser riguroso ya que para cada ajuste existen diferentes modelos que entrega el software, por lo que es necesario tener conocimiento avanzando de geología del área de estudio. Los modelos obtenidos y utilizados en esta tesis se encuentran en el capítulo de resultados y en el anexo B.
- A partir de la interpolación de datos donde se realizaron sondeos múltiples se logró crear secciones geoeléctricas.
- Sobre las bases de las ideas expuestas, el método del transiente electromagnético va a ser efectivo dependiendo del lugar en el cual se aplique ya que diversos factores influyen en su óptima aplicación tales como el ambiente geológico, forma del terreno, existencia de cables de alta tensión, entre otros. Se destaca lo práctico y rápido que es el montaje entre dos personas se pueden realizar campañas de medición con *loops* de hasta 50×50 m. También posee ventaja frente a métodos eléctricos debido a que para alcanzar grandes profundidades requiere menos espacio superficial.

- Respecto a este método electromagnético en particular, esta tesis pretende difundir el conocimiento del método del transiente electromagnético en el dominio del tiempo, el cual es utilizado ampliamente en la búsqueda de agua subterránea hoy en día en diferentes países como Rusia y Estados Unidos. Esta técnica está muy desarrollada y aceptada en la comunidad científica internacional, basándose en el estudio de las variaciones de resistividad en el subsuelo, imponiéndose sobre otros métodos como el SEV por sus ventajas técnicas y logísticas.
- Es importante hacer notar lo esencial que es una buena planificación antes de realizar los sondeos, definiendo los objetivos a buscar, lugares donde se van a realizar y características geológicas para así definir el tamaño del *loop*, tiempo de integración entre otros aspectos. Haciendo lo anterior se puede realizar una mejor adquisición de datos de forma eficaz que es lo importante para el posterior procesamiento.
- Como cualquier técnica geofísica la efectividad de este método va a depender de la existencia de contrastes de resistividades en el subsuelo. Por lo que su aplicación va a tener sentido sólo si se pretende localizar contactos subhorizontales entre unidades litológicas entre las cuales existe contraste en sus respectivos valores de resistividad.
- A modo de trabajo a futuro, se propone aplicar la misma metodología pero con *loops* de mayor tamaño para así lograr una mayor profundidad de estudio y también aumentar el número de mediciones.

8.1. Recomendaciones

- Tener en cuenta las fuentes de ruido las fuentes y objetos metálicos cercanos al momento de realizar una medición, ya que estos generan gran cantidad de ruido.
- Se sugiere correlacionar estos datos con estudios previos en la zona de estudio. También con pozos geológicos o estratigráficos, para esto es necesario contactarse con la Dirección General de Aguas.
- Para finalizar se recomienda profundizar más el conocimiento y aplicaciones de este método de exploración geofísica para futuras investigaciones.

Bibliografía

- [1] Barrocu, G. and Ranieri, G. (2000). Tdem: A useful tool for identifying and monitoring the fresh-saltwater interface. In *16th Salt Water Intrusion Meeting, Poland*, volume 12, pages 1–7.
- [2] Castillo, L. (2012). Estudio de factibilidad hidrogeológica en la porción sur oriente de la ciudad de san juan del río. gro. con la aplicación de métodos electromagnéticos. *Tesis de pregrado (Inédito), Universidad Autónoma de México, Departamento de Ingeniería.*
- [3] DGA (2016). Pronóstico de disponibilidad hídrica 2016-2017.
- [4] Espinoza, M. (2005). Vulnerabilidad de los acuíferos en los ríos limarí y maule mediante las metodologías god y bgr. *Memoria de título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología.*
- [5] Grant, F. S. and West, G. F. (1965). *Interpretation theory in applied geophysics*. McGraw-Hill Book.
- [6] Harrington, R. F. (1961). *Time-harmonic electromagnetic fields*. McGraw-Hill.
- [Luna] Luna, C. La exactitud del problema directo de sondeos electromagnéticos transitorios. *receptor (Rx)*, 1:10A.
- [8] McNeill, J. (1994). *Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding*. Geonics.
- [9] Migliano, E. (2013). Análisis de los valores de resistividad verdadera obtenidos a partir del método transitorio electromagnético en el dominio del tiempo. *Tesis de pregrado (Inédito), Universidad Autónoma de México, Departamento de Ingeniería.*
- [10] Nabighian, M. N. (1991). Time domain electromagnetic prospecting methods. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 2(part A):427–509.
- [11] Navarro, R. (2006). Aplicación de pruebas electromagnéticas en el dominio del tiempo tдем para caracterización de recursos hídricos en venezuela. *Tesis de pregrado (Inédito), Universidad Simón Bolívar.*
- [12] Palacky, G. (1988). Resistivity characteristics of geologic targets. *SEG*, 1:53–129.
- [13] Research, A. E. (2007). *TEM-RESearcher manual*. AEMR Company, The Netherlands, 7 edition.
- [14] Romero, H., Rovira, A., and Véliz, G. (1988). Geografía iv región de coquimbo. *Colección de Geografía de Chile, Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.*

- [15] Salazar, P. (2012). Avances en el conocimiento de la relación aguas superficiales-aguas subterráneas en la cuenca del limarí, región de coquimbo. *Proyecto de memoria de título (Inédito), Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería Civil Ambiental.*
- [16] Spies, B. R. and Eggers, D. E. (1986). The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods. *Geophysics*, 51(7):1462–1471.
- [17] Stratton, J. (1941). *Electromagnetic theory.*
- [18] Ward, S. H. and Hohmann, G. W. (1988). Electromagnetic theory for geophysical applications. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 1(3):131–311.

Capítulo 9

Anexo

9.1. Anexo A

En el presente Anexo se ilustran el total de sondeos realizados durante la campaña de adquisición de datos correspondientes a la Provincia de Limarí y de Choapa

Localidad	Nombre	Lazo Transmisor [m]	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Ventana	Time-Off [μ s]	Corriente [Amp]
Barraza	Barr1	25x25	261381	6606111	6	7	4
Barraza	Barr2	25x25	261381	6606111	7	8	4
Sol de las Praderas	SLP1	25x25	334739	6596172	7	8	4
Los Clonquis 13	CLO13	12x12	336140	6596615	7	8	4
La Isla	COL01	25x25	309096	6561548	7	8	4
Valle Hermoso	Mat1	25x25	309860	6539085	7	8	4
Valle Hermoso	Mat2	25x25	309860	6539085	7	8	1
Valle Hermoso	Mat3	25x25	310060	6538934	7	8	4
Valle Hermoso	Mat4	25x25	310060	6538934	7	8	1
Valle Hermoso	Mat5	25x25	308769	6540366	7	8	4
Valle Hermoso	Mat6	25x25	308769	6540366	7	8	1
Valle Hermoso	Mat7	25x25	308420	6541174	7	8	4
Valle Hermoso	Mat8	25x25	308420	6541174	7	8	1
Valle Hermoso	Mat9	25x25	307625	6541620	7	8	4
Hinojo	Hic6	25x25	284219	6594678	7	8	4
Hinojo	Hic6-1	12x12	284006	6594414	7	8	4
Hinojo	Hic6-2	12x12	284006	6594414	7	8	1
Hinojo	Hic6-3	25x25	284087	6594443	7	8	4
Hinojo	Hic6-4	12x12	284087	6594443	7	8	4
Hinojo	Hic6-5	25x25	284144	6594362	6	7	4
Hinojo	Hic6-6	25x25	284201	6594038	6	7	4
Hinojo	Hic6-7	25x25	284138	6593982	6	7	4
Hinojo	Hic6-8	25x25	284045	6594502	7	8	4
Hinojo	Hic6-9	25x25	284066	6594651	7	8	4
Hinojo	Hic6-10	25x25	284066	6594651	7	8	1
Hinojo	Hic6-11	25x25	284066	6594651	7	8	4
Hinojo	Hic6-12	12x12	284101	6594607	7	8	4
Hinojo	Hic6-13	12x12	283996	6593616	7	8	4
Hinojo	Hic6-14	12x12	283996	6593616	7	8	1
Guampulla	Huam1	25x25	309066	6631645	6	7	4
Guampulla	Huam2	25x25	309066	6631645	7	8	1
Guampulla	Huam3	25x25	309052	6631677	7	8	4
Guampulla	Huam4	25x25	309097	6631626	7	8	4
Guampulla	Huam5	25x25	309002	6631778	7	8	4

Tabla 9.1: Parámetros de adquisición, Provincia de Limarí.

Localidad	Nombre	Lazo Transmisor [m]	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Ventana	Time-Off [μ s]	Corriente [Amp]
Asiento Viejo	AV1	12x12	300600	6502789	7	8	4
Asiento Viejo	AV2	12x12	300600	6502789	7	8	1
Asiento Viejo	AV3	12x12	300600	6502761	7	8	4
Asiento Viejo	AV4	12x12	300744	6502929	7	8	4
Asiento Viejo	AV5	12x12	300744	6502929	7	8	1
Asiento Viejo	AV6	25x25	299297	6501804	7	8	4
Asiento Viejo	AV7	12x12	299339	6501856	7	8	4
Asiento Viejo	AV8	12x12	298698	6501371	7	8	4
Asiento Viejo	AV9	25x25	298067	6501218	7	8	4
Asiento Viejo	AV10	12x12	298094	6500696	7	8	4
Rincón Viejo	Rin1	12x12	299683	6466666	7	8	4

Tabla 9.2: Parámetros de adquisición, Provincia de Choapa.

Localidad	Nombre	Lazo Transmisor [m]	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Ventana	Time-Off [μ s]	Corriente [Amp]
Barraza	Barr1	25x25	261381	6606111	6	7	4
La Isla	COL01	25x25	309096	6561548	7	8	4
Sol de las Praderas	SLP1	25x25	334739	6596172	7	8	4
Los Clonquis 13	CLO13	12x12	336140	6596615	7	8	4
Valle Hermoso	Mat1	25x25	309860	6539085	7	8	4
Valle Hermoso	Mat3	25x25	310060	6538934	7	8	4
Valle Hermoso	Mat5	25x25	308769	6540366	7	8	4
Valle Hermoso	Mat7	25x25	308420	6541174	7	8	4
Valle Hermoso	Mat9	25x25	307625	6541620	7	8	4
Hinojo	Hic6	25x25	284219	6594678	7	8	4
Hinojo	Hic6-3	25x25	284087	6594443	7	8	4
Hinojo	Hic6-5	25x25	284144	6594362	6	7	4
Hinojo	Hic6-6	25x25	284201	6594038	6	7	4
Hinojo	Hic6-7	25x25	284138	6593982	6	7	4
Hinojo	Hic6-8	25x25	284045	6594502	7	8	4
Hinojo	Hic6-9	25x25	284066	6594651	7	8	4
Hinojo	Hic6-12	12x12	284101	6594607	7	8	4
Hinojo	Hic6-13	12x12	283996	6593616	7	8	4
Guampulla	Huam1	25x25	309066	6631645	6	7	4
Guampulla	Huam3	25x25	309052	6631677	7	8	4
Guampulla	Huam5	25x25	309002	6631778	7	8	4

Tabla 9.3: Lista de puntos que fueron procesados en Provincia de Limarí.

9.2. Anexo B

En este anexo se muestran las curvas de resistividad aparente obtenidas para cada uno de los sondeos TEM que fueron procesados junto con el modelo de resistividad en función de profundidad asociado y también con una tabla indicando el número de capas, la resistividad asociada, su espesor y su profundidad.

9.2.1. Localidad Barraza

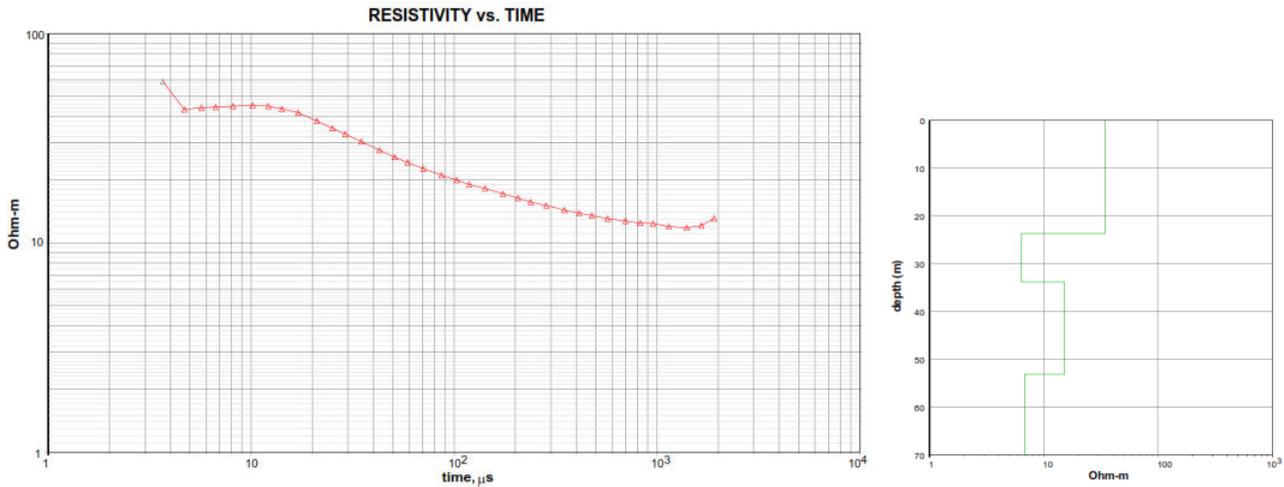


Figura 9.1: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Barr1.

Capa	Resistividad[Ω /m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	34	24	24
2	6.5	10	34
3	16	19	53
4	7	17	70

Tabla 9.4: Interpretación sondeo Barr1

9.2.2. Localidad de La Isla

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	32	8	8
2	45	36	44
3	200	26	70

Tabla 9.5: Interpretación sondeo CLO01

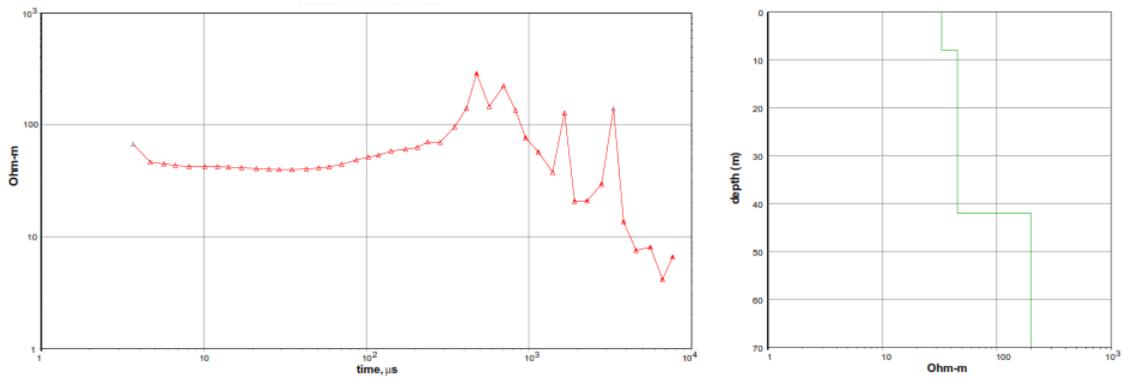


Figura 9.2: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para COL01.

9.2.3. Localidad de Sol de las Praderas

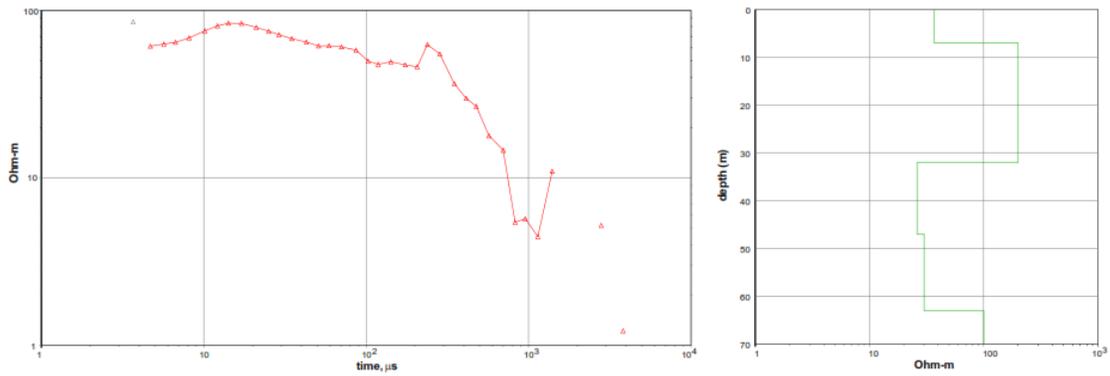


Figura 9.3: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para SLP1.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	37	7	7
2	200	25	32
3	26	15	47
4	30	16	63
5	100	7	70

Tabla 9.6: Interpretación sondeo SLP1

9.2.4. Localidad de Valle Hermoso

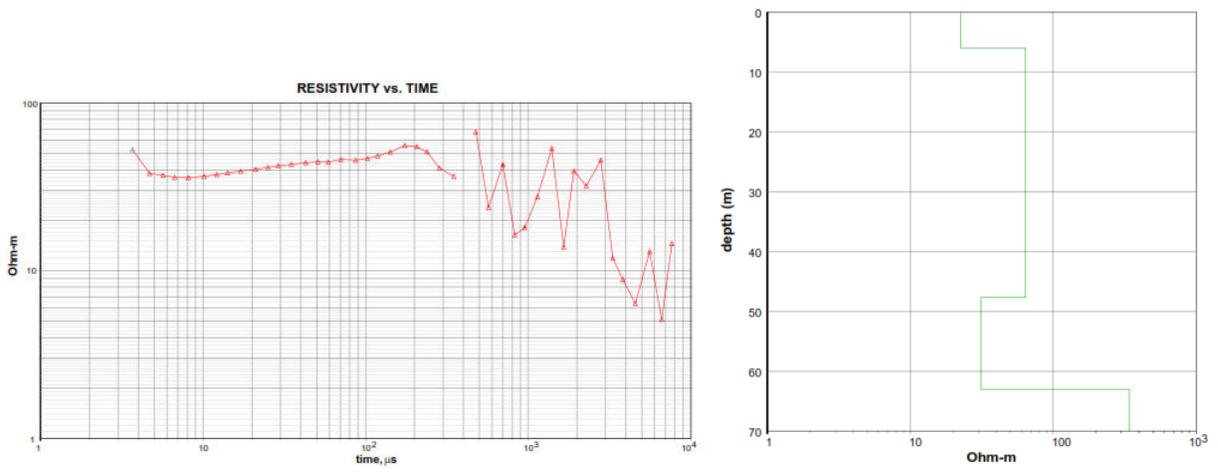


Figura 9.4: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT1.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	39	11	11
2	200	42	53
3	50	17	70

Tabla 9.7: Interpretación sondeo MAT1

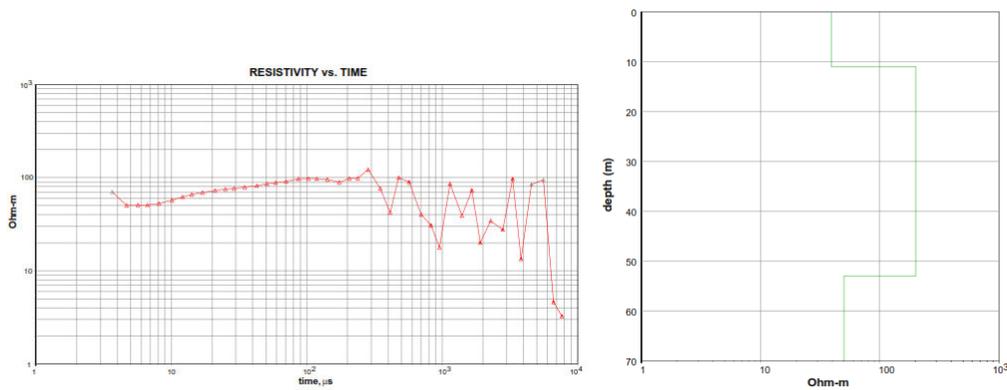


Figura 9.5: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT3.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	39	11	11
2	200	42	53
3	50	17	70

Tabla 9.8: Interpretación sondeo MAT3

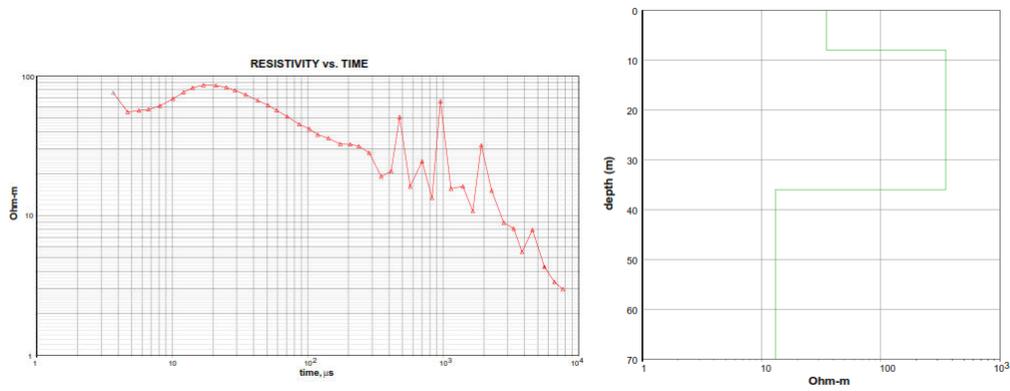


Figura 9.6: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT5.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	35	8	8
2	350	28	36
3	13	34	70

Tabla 9.9: Interpretación sondeo MAT5

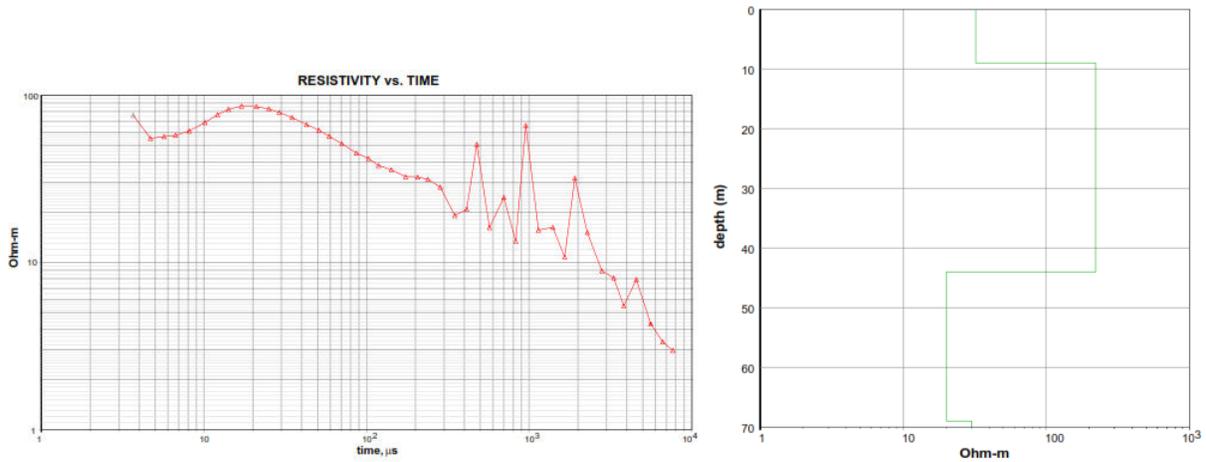


Figura 9.7: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT7.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	32	9	9
2	220	35	44
3	20	26	70

Tabla 9.10: Interpretación sondeo MAT7

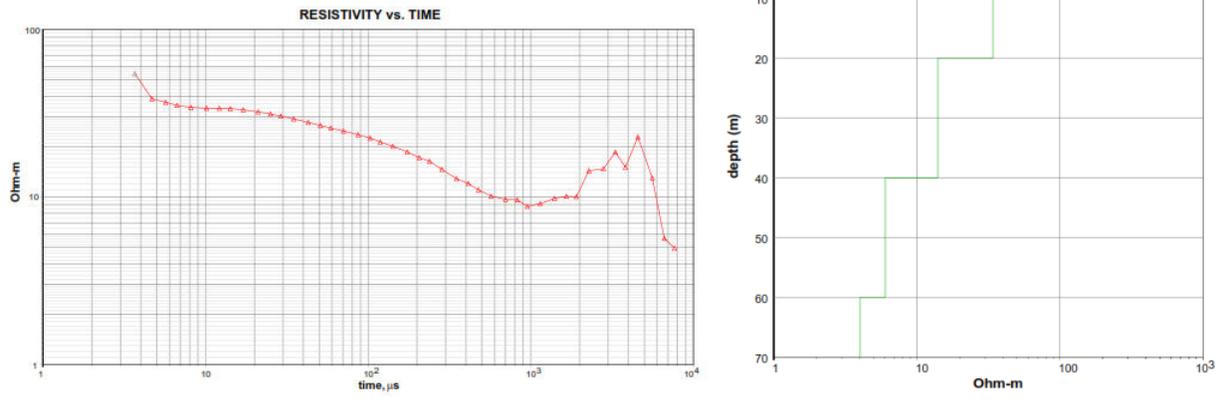


Figura 9.8: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para MAT9.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	22	5	5
2	34	15	20
3	15	20	40
4	6	20	60
5	4	10	70

Tabla 9.11: Interpretación sondeo MAT9

9.2.5. Localidad Hinojo

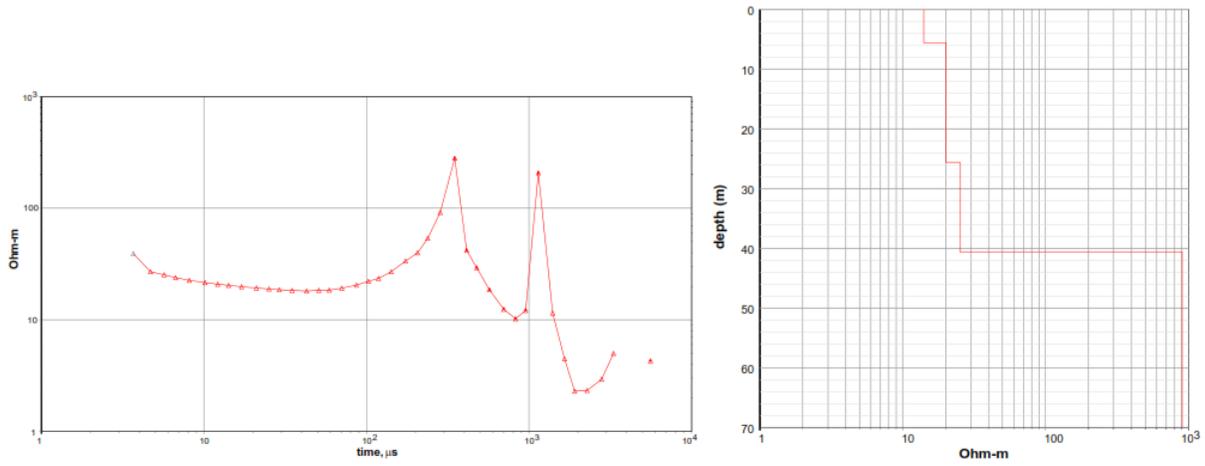


Figura 9.9: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	32	8	8
2	52	15	23
3	32	16	39
4	769	31	70

Tabla 9.12: Interpretación sondeo Hic6

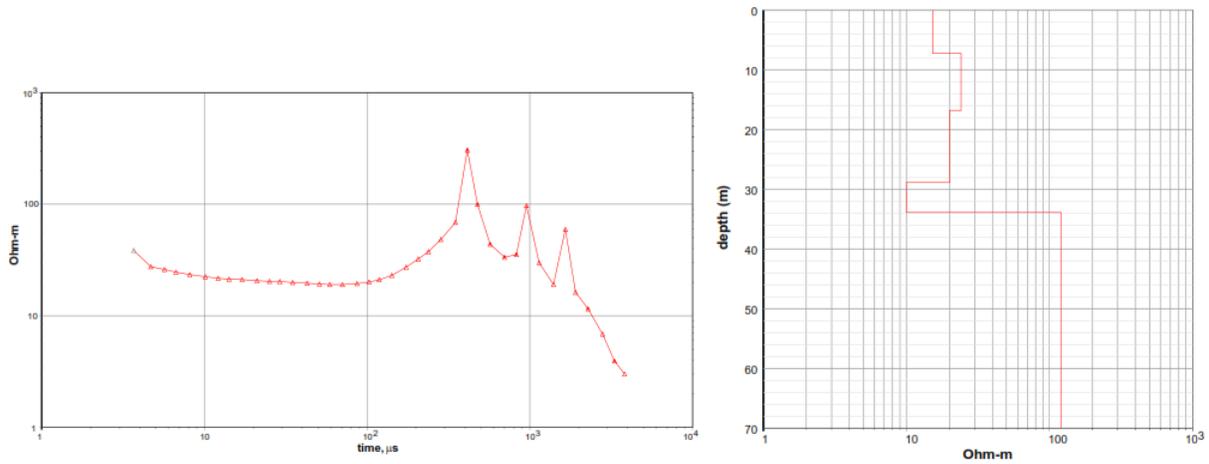


Figura 9.10: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-3.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	15	7	7
2	24	10	17
3	20	12	29
4	10	5	34
5	100	36	70

Tabla 9.13: Interpretación sondeo Hic6-3

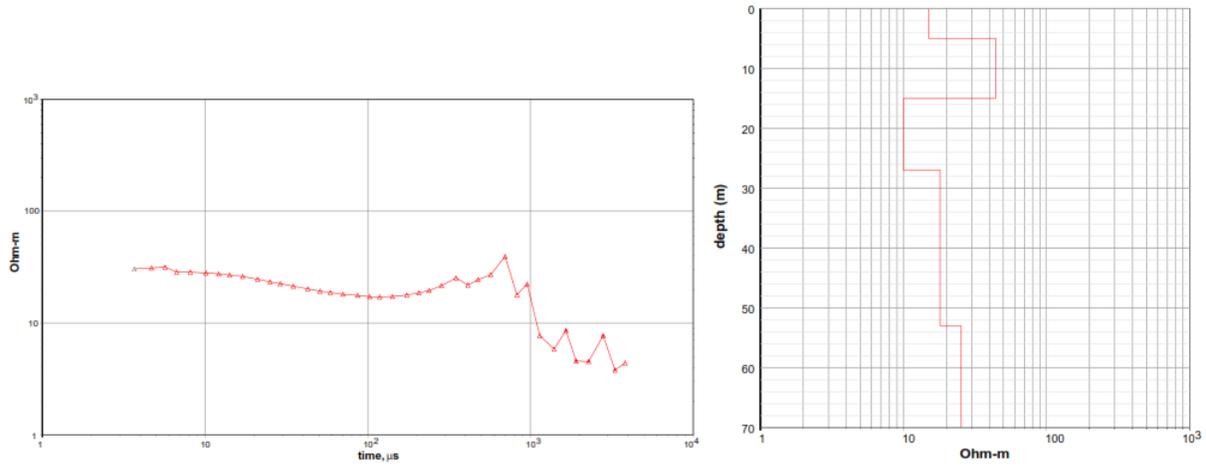


Figura 9.11: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-5.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	15	5	5
2	44	10	15
3	10	12	27
4	18	26	53
5	25	17	70

Tabla 9.14: Interpretación sondeo Hic6-5

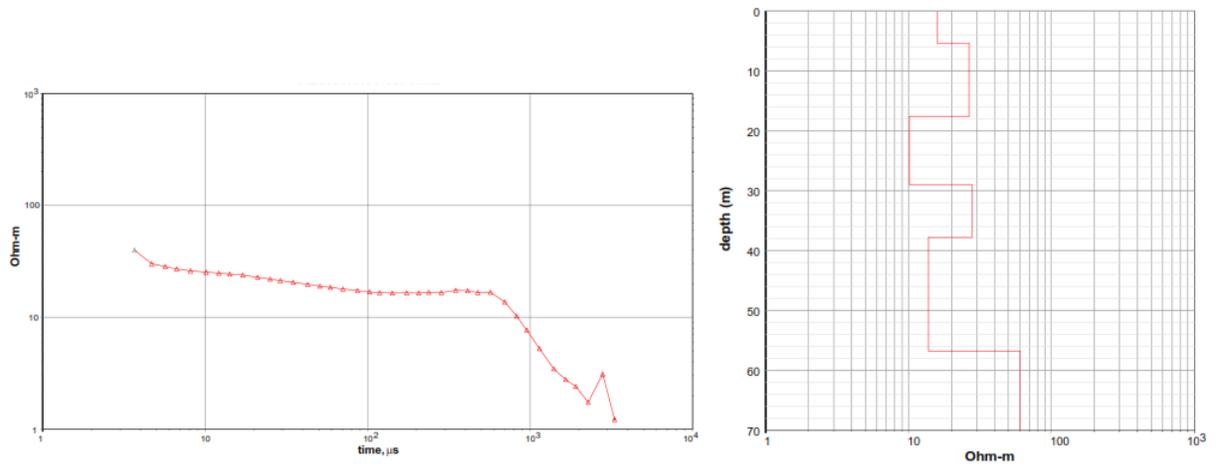


Figura 9.12: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-6.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	16	5	5
2	26	12	17
3	10	11	28
4	28	9	37
5	14	19	56
6	60	14	70

Tabla 9.15: Interpretación sondeo Hic6-6

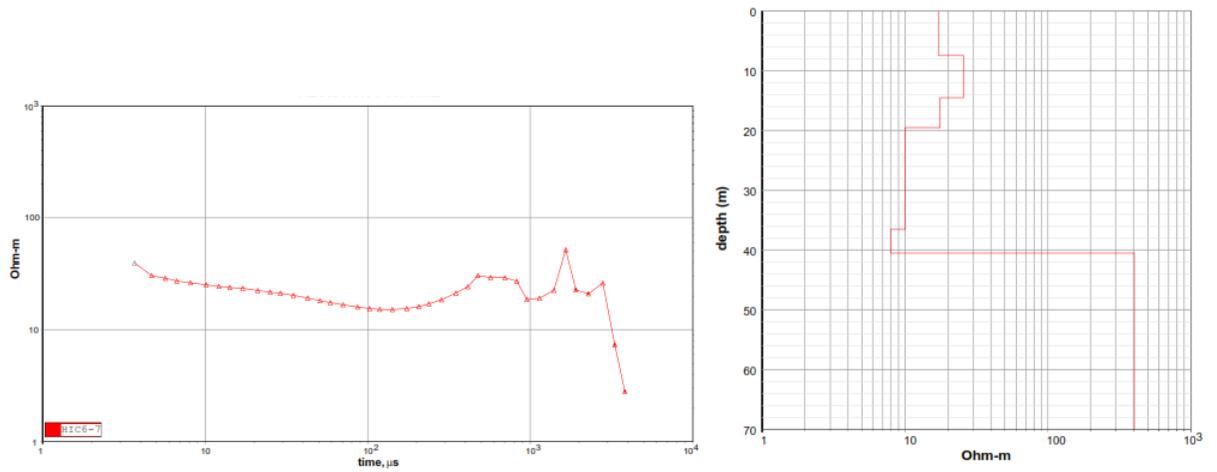


Figura 9.13: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-7.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	17	7	7
2	26	7	14
3	18	5	19
4	10	17	36
5	8	4	40
6	400	30	70

Tabla 9.16: Interpretación sondeo Hic6-7

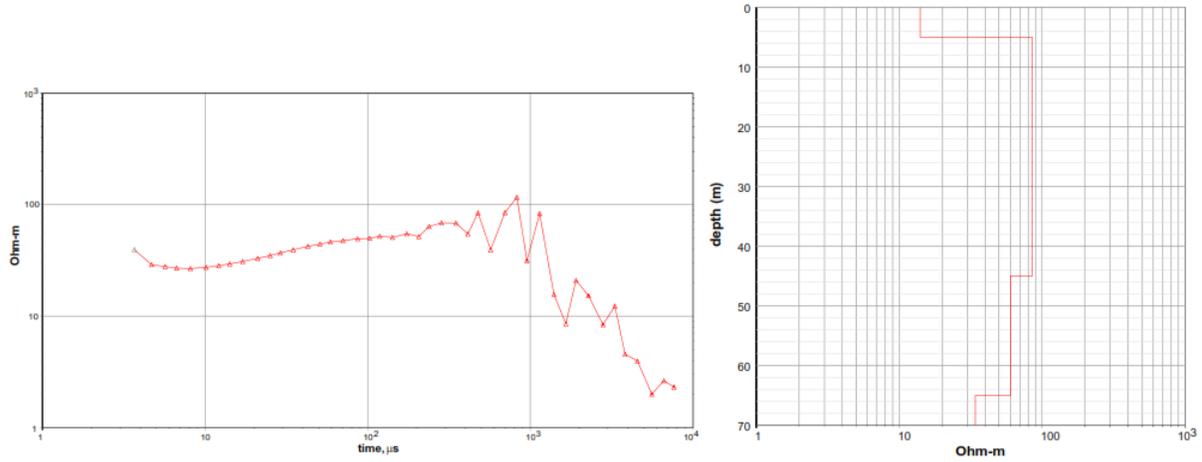


Figura 9.14: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-8.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	14	5	5
2	85	40	45
3	60	15	60
4	34	10	70

Tabla 9.17: Interpretación sondeo Hic6-8

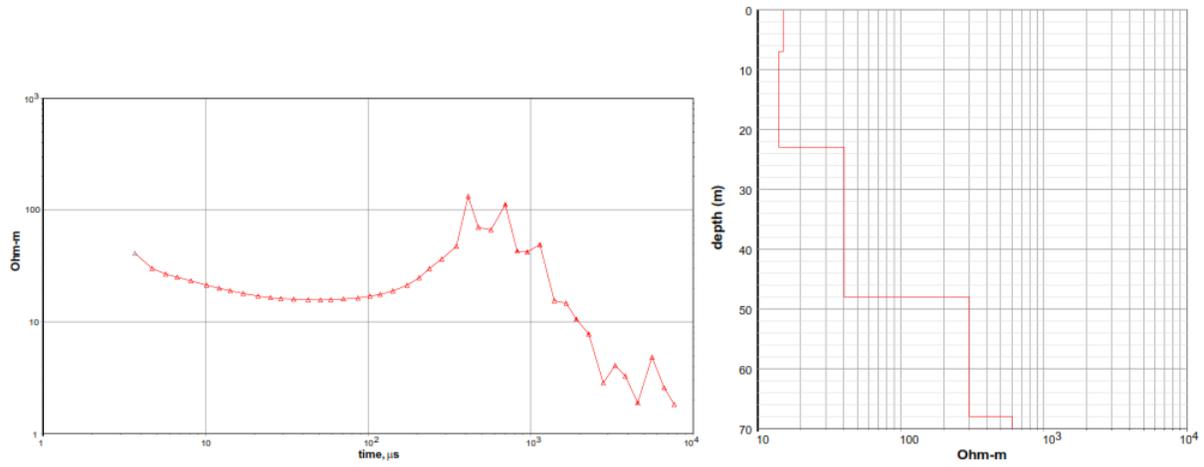


Figura 9.15: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-9.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	15	7	7
2	14	16	23
3	40	25	48
4	300	20	68
5	600	2	70

Tabla 9.18: Interpretación sondeo Hic6-9

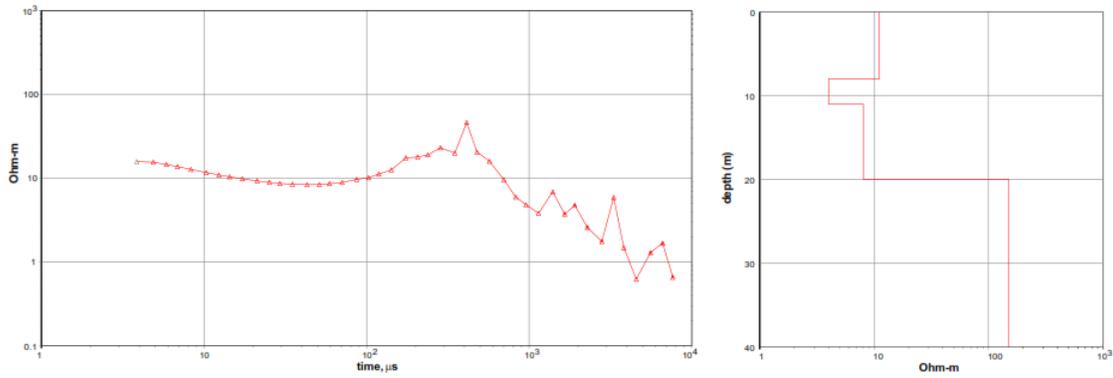


Figura 9.16: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-12.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	11	8	8
2	4	3	11
3	8	9	20
4	150	20	40

Tabla 9.19: Interpretación sondeo Hic6-12

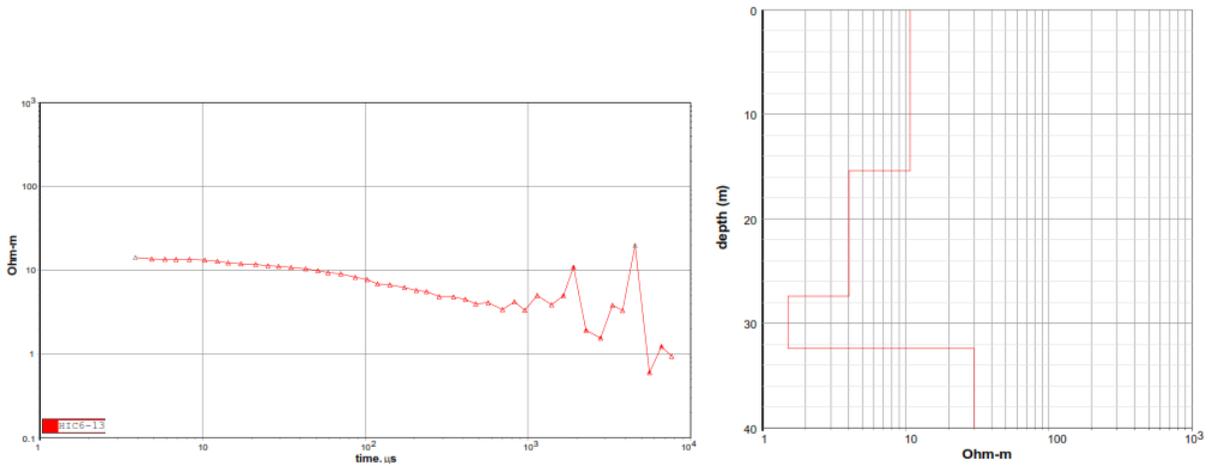


Figura 9.17: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Hic6-13.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	11	15	15
2	4	13	28
3	2	4	32
4	30	8	40

Tabla 9.20: Interpretación sondeo Hic6-13

9.2.6. Localidad de Guampulla

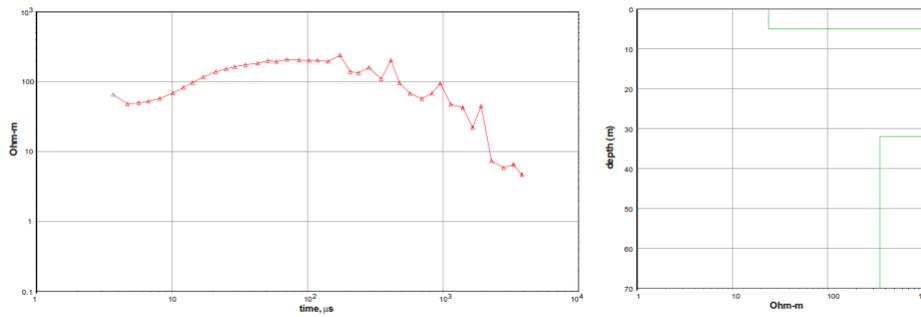


Figura 9.18: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Guam1.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	24	5	5
2	3000	27	32
3	350	38	70

Tabla 9.21: Interpretación sondeo Huam1

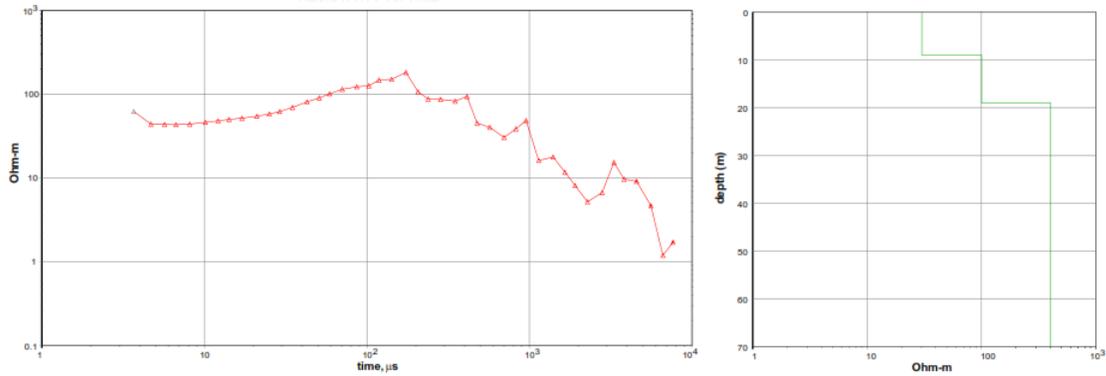


Figura 9.19: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Guam3.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	30	9	9
2	100	10	19
3	400	51	70

Tabla 9.22: Interpretación sondeo Huam3

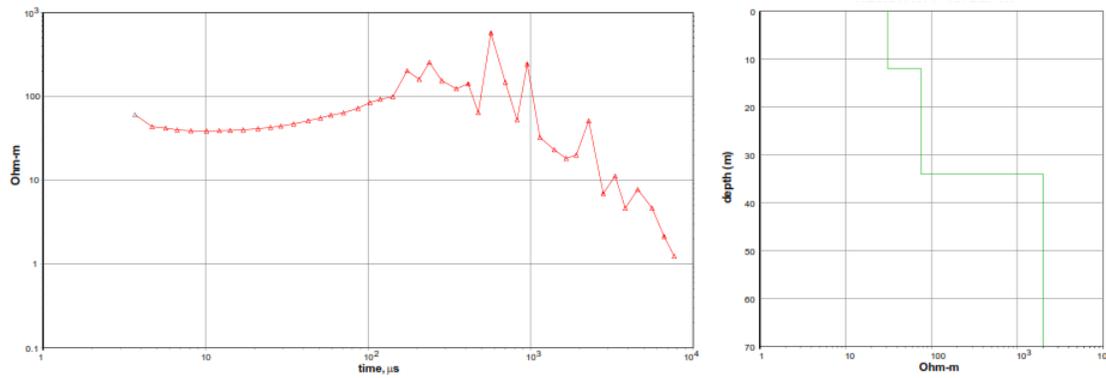


Figura 9.20: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para Guam5.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	31	12	12
2	75	10	32
3	2000	48	70

Tabla 9.23: Interpretación sondeo Huam5

9.3. Anexo 3

9.4. Resultados Choapa

En el presente anexo se muestran los sondeos procesados correspondientes a la provincia de Choapa. Se descartan los restantes de la tabla 9.2 por el ruido existente en los sondeos, los gráficos de resistividad aparente se muestran junto al modelo de capas asociado.

Localidad	Nombre	Lazo Transmisor [m]	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Ventana	Time-Off [μ s]	Corriente [Amp]
Asiento Viejo	AV6	25x25	299297	6501804	7	8	4
Asiento Viejo	AV7	12x12	299339	6501856	7	8	4
Asiento Viejo	AV8	12x12	298698	6501371	7	8	4
Asiento Viejo	AV9	25x25	298067	6501218	7	8	4

Tabla 9.24: Parámetros de adquisición, Provincia de Choapa.

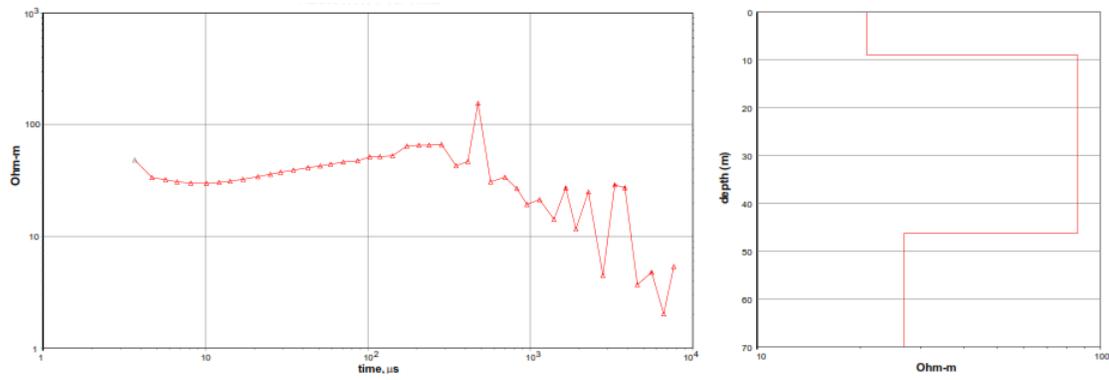


Figura 9.21: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para AV6.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	21	9	9
2	86	37	46
3	27	24	70

Tabla 9.25: Interpretación sondeo AV6

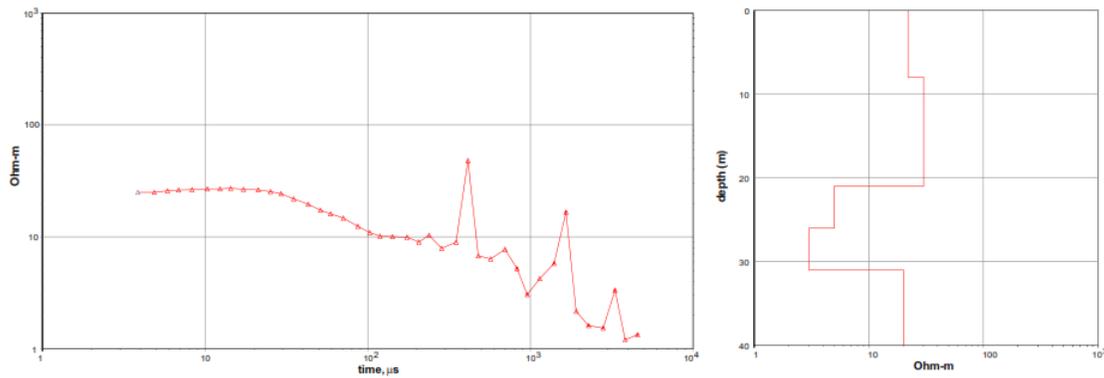


Figura 9.22: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para AV7.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	22	8	8
2	30	13	21
3	5	5	26
4	3	5	31
5	20	9	40

Tabla 9.26: Interpretación sondeo AV7

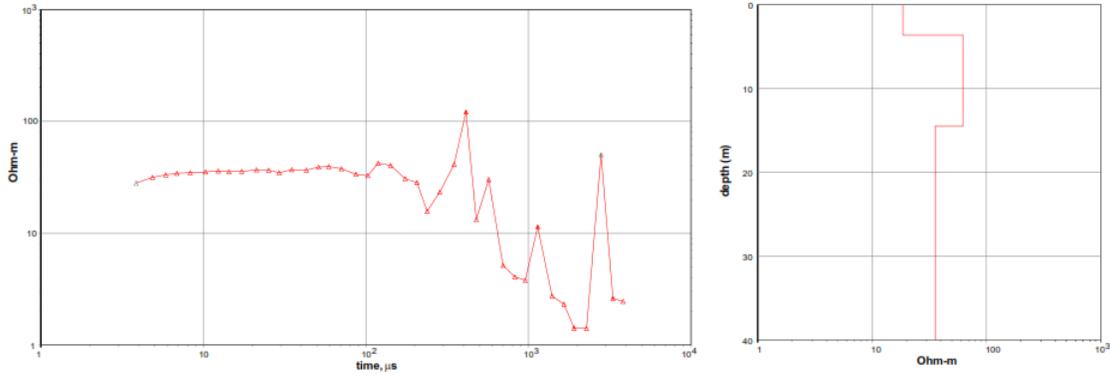


Figura 9.23: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para AV8.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	19	4	4
2	62	11	15
3	36	25	40

Tabla 9.27: Interpretación sondeo AV8

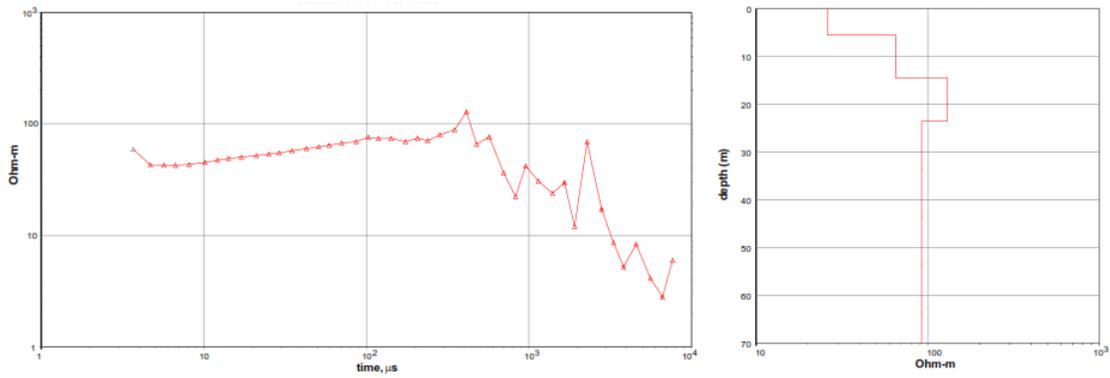


Figura 9.24: Curva de resistividad aparente (ρ_a) y modelo de resistividad para AV9.

Capa	Resistividad[Ohm/m]	Espesor[m]	Profundidad[m]
1	26	6	6
2	65	11	15
3	130	9	24
4	92	46	70

Tabla 9.28: Interpretación sondeo AV9