



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

CATALINA ALEJANDRA MÉNDEZ RIVAS

PROFESORA GUÍA:
CARMEN COPIER MELLA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MATIAS TAUCARE TORO
LINDA DANIELE

SANTIAGO DE CHILE
2023

Resumen

El agua subterránea en Chile desempeña un papel crucial en el suministro de agua potable, agricultura, industria y otros usos. Debido a las características geográficas y climáticas del país, la explotación y gestión adecuada del recurso hídrico subterráneo es fundamental para asegurar un suministro sostenible y garantizar la viabilidad de actividades humanas y equilibrio de los ecosistemas, lo que implica la comprensión de los procesos hidrogeológicos.

Este estudio explora la hidrogeología de la región de Coquimbo en el centro norte del país, con el fin de obtener información detallada sobre las características y el comportamiento del agua subterránea, comprendiendo su disponibilidad, calidad y potencial de extracción sostenible. El análisis se enfoca en cuencas principales de Río Elqui, Río Limarí y cuenca costera entre estos dos ríos.

En primera instancia, se determinó la profundidad y geometría del subsuelo mediante la interpretación de perfiles geofísicos correspondientes a gravimetría, métodos de resistividad (AMT, ERT, TEM) y de sísmica de reflexión (MASW), complementándose con la información estratigráfica existente. Se aprecia la existencia de un basamento somero, con un límite que no siempre coincide con cambios litológicos, sino con alteración y/o fracturación de la roca.

Los parámetros hidráulicos calculados a partir de la información de pruebas de bombeo en expedientes DGA, revelan que las zonas de menor transmisividad se sitúan en los bordes de los valles fluviales, en acuíferos profundos con predominio de sedimentos finos y en medios someros conformados por rocas fracturadas y/o meteorizadas. Estos sectores fisurados pueden constituir acuíferos permeables dependiendo del porcentaje de material fino presente. Se obtiene a partir de los caudales específicos que la eficiencia de los pozos es superior en aquellos más someros y donde el relleno sedimentario es de mayor potencia y una granulometría más gruesa.

La calidad del recurso como su procedencia y evolución, se analizaron a través de la composición hidroquímica e isotópica recopilada. El valor de conductividad eléctrica se incrementa naturalmente hacia la desembocadura de las cuencas, en sentido del flujo del agua, como consecuencia de tiempo de residencia, flujos por medios costeros o percolación de sales relacionada con los usos de suelo. La mayoría de los elementos presentes se encuentran dentro de los rangos aceptables en normas de agua potable y de riego, sin embargo, aquellos que superan los límites provienen de infiltración por actividad agrícola e industrial de la región.

Las muestras tienen una señal isotópica propia de aguas empobrecidas en deuterio por efecto de la evaporación, más negativa en zonas de mayor altitud. Su procedencia es de zonas de recarga en parte alta de las cuencas de la región y de infiltraciones locales, y una forma de recarga y de interacción con aguas superficiales puede ser a través de fracturas identificadas por la metodología geofísica.

Finalmente, se puede señalar que la región de Coquimbo presenta una hidrogeología compleja que aún no se conoce en detalle, sin embargo, los resultados obtenidos corresponden a un primer paso para tener mayor entendimiento de su funcionamiento hidrogeológico, pudiendo constituir una herramienta de decisión para la gestión del recurso existente.

*Quiero volver a tierras niñas;
llévenme a un blando país de aguas.
En grandes pastos envejezca
y haga al río fábula y fábula.
Tenga una fuente por mi madre
y en la siesta salga a buscarla,
y en jarras baje de una peña
un agua dulce, aguda y áspera.*

*Me venza y pare los alientos
el agua acérrima y helada.
¡Rompa mi vaso y al beberla
me vuelva niñas las entrañas!*

'Agua' - Gabriela Mistral (fragmento)

*A mis padres, Verónica y Alejandro.
A mis hermanos, Fernanda, Andrea y Alejandro.
A mi fiel salchicha, Luca.*

Agradecimientos

Finalizó un largo proceso como estudiante, años que han estado llenos de desafíos, aventuras, personas, risas, llantos y, sobre todo, aprendizajes que me han enriquecido infinitamente. Es por ello, y por los inolvidables momentos vividos, que quisiera agradecer a todas las personas que han hecho que mi paso por la universidad haya sido tan especial.

En primer lugar, agradezco a los profesores de la comisión de este Trabajo de Título por sus correcciones y consejos. A mi profesora guía, Carmen Copier, gracias por permitirme realizar un tema de investigación acorde a mis gustos e ideales, orientarme con sus consejos y creer en mis capacidades desde el primer día. De la misma forma, gracias a mi profesor co-guía, Matías Taucare, por su INMENSA disposición a ayudarme a lo largo de toda esta etapa final, además de confiar en mí como parte de su cuerpo docente en cursos de la especialidad. Recordaré con alegría los cafés y sus palabras de ánimo y de calma siempre.

Agradezco al equipo de FYM Consultores SpA., por considerarme dentro del desarrollo del proyecto, compartiendo sus conocimientos en las campañas de terreno. Gracias a todas aquellas personas que compartieron su experiencia y que conviven con la situación crítica de sequía en la región de Coquimbo y en otras zonas de Chile. Su amabilidad y forma de ver la vida me enseñaron el enfoque que quiero darle a mi futura vida profesional y humana.

Todos estos años se los debo al apoyo de mi familia. Son lo más importante en mi vida y quedaré siempre en deuda por todo el amor, motivación y enseñanzas que me han entregado. Mamá, ojalá ser un día como tú, tan fuerte y segura, gracias por creer en mí y preocuparte incondicionalmente por nosotros. Papá, quiero que sepas que contigo siempre me siento tranquila, feliz y amada. Gracias a ambos por entregarme su tiempo, palabras y abrazos sin medida. Ñafe, siempre impresionada por la facilidad con la que corres para cuidarnos y el inmenso corazón que tienes, soy afortunada de tenerte a mi lado. Andrea, podemos estar a miles de kilómetros y sentirnos tan cerquita a la vez, eres mi persona favorita. Noja, eres mi más importante compañero, dispuesto a escucharme y apañarme literal a todo. Maxi, cuando crezcas te contaré que desde bebé me llenas de felicidad y risas, siempre estaré para ti. Son mis almas gemelas, gracias por escogerme como su hija, hermana y tía. Los amo idiotitas.

He conocido también a una segunda familia, capaz de llorar y reír a carcajadas juntos, celebrar los triunfos del otro como también estar acompañándonos en silencio. Gracias a mis amigas de la vida, mi Parrita, Conita y Jo, que me conocen dispersa, mañosa y loca como nadie. A mis amigos de plan común, Nacha, Puerto Montt, Gabo y a toda la Genki, fue maravilloso conocerlos y mantener esta amistad por años. A mis geopanés, especialmente, a Andy, Kelo, Dani y Coon, son personas únicas y me han enseñado mucho más de lo que creen, gracias por ser ustedes mismos. La persona que soy el día de hoy no podría existir sin haberme encontrado en el camino con cada uno, los llevo a todos en mi corazón.

Finalmente, fue durante estos años de universitaria donde conocí a esa persona especial, graciosa, sensible, capaz de todo, a mí misma. Por estas ganas de crecer y vivir la vida, gracias Catita.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción	1
1.1. Presentación	1
1.2. Formulación del problema	1
1.3. Justificación del estudio	4
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Ubicación y descripción del área de estudio	5
1.6. Metodología y plan de trabajo	6
1.6.1. Recopilación de Antecedentes	6
1.6.2. Campaña y Análisis Geofísico.....	7
1.6.3. Campaña y Análisis Hidrogeoquímico.....	8
Capítulo 2 : Marco geológico	10
2.1. Caracterización geológica regional	10
2.1.1. Paleozoico-Triásico Inferior	11
2.1.2. Triásico Medio- Jurásico Inferior	12
2.1.3. Jurásico Medio-Superior.....	14
2.1.4. Cretácico Inferior	15
2.1.5. Cretácico Superior	16
2.1.6. Paleógeno	17
2.1.7. Neógeno al Reciente	18
2.2. Caracterización tectónica	21
2.2.1. Geomorfología.....	21
2.2.2. Tectónica y estructural	21
Capítulo 3 : Marco hidrogeológico	26
3.1. Descripción general de cuencas	26
3.2. Clima y precipitación	29
3.3. Escorrentía	30
3.4. Embalses.....	31

3.5. Usos de suelo.....	32
3.6. Franja metalogénica.....	33
3.7. Derechos de agua consuntivos.....	36
Capítulo 4 : Resultados	37
4.1. Exploración Geofísica	37
4.1.1. Cuenca Río Elqui.....	38
4.1.2. Cuenca Costera Río Elqui – Río Limarí	50
4.1.3. Cuenca Río Limarí.....	54
4.2. Estimación e Interpretación de Parámetros elásticos	71
4.2.1. Cuenca Río Elqui.....	73
4.2.2. Cuenca Costera Río Elqui – Río Limarí	75
4.2.3. Cuenca Río Limarí.....	77
4.3. Análisis de Disponibilidad de Recurso Subterráneo.....	80
4.3.1. Tendencia histórica de niveles estáticos.....	80
4.3.2. Caudales subterráneos otorgados	83
4.4. Hidrogeoquímica	89
4.4.1. Cuenca Río Elqui.....	98
4.4.2. Cuencas Costera Río Elqui - Río Limarí	109
4.4.3. Cuenca Río Limarí.....	121
4.5. Isótopos estables	132
4.5.1. Cuenca Río Elqui.....	135
4.5.2. Cuenca Costera Río Elqui - Río Limarí	138
4.5.3. Cuenca Río Limarí.....	140

Capítulo 5 : Conclusiones y recomendaciones	146
Bibliografía.....	148
Anexo A: Análisis de Pruebas de Bombeo	155
Anexo B: Niveles Estáticos	169
Anexo C: Muestras Análisis Parámetros Físicoquímicos	174
Anexo D: Muestras Análisis Hidroquímicos	181
Anexo E: Muestras Análisis Isotópico	183
Anexo F: Abreviaciones	189
Anexo G: Glosario.....	191

Índice de Tablas

Tabla 1: Estimación de la demanda actual y futura para usos en la región de Coquimbo.....	3
Tabla 2: Porcentaje de hombres y mujeres en Región de Coquimbo (INE, 2019).....	28
Tabla 3: Superficie con categorías de Uso de Suelo (CIREN, 2012).....	32
Tabla 4: Caudales de derechos subterráneos (DGA, 2021).....	36
Tabla 5: Clasificación de unidades en función de resistividad (Ohm-m) y velocidad Vs (m/s)...	37
Tabla 6: Clasificación del acuífero según transmisividad (Villanueva e Iglesias, 1984).....	72
Tabla 7: Transmisividades en cuenca Río Elqui mediante software AquiferTest Pro.	73
Tabla 8: Transmisividades en cuenca costera mediante software AquiferTest Pro.	75
Tabla 9: Transmisividades en cuenca Río Limarí mediante software AquiferTest Pro.	77
Tabla 10: Medidas de posición de parámetros fisicoquímicos.	91
Tabla 11: Balance iónico de resultados análisis muestras hidroquímicas.....	94
Tabla 12: Clasificación del agua según su conductividad eléctrica (APHA,1992).....	110

Índice de figuras

Figura 1.1: Nivel de napa en pozos de observación de la DGA. (DGA, 2015).	2
Figura 1.2: Área de estudio.	5
Figura 1.3: Estación gravimétrica en localidad de La Serena, Región de Coquimbo, Chile.	7
Figura 2.1: Geología del área de estudio.	10
Figura 2.2: Evolución tectónica del Norte Chico (Moscoso y Mpodozis, 1988).	22
Figura 2.3: Dominios estructurales y principales estructuras del área de estudio.	23
Figura 3.1: Cuencas hidrográficas de la Región de Coquimbo	26
Figura 3.2. Estado precipitaciones, caudales y embalses (CEAZA, 2022)	29
Figura 3.3: Evolución de los caudales por cuenca en Región de Coquimbo (CEAZA, 2022). ...	30
Figura 3.4: Comparativa volume embalsado regional y por cuenca (CEAZA, 2022).	31
Figura 3.5: Usos de suelo en la Región de Coquimbo	33
Figura 3.6: Distribución de las Franjas Metalogénicas (Rivera, 2018).	35
Figura 4.1: Ubicación perfiles geofísicos en cuenca Río Elqui.	38
Figura 4.2: Ubicación perfiles gravimétricos en tramo bajo río Elqui.	39
Figura 4.3: Modelos gravimétricos G3, G4 y G8 (DGA, 2022).	40
Figura 4.4: Ubicación perfiles sísmicos en cuenca Río Elqui.	41
Figura 4.5: Integración de modelos 1D de Velocidades de onda S (DGA, 2022).	42
Figura 4.6: Ubicación perfiles geoelectrónicos en tramo bajo de cuenca Río Elqui.	43
Figura 4.7: Sección de interpretación de línea L8 y L9B (DGA, 2022).	44
Figura 4.8: Sección de interpretación de línea L4, L5B y L9 (DGA, 2022).	45
Figura 4.9: Sección de resistividad AMT en línea 11 y 12 (DGA, 2022).	46
Figura 4.10: Ubicación perfiles geoelectrónicos en tramo alto de cuenca Río Elqui.	47
Figura 4.11: Sección de interpretación líneas AMT A5, A10, A7, A9 y A6.	49
Figura 4.12: Ubicación perfiles geofísicos en cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí.	50
Figura 4.13: Ubicación perfiles geoelectrónicos en tramo sur de cuenca costera Elqui - Limarí. ...	51
Figura 4.14: Sección de interpretación líneas TEM L3 y L7	52

Figura 4.15: Sección de interpretación líneas AMT A22, A3, A17 y A2 (DGA, 2022).	53
Figura 4.16: Ubicación perfiles geofísicos en cuenca Río Limarí.	54
Figura 4.17: Ubicación perfiles gravimétricos en zona baja cuenca Río Limarí.	55
Figura 4.18: Modelos gravimétricos G1, G2 y G5 (DGA, 2022).	56
Figura 4.19: Ubicación perfiles gravimétricos en zona alta cuenca Río Limarí	58
Figura 4.20: Modelos gravimétricos G6 y G7 (DGA, 2022).....	59
Figura 4.21: Ubicación perfiles sísmicos en zona baja de cuenca Río Limarí.	60
Figura 4.22: Integración de modelos 1D de Velocidades de onda S en cuenca Río Limarí	61
Figura 4.23: Ubicación perfiles geoelectricos en zona baja de cuenca Río Limarí.	62
Figura 4.24: Sección de interpretación líneas TEM L1 y L2	62
Figura 4.25: Sección de interpretación líneas AMT A15 y A20.	63
Figura 4.26: Ubicación perfiles geoelectricos en zona media de cuenca Río Limarí.	64
Figura 4.27: Sección de interpretación líneas TEM L6, L11 y L15, y línea ERT TE10.....	65
Figura 4.28: Ubicación perfiles geoelectricos en zona media sur de cuenca Río Limarí.	66
Figura 4.29: Sección de Interpretación líneas TE2 y TE3.	67
Figura 4.30: Ubicación perfiles geoelectricos en zona alta de cuenca Río Limarí.	68
Figura 4.31: Sección de Interpretación líneas TE11, TE5 y TE6.....	69
Figura 4.32: Mapa distribución pozos de monitoreo de expedientes y campaña de sondaje. ...	71
Figura 4.33: Transmisividades calculada y profundidad de pozos de bombeo a lo largo de cuenca Río Elqui	73
Figura 4.34: Caudales específicos calculados y profundidad de pozos de bombeo a lo largo de cuenca Río Elqui.....	74
Figura 4.35: Transmisividades y profundidad de pozos de bombeo en cuenca costera Río Elqui - Río Limarí.	75
Figura 4.36: Caudales específicos y profundidad de pozos de bombeo en cuenca costera Río Elqui - Río Limarí.	76
Figura 4.37: Transmisividades y profundidad de pozos de bombeo en cuenca costera Río Elqui - Río Limarí.	78
Figura 4.38: Caudal específico y profundidad de pozos de bombeo en cuenca Río Limarí.	78

Figura 4.39: Niveles estáticos 1970-2022 en cuencas Río Los Choros, Río Elqui y cuenca costera entre estos dos ríos.	81
Figura 4.40: Niveles estáticos periodo 1970-2022 en cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí, cuenca Río Limarí y cuenca Río Quilimarí.	82
Figura 4.41: Niveles estáticos periodo 1970-2022 en cuenca Río Choapa.....	83
Figura 4.42: Caudal acumulado de derechos otorgados en cuenca Río Los Choros, Río Elqui y cuenca costera entre estos dos ríos.....	84
Figura 4.43: Caudal acumulado de derechos otorgados en cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí, cuenca Río Limarí y cuenca Río Quilimarí.	85
Figura 4.44: Caudal acumulado de derechos otorgados en cuenca Río Choapa.....	86
Figura 4.45: Variación niveles estáticos y derechos de aguas subterráneas otorgados en cuencas de Región de Coquimbo.....	87
Figura 4.46: Registro de catastro hidrogeológico realizado en Abril 2022.	89
Figura 4.47: Mapa distribución puntos de información parámetros fisicoquímicos.	90
Figura 4.48: Diagramas de caja pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica.....	91
Figura 4.49: Toma de muestras hidroquímicas campaña de terreno.	92
Figura 4.50: Mapa distribución muestras hidroquímicas expedientes DGA y obtenidas en campaña de terreno.....	93
Figura 4.51: Diagrama de caja de elementos mayoritarios.....	95
Figura 4.52: Diagrama de caja de elementos traza obtenidos de muestras hidroquímicas.....	96
Figura 4.53: Diagrama trilineal de Piper que muestra facies geoquímicas (Clark, 2015).....	97
Figura 4.54: Diagramas Stiff.....	97
Figura 4.55: Distribución espacial pH dentro de la cuenca de Río Elqui.....	98
Figura 4.56: Distribución espacial Conductividad Eléctrica dentro de la cuenca de Río Elqui... ..	99
Figura 4.57: Distribución espacial Temperatura dentro de la cuenca de Río Elqui.....	100
Figura 4.58: Distribución espacial Cloruro y Sulfato en cuenca Río Elqui.....	101
Figura 4.59: Distribución espacial Bicarbonato y Nitrato en cuenca Río Elqui.....	102
Figura 4.60: Distribución espacial Sodio, Magnesio y Calcio en cuenca Río Elqui.....	103
Figura 4.61: Distribución espacial Boro y Aluminio en cuenca Río Elqui.....	104
Figura 4.62: Distribución espacial Cromo y Hierro en cuenca Río Elqui.....	105

Figura 4.63: Distribución espacial Manganeso y Cobre en cuenca Río Elqui	105
Figura 4.64: Distribución espacial Zinc, Arsénico y Bario en cuenca Río Elqui.	106
Figura 4.65: Diagramas Piper para muestras hidroquímicas en cuenca Río Elqui.	107
Figura 4.66: Diagramas Stiff de muestras hidroquímicas en cuenca Río Elqui.....	108
Figura 4.67: Distribución espacial pH dentro de cuenca costera.	109
Figura 4.68: Distribución espacial Conductividad Eléctrica dentro de cuenca costera.	110
Figura 4.69: Distribución espacial Temperatura dentro de cuenca costera.	111
Figura 4.70: Distribución espacial Cloruro y Sulfato en cuenca costera.	112
Figura 4.71: Distribución espacial Bicarbonato y Nitrato en cuenca costera.....	112
Figura 4.72: Distribución espacial Sodio, Magnesio y Calcio en cuenca costera.....	114
Figura 4.73: Distribución espacial Boro y Aluminio en cuenca costera	115
Figura 4.74: Distribución espacial Cromo y Hierro en cuenca costera	116
Figura 4.75: Distribución espacial Manganeso y Cobre en cuenca costera.....	117
Figura 4.76: Distribución espacial Zinc, Arsénico y Bario en cuenca costera.	118
Figura 4.77: Diagramas Piper para muestras hidroquímicas en cuenca costera.	119
Figura 4.78: Diagramas Stiff de muestras hidroquímicas en cuenca costera.	120
Figura 4.79: Distribución espacial pH dentro de la cuenca Río Limarí.....	121
Figura 4.80: Distribución espacial pH dentro de la cuenca Río Limarí.....	122
Figura 4.81: Distribución espacial Conductividad Eléctrica dentro de la cuenca Río Limarí. ...	123
Figura 4.82: Distribución espacial Cloruro y Sulfato en cuenca Río Limarí.....	124
Figura 4.83: Distribución espacial Bicarbonato y Nitrato en cuenca Río Limarí.	125
Figura 4.84: Distribución espacial Sodio, Magnesio y Calcio en cuenca Río Limarí.....	126
Figura 4.85: Distribución espacial Boro y Aluminio en cuenca Río Limarí.	127
Figura 4.86: Distribución espacial Cromo y Hierro en cuenca Río Limarí.	128
Figura 4.87: Distribución espacia Manganeso y Cobre en cuenca Río Limarí.....	128
Figura 4.88: Distribución espacial Zinc, Arsénico y Bario en cuenca Río Limarí.	129
Figura 4.89: Diagramas Piper para muestras hidroquímicas en cuenca Río Limarí.	130
Figura 4.90: Diagramas Stiff de muestras hidroquímicas en cuenca Río Limarí.....	131

Figura 4.91: Mapa distribución muestras isotópicas.....	133
Figura 4.92: Gráfico de correlación de isótopos estables del agua δD y $\delta^{18}O$	134
Figura 4.93: Distribución espacial de muestras isotópicas cuenca Río Elqui.....	135
Figura 4.94: Composición isotópica del agua de cuenca Río Elqui y correlación Oxígeno-18 y elevación muestras.....	136
Figura 4.95: Distribución espacial de muestras isotópicas cuenca costera.	138
Figura 4.96: Composición isotópica del agua de cuenca costera y correlación Oxígeno-18 y elevación muestras.....	139
Figura 4.97: Distribución espacial de muestras isotópicas cuenca Río Limarí.....	141
Figura 4.98: Composición isotópica del agua de cuenca Río Limarí y correlación Oxígeno-18 y elevación muestras.....	142
Figura 4.99: Correlación Oxígeno-18 y elevación muestras en las cuencas de interés.....	144

Capítulo 1: Introducción

1.1. Presentación

La Dirección General de Aguas (DGA) es el organismo del Estado a cargo de la gestión, verificación y difusión de la información hídrica del país, respecto de su cantidad y calidad principalmente, con el objeto de contribuir al resguardo de la certeza jurídica e hídrica para el desarrollo sustentable de este.

Esta memoria de título se enmarca en el estudio DGA denominado “Exploración y Caracterización de acuíferos profundos y fracturados en roca, Región de Coquimbo” realizado por la entidad privada de investigación FYM Consultores SpA. El periodo de ejecución de este proyecto es desde septiembre de 2021 a noviembre de 2022.

1.2. Formulación del problema

El agua cubre el 71% de la superficie del planeta, del cual el 97,5% del total de agua existente se encuentra principalmente en océanos, difícilmente utilizable para su consumo directo por su constitución salina. El 2,5% restante es agua dulce.

De esta cifra, el agua disponible para uso humano, agrícola, industrial y otros, presente en ríos, lagos y acuíferos, sólo equivale al 0,62% del total. Este bien escaso enfrenta una creciente presión demográfica debido a que, a diferencia de las aguas superficiales, son menos vulnerables a los cambios hidroclimáticos abruptos (Gehrels y Gieske, 2003; Cuthbert et al., 2019a, 2019b; Taylor et al., 2019), y obliga a los países a buscar lograr un acceso universal y equitativo al recurso y así garantizar calidad de vida a la población y, a su vez, de los diversos ecosistemas (DGA, 2016).

Chile posee una gran diversidad climática como consecuencia de la influencia oceánica, la corriente de Humboldt, el Anticiclón del Pacífico y la conjugación de elementos morfológicos, entre otros factores, que dan lugar a distintas características en cuanto a relieve, vegetación, suelo y, en especial, recursos hídricos. Estos últimos presentan grandes contrastes entre el norte y sur del país. En general, Chile es considerado un país privilegiado en cuanto a recursos hídricos, con una escorrentía media total que equivale a un promedio nacional per cápita de 51218 m³/persona/año, significativamente superior a la media mundial de 6600 m³/persona/año (Banco Mundial, 2010). Sin embargo, al analizar regionalmente estos valores, se evidencia la heterogeneidad hídrica del país.

La afinidad en factores hidrográficos, orográficos y climáticos permite agrupar estas regiones en macrozonas. En el Atlas del Agua de Chile (DGA, 2016) se define como Macrozona Norte al área geográfica más seca de Chile, que es donde se ubica el área de estudio de esta tesis y que corresponde a la región de Coquimbo. Las sequías prolongadas impactan de manera directa sobre la ocurrencia de precipitación, implicando amenazas graves para la población asentada en zonas específicas del país y sus recursos agropecuarios. El desarrollo de estrategias

para una adecuada y sustentable gestión del agua en estas zonas requiere comprender los factores que controlan su disponibilidad, con especial orientación al agua subterránea por ser uno de los recursos fundamentales para enfrentar los eventos de sequía.

En la Macrozona Norte de Chile se han analizado niveles históricos del agua subterránea en las regiones de Arica y Parinacota y región de Atacama. Estos pozos muestran un marcado descenso del nivel de la napa en el tiempo, como es el caso de Escuela Chitita 28 y Quebrada Cerrillos Amancay (Acuífero de Copiapó) con una tasa promedio de descenso en los últimos años de 1.17 m/año y 4.9 m/año, respectivamente. Por otro lado, el pozo Algarrobal muestra fluctuaciones de nivel en el tiempo con descensos y ascensos durante el año, el cual tiende a mantener constante el nivel promedio, pero con marcadas fluctuaciones a través del tiempo (Figura 1.1).

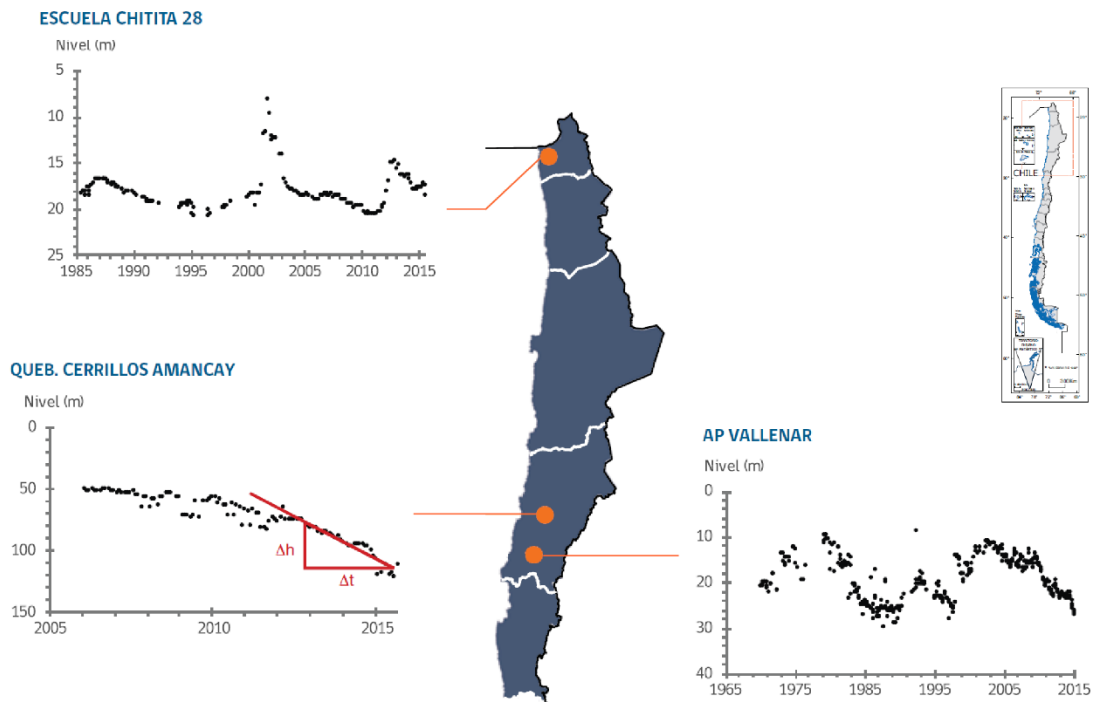


Figura 1.1: Nivel de napa en pozos de observación de la DGA. Modificado de DGA (2015).

El clima existente en el área de estudio es de tipo semiárido de lluvia invernal, donde sus cuencas representan zonas de interés agrícola, minero y turístico (Tabla 1). Dentro de la región, cuencas como la del Río Limarí corresponden a zonas agrícolas de gran importancia. En los últimos 15 años, se ha producido un aumento de las tierras de regadío (CIREN, 2011) y es por ello que en el año 2005, fue declarada por parte de la Dirección General de Aguas como una cuenca sobreasignada (DGA, 2008), lo que trae consigo que no se concedan derechos permanentes de consumo de aguas superficiales por lo que los recursos de aguas subterráneas que ya están sometidos a una creciente demanda, se enfrentan a una presión cada vez mayor y los derechos consuntivos de aguas subterráneas concedidos presentan un aumento, el cual no es directamente proporcional a la disponibilidad de aguas subterráneas (Oyarzún et al., 2014).

	Demanda (Mm³/año)		
	2015	2030	2040
Agua Potable Urbano	39.496	47.667	52.123
Agua Potable Rural	6.214	7.230	7.505
Agrícola	462.090	720.118	790.984
Pecuario	1.470	2.664	3.198
Minero	41.967	46.021	40.900
Industrial	4.742	6.629	8.034
Generación Eléctrica	0	0	0
TOTAL CONSUNTIVO	555.979	830.328	902.744
Acuícola	154	556	211
Generación Eléctrica	189.100	214.735	229.268
TOTAL NO CONSUNTIVO	189.254	215.290	229.479
Secano	25.783.317	25.666.796	25.166.147
Forestal (Productivo)	29.543	34.288	36.654
Forestal (No Productivo)	343.960	339.922	339.965
TOTAL EVAPOTRANSPIRATIVO	26.156.819	26.041.006	25.542.766

Tabla 1: Estimación de la demanda actual y futura para todos los usos en la región de Coquimbo. DGA (2017).

El conocimiento simplificado de los procesos hidrogeológicos y de la estimación precisa de la recarga de los acuíferos tienen como resultado inexactitudes en la gestión hídrica en distintas partes del país. Taucare et al. (2020) señala que, en Chile, los estudios hidrogeológicos se han centrado generalmente en acuíferos aluviales ubicados en valles y fondos de cuenca, sin embargo, estas litologías solo corresponden a un porcentaje menor al 15% de la superficie total del país. En Chile Central, estudios logran combinar características (hidro)geológicas y modelos geofísicos en un modelo conceptual hidrogeológico completo que descifra cómo las rutas del flujo de agua subterránea en zonas de frente montañoso (MFZ) controladas por fallas, varían de acuerdo a las características y disposición de estas estructuras, donde a través de ellas ocurre la recarga a lo largo del Frente Andino Occidental semiárido e, incluso, posee un papel clave en la recarga de los acuíferos aluviales en la Depresión Central (Figueroa et al., 2021).

A partir de este contexto, es que se requiere determinar de forma precisa la presencia, extensión y cantidad de aguas subterráneas, teniendo en cuenta la naturaleza compleja de su distribución, flujo y comportamiento, en base a que en regiones áridas como la región de Coquimbo, la explotación sostenible de las fuentes de aguas subterráneas se ve limitada por la excesiva simplificación de los procesos hidrogeológicos (Taucare et al., 2020), los cuales relacionan también factores geomorfológicos, topográficos y sus interacciones. Otros factores como el uso de la tierra, litología, ríos presentes y fallas geológicas pueden determinar la presencia o ausencia de este recurso en un determinado lugar (Golkarian et al., 2018).

1.3. Justificación del estudio

La región de Coquimbo ha carecido de un enfoque holístico desde una perspectiva hidrogeológica. Ante los desafíos hídricos que enfrenta ésta, en la actualidad, resulta imperativo realizar nuevos estudios que respalden acciones futuras orientadas hacia una gestión sostenible de los recursos a largo plazo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

El objetivo de esta memoria de título es comprender la dinámica hidrogeológica e hidrogeoquímica de las principales cuencas de la región de Coquimbo e identificar el potencial hídrico de la zona, con el fin de comprender y generar nueva información de parámetros que controlan las condiciones fisicoquímicas del agua, la calidad de esta y los procesos de interacción agua-roca en estos sistemas.

La importancia de este objetivo radica en que podría constituir una herramienta que aporte una visión más integral de las aguas subterráneas, lo que aportaría a la toma de decisiones con respecto a la gestión del recurso hídrico de la región.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la profundidad y geometría del subsuelo en áreas sin antecedentes, a partir del análisis de métodos geofísicos y estratigrafía de pozos.
- Evaluar propiedades hidráulicas de los diversos acuíferos que conforman la región, a través del análisis de los datos obtenidos de ensayos y pruebas de bombeo.
- Analizar la calidad del agua en diferentes áreas, en las que se realice un muestreo sistemático, a través del análisis de la hidrogeoquímica de las fuentes de agua subterránea y superficial.
- Identificar procedencia, evolución e interacción del agua con la roca y el suelo en el que se encuentra, a través del estudio de isótopos estables como oxígeno-18 y deuterio.

1.5. Ubicación y descripción del área de estudio

El área de estudio comprende la Región de Coquimbo, ubicada entre los 29°02' y 32°16' S y desde 69°49' hasta el Océano Pacífico, abarcando una superficie aproximada de 40000 km². Se ubica en el Centro Norte de Chile, limitando al norte con la Región de Atacama, al sur con la Región de Valparaíso, al este con la República de Argentina y al oeste con el Océano Pacífico.

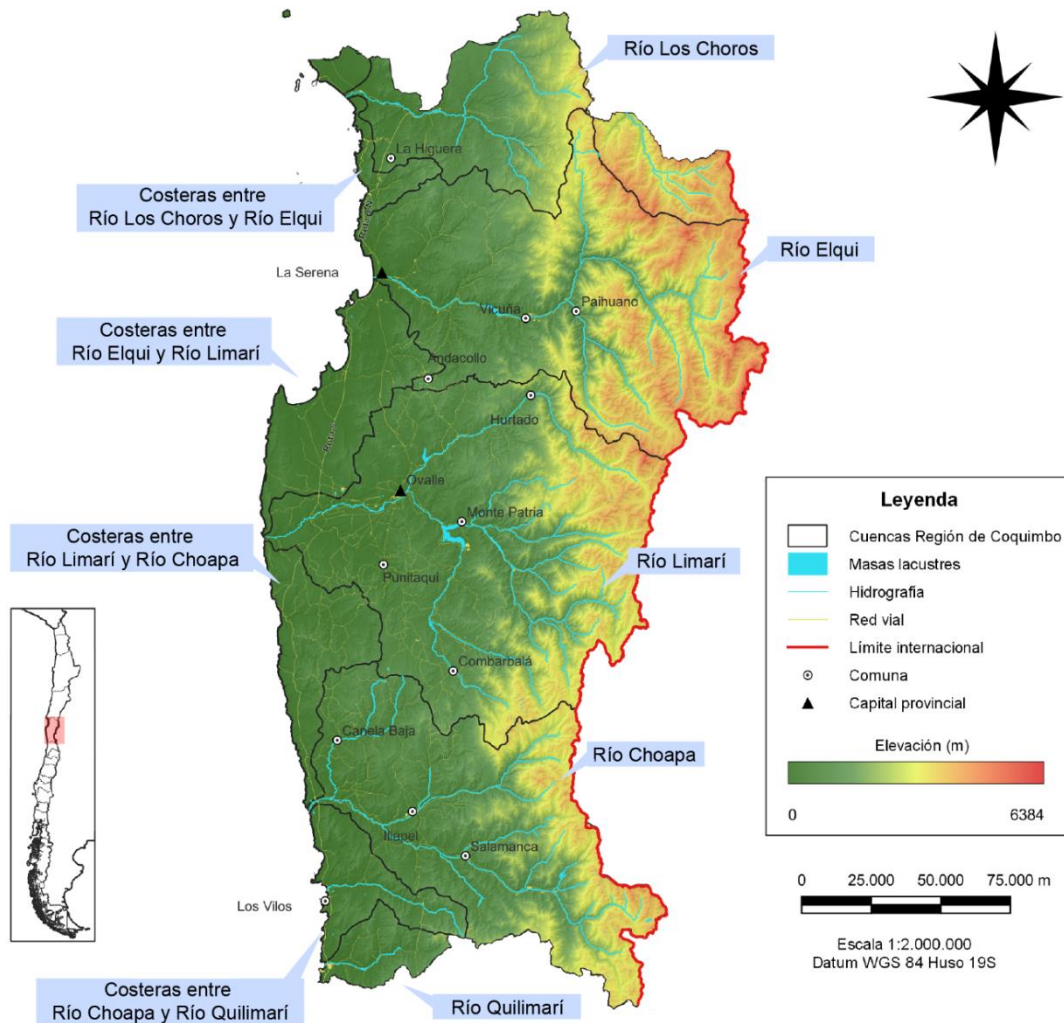


Figura 1.2: Área de estudio.

La región de estudio está compuesta por tres provincias, cada una articulada en torno a las cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. La provincia de Elqui cubre una superficie de 16895 km² y se divide administrativamente en seis comunas: La Serena (capital regional), La Higuera, Coquimbo, Andacollo, Vicuña y Paihuano.

La provincia de Limarí cubre una superficie total de 13553 km², equivalente a un 35,18% del territorio regional. Se divide administrativamente en cinco comunas: Río Hurtado, Monte Patria, Combarbalá, Punitaqui y Ovalle, siendo esta última la capital provincial, situándose a 86 km de La Serena.

Asimismo, la provincia de Choapa alcanza una superficie de 10079 km², con una división comunal en Illapel, Salamanca, Los Vilos y Canela. Esta provincia es la que cuenta con la menor cantidad de habitantes mientras que la provincia de Elqui es la más poblada, encontrándose el 26.55% de la población de la región en la ciudad de La Serena.

La conectividad existente a la Región de Coquimbo es aérea, marítima y terrestre. Los medios principales son el aeródromo La Florida en la ciudad de La Serena y la vía terrestre correspondiente a la Ruta 5 en un recorrido de 470 km aproximadamente desde la Región Metropolitana (Figura 1.2). Cuenta con una amplia red de carreteras que conecta a toda la zona con el resto del país.

En su interior existen varias rutas terrestres que conectan a las diferentes localidades. Las rutas principales se encuentran pavimentadas y existen múltiples caminos de ripio que permiten llegar a zonas alejadas dentro del área de estudio.

1.6. Metodología y plan de trabajo

1.6.1. Recopilación de Antecedentes

Para cumplir con los objetivos mencionados de esta memoria, el trabajo se concentra en el estudio de las cuencas de la región, constituyéndose una base de datos y así definir las cuencas principales, es decir, que abarcan la mayor cantidad de variables explicativas de la ocurrencia de agua subterránea y en las cuales se presenta la mayor población.

Se obtiene tras una recopilación de antecedentes geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, que incluye el levantamiento y revisión de datos disponibles en informes, artículos científicos, mapas y expedientes, entre otros, disponibles en instituciones como D.G.A, SERNAGEOMIN, centros de investigación, universidades y revistas científicas.

Para definir la ubicación de los puntos de levantamiento de información hidrogeológica y muestreo de agua, se recurre a los antecedentes disponibles en los expedientes de derechos de aprovechamiento del agua (DAA), específicamente, de aguas subterráneas a través de la base de datos de la DGA. Se realiza una especial búsqueda de los expedientes en las cuencas seleccionadas y, en ellos, se contemplan los resultados de pruebas de bombeo para obtención de parámetros hidráulicos.

A estos derechos se les aplica un criterio de búsqueda de antecedentes que pueden aportar a los objetivos del trabajo. Se incluye un análisis integral de la información del pozo, considerando estratigrafía, profundidad de basamento, niveles estáticos y caudales y calidad de aguas. Estos datos son la base para determinar la ubicación de los puntos de muestreo de isotopía e hidroquímica.

Se prosigue con recopilar la información geofísica existente de estudios anteriores en la región. Esto se utiliza como base para las planificaciones de los especialistas dentro del proyecto en términos de la definición del uso de las diversas metodologías geofísicas en terreno.

1.6.2. Campaña y Análisis Geofísico

Se desarrollan diversas metodologías de prospección geofísica como Gravimetría, Transiente Electromagnético (TEM), Tomografía Eléctrica (ERT), Audio Magnetotélúrico (AMT) y Sísmica Pasiva (MASW). La utilización de esta serie de métodos se basa en poder representar la geometría acuífera, estratos y flujos en los acuíferos de zonas dentro de la región.

Las metodologías AMT, Gravimetría y TEM, se concentran en sectores ubicados en las cuencas costeras y zonas de término de valles mayores. Por otro lado, se privilegia ERT, TEM, Gravimetría y MASW en sectores ubicados en partes medias y altas de las cuencas seleccionadas.

Se realizan las siguientes estaciones y perfiles geofísicos:

- 150 estaciones TEM, distribuidas en 12 perfiles, con estaciones separadas cada 400 metros, ubicadas en los sectores bajos de las cuencas, y cada 200, situadas en los sectores de media y alta cordillera.
- 200 estaciones gravimétricas con una distancia de 100 metros, emplazadas transversales a los valles de Elqui (Figura 1.3), Limarí, Culebrón y en el valle de Rio Hurtado.
- 2000 metros MASW, distribuidos en 2 perfiles dentro de la Quebrada El Arrayán.
- 8000 metros ERT, formando 8 perfiles ubicados en quebradas pequeñas de los sectores en ambiente hidrogeológico de roca fracturada.
- 200 estaciones AMT, distribuidas en 9 perfiles con puntos alejados cada 200 metros y ubicadas en sectores con gran desarrollo de rellenos sedimentarios.



Figura 1.3: Estación gravimétrica en localidad de La Serena, Región de Coquimbo, Chile.

Los datos geofísicos recolectados en terreno son procesados y analizados con posterioridad, según se detalla a continuación:

- Gravimetría: Se utiliza un sistema de interpretación por modelos de Inversión en 2D y 3D, permitiendo determinar la interfaz sedimentos/basamento e interpretar sus resultados posteriormente.
- TEM: Se realiza la inversión de las curvas de resistividad aparente mediante sistema interactivo TEMIXXL de Interpex para obtener las resistividades intrínsecas y los espesores de estratos del subsuelo. Luego, se efectúa una interpretación de las variaciones de resistividad y se determina la presencia de diferentes unidades estratigráficas como también el nivel freático y profundidad a la roca basal.
- ERT: Se utiliza un proceso de modelado inverso en 2D mediante software "2D Resistivity Inversion Software" de AGI.
- MASW: Se realizan modelos bidimensionales que muestran la distribución de velocidades (Vs) en función de la profundidad. Esto es por medio del software SeisOpt ReMiVspect V5.0, desarrollado por Optim Software. Estas funciones son las estudiadas posteriormente para la comprensión de las variaciones en cada sector.
- AMT: Los datos son modelados mediante un sistema de inversión bidimensional que da como resultado una sección de resistividad a lo largo del perfil. Se usa el programa SW-SCS2D smooth model inversion routine desarrollado por ZONGE. Como complemento, se usa el software WinGlink (Versión 2.1.02). Estos resultados son exportados del programa a archivos de formato XYZ, que son tomados con software Oasis-Geosoft para su representación en sección de resistividad en función de la profundidad.

1.6.3. Campaña y Análisis Hidrogeoquímico

1.6.3.1. Parámetros in-situ

Con el fin de caracterizar hidrogeoquímicamente la zona de estudio, se realiza el siguiente procedimiento:

- Se registra la ubicación de cada punto de muestreo mediante GPS navegador, especificando coordenada Norte y Este en Datum WGS84 H18.
- Se definen las superficies piezométricas, registrando nivel estático y dinámico con piezómetro, altura del dado de cemento y del brocal.
- Se prosigue con medir de forma in-situ, de ser posible, pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos de los pozos y esteros a través de un tester multiparámetro.

Una vez recopilados estos datos, para su análisis se utilizan diagramas de caja y bigotes junto a gráficas de esferas sobre cartografía.

1.6.3.2. Medición y análisis de muestras

Para la caracterización hidrogeoquímica e isotópica, se toman muestras de agua en pozos distribuidos en el interior de cuencas de interés, ya sean profundos, someros y/o norias, pozos de monitoreo de niveles de agua subterránea y de afloramientos de agua termal y no termal. Estas muestras son enviadas al laboratorio químico SGS Chile.

Se busca analizar, principalmente, el cambio gradual de la química y la señal isotópica del agua. En primera instancia, se realizan gráficas de esferas sobre cartografía y diagramas de Piper y Stiff georreferenciados, herramientas que buscan categorizar los tipos de aguas presentes en el área de estudio e identificar similitudes y diferencias entre estas.

Siguiendo con los isótopos estables δD y $\delta^{18}O$, se grafican junto a las Líneas de Agua Meteórica Global y Local para lograr una noción de la proveniencia y, por consiguiente, la sustentabilidad del recurso. También se grafica la relación entre $\delta^{18}O$ y la altitud para distinguir la altura a la que fueron precipitadas estas muestras de agua.

Capítulo 2: Marco geológico

2.1. Caracterización geológica regional

La geología de la región de estudio se constituye de unidades de rocas volcánicas, intrusivas, sedimentarias y metamórficas, con edades desde el Paleozoico al presente.

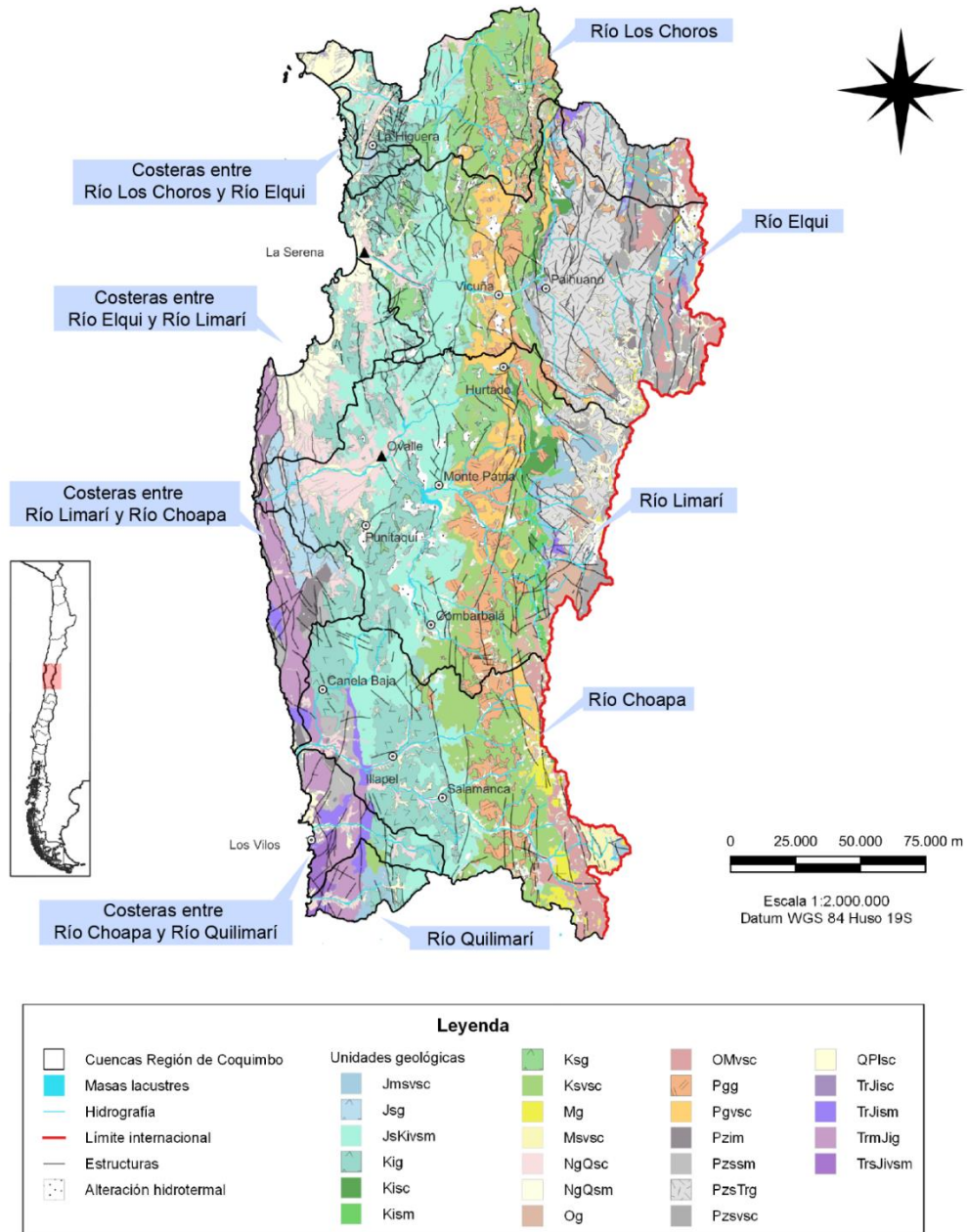


Figura 2.1: Geología del área de estudio.

Las unidades paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas en orden decreciente de edad se describen junto a sus características regionales más relevantes según principales lapsos del tiempo geológico y se presentan en la figura 2.1.

Las rocas más antiguas corresponden a una serie de unidades de rocas intrusivas, metamórficas y volcano-sedimentarias de edad Paleozoica a Triásica inferior y, discordantemente sobre esta, una cobertura Meso-Cenozoica de secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias de edad Triásico Medio al presente, las cuales son cortadas por rocas intrusivas del Triásico Medio al Neógeno.

2.1.1. Paleozoico-Triásico Inferior

Son los afloramientos más antiguos de la región. En la parte Occidental, la Cordillera de la Costa, afloran discontinuamente desde Bahía Choros hasta más al sur de la región de Coquimbo (Hervé et al., 2007), mientras que en la Cordillera principal afloran desde el norte de hasta la localidad de Las Ramadas a los 31°S aproximadamente.

2.1.1.1. Unidad Pzim

Corresponde a unidades de rocas metamórficas del Paleozoico Inferior. Es representada por los Complejos Metamórficos Punta de Choros, del Choapa y El Cepo.

Complejo Metamórfico Punta de Choros corresponde a esquistos micáceos y metasedimentitas del Carbonífero a Pérmico Medio en el sector Punta de Choros (Creixell et al., 2012). Es intruido por plutones del Jurásico Inferior y cubierto en discordancia por sedimentos miocenos de la Formación Coquimbo.

Complejo Metamórfico del Choapa es un conjunto de rocas metasedimentarias y metavolcánicas máficas remanentes de depósitos turbidíticos y rocas volcánicas de ambiente submarino. Afloran discontinuamente desde Puerto Aldea a Los Vilos y se encuentra cubierto en discordancia por Formación Arrayán y Huentelauquén. Rivano y Sepúlveda (1991) le determinaron una posible edad Paleozoica Inferior.

Complejo Metamórfico El Cepo corresponde a rocas metasedimentarias que afloran al sur en las nacientes del río Claro. Sus rocas muestran gran variabilidad litológica desde metareniscas hasta esquistos pelíticos de andalucita-cordierita y corneanas de biotita. Mpodozis y Cornejo (1988) obtuvieron edades K-Ar y Rb-Sr carboníferas para los granitoides que la conforman.

2.1.1.2. Unidad Pzssm

Corresponde a afloramientos de rocas sedimentarias marinas a lo largo de la Cordillera de la Costa al sur de los 31°30'S.

Formación Arrayán es una secuencia rítmica de areniscas y pelitas con estructuras primarias como marcas de fondo y estratificación convoluta (Rivano y Sepúlveda, 1991). Estos autores le otorgaron una edad Devónica-Carbonífera Inferior por el contenido fosilífero presente.

Formación Huentelauquén es una secuencia de areniscas, conglomerados y calizas fosilíferas que afloran desde la latitud del cerro Talinay al sur, en discordancia angular y de erosión con Formación Arrayán. Rivano y Sepúlveda (1991) le otorgaron una edad Carbonífera Superior-Pérmica Inferior.

Formación Hurtado corresponde a secuencia fundamentalmente pelítica, con intervalos de cuarzarenitas y subfeldsarenitas. Sobre esta se encuentra en discordancia Formación Pastos Blancos y es intruida por granitoides de la Superunidad Elqui. Los autores Mpodozis y Cornejo (1988) le asignaron una edad devónica-carbonífera.

2.1.1.3. Unidad Pzsvsc

Formaciones Pastos Blancos, Rivadavia y Mata Huaico conforman esta unidad y corresponden a rocas riolíticas, pórfidos riolíticos e intrusivos subvolcánicos con intercalación sedimentaria que afloran entre los 29°3' y 31°S en el sector de la Cordillera de los Andes (Mpodozis y Cornejo, 1988; Nasi et al., 1990; Rivano y Sepúlveda, 1991).

Formación Pastos Blancos, constituida por lavas riolíticas, flujos ignimbríticos, tobas e intercalaciones de brechas volcanoclásticas y escasos niveles de areniscas y conglomerados. Se distribuye entre río Grande y río Hurtado formando afloramientos discontinuos.

Formación Matahuaico, Dedios (1967) la definió como una secuencia de lavas, tobas y brechas riolíticas con intercalaciones sedimentarias, intruida por pórfidos graníticos y granitos de la Superunidad Ingaguás (Permo Triásico). Es una delgada franja al oeste de río Claro.

2.1.1.4. Unidad PzsTrg

La conforman complejos intrusivos múltiples formados por plutones de edad Carbonífero Superior-Triásico Inferior en la Cordillera Principal (Nasi et al. 1985, 1990 y Mpodozis y Cornejo, 1988).

Batolito Elqui Limarí, correspondiente a uno de estos complejos, y constituye un gran conjunto de plutones. Ortiz y Merino (2015) los agrupan en dos superunidades, Elqui (Carbonífero Superior-Triásico Inferior) que constituye la porción occidental del Batolito Elqui Limarí (Nasi et al., 1985) e Ingaguás (Permo-Triásico), una asociación de plutones hololeucráticos al oriente de la Superunidad Elqui (Mpodozis y Cornejo, 1988). Estas superunidades afloran desde río Turbio al sur.

2.1.2. Triásico Medio- Jurásico Inferior

Los afloramientos de esta unidad corresponden a rocas sedimentarias de ambiente marino, de ambiente transicional a fluvial, intercalado con rocas volcánicas y volcanoclásticas, distribuidos principalmente en sector costero y en franjas longitudinales angostas de la Cordillera de los Andes. Charrier et al. (2007) afirmó que a estos afloramientos las intruyen rocas intrusivas del Triásico Medio a Jurásico Inferior (TrmJig).

2.1.2.1. Unidad TrJism

En la Cordillera de la Costa la conforman las formaciones Canto del Agua, El Quereo, Cerro Talinay, Quebrada del Pobre y los Estratos de Pupío correspondientes a secuencias de rocas sedimentarias del Triásico-Jurásico Inferior. El ambiente de depositación es marino (abanicos deltaicos) a transicional continental (tipo fluvial con intercalaciones de volcanitas).

Rivano y Sepúlveda (1991) describieron que estas rocas sobreyacen en discordancia a la Formación Arrayán al sur de la región, subyacen a las volcanitas de Formación Pichidangui del Triásico Medio Superior y son cortadas por una franja plutónica Triásico-Jurásica (Emparán y Pineda, 2006). En la zona de la Cordillera Principal se encuentran unidades de rocas sedimentarias marinas carbonatadas y terrígenas, con intercalación de evaporitas y lavas almohadillas dispersas en los flancos del núcleo plutónico Paleozoico Triásico y cubriéndolo.

2.1.2.2. Unidad TrJisc

Esta unidad corresponde a rocas sedimentarias y volcánicas continentales del Triásico Medio-Jurásico Inferior, definida como Formación Las Breas.

Formación Las Breas, definida por Dedios (1967) como secuencia de rocas sedimentarias continentales (conglomerados, areniscas y lutitas carbonosas). Está situada en la vertiente occidental del macizo granítico Paleozoico en la Cordillera de los Andes. Mpodozis y Cornejo (1988) afirmaron que representa un ambiente distal de tipo aluvial. Le otorgó una edad Triásica Media-Superior por la flora fósil encontrada.

2.1.2.3. Unidad TrsJivsm

Es una unidad de secuencias sedimentarias marinas y volcánicas del Triásico Superior – Jurásico Inferior.

Formaciones Pichidangui y La Ligua representan esta unidad en la Cordillera de la Costa (Rivano y Sepúlveda, 1991) y se componen de flujos riolíticos, tobas líticas y cristalinas relacionadas a domos riolíticos, con basaltos y diabasas e intercalaciones de lutitas. En este sector, la unidad sobreyace concordantemente a la Formación El Quereo e infrayace a la Formación Los Molles (Rivano, 1996).

Formaciones La Tatora y Los Estratos de Río Seco representan a la unidad en el extremo norte de la región en el sector Vegas de Toro (Mpodozis y Cornejo, 1988) y se componen de andesitas macizas, intercaladas con brechas, conglomerados, areniscas y calizas. Al este del batolito Elqui-Limarí se encuentran reducidos afloramientos de rocas volcánicas de la Formación Estratos de Río Seco que, por su posición estratigráfica, pueden ser atribuidas al Triásico (Mpodozis y Cornejo, 1988).

2.1.2.4. Unidad TrmJig

Corresponde a las rocas intrusivas del Triásico Medio a Jurásico Inferior. La constituye el complejo intrusivo Altos de Talinay y la Superunidad Mincha y afloran en la Cordillera de la Costa desde Puerto Aldea hasta el límite sur de la región como una franja continua N-S.

Complejo Intrusivo Altos de Talinay, es una agrupación de plutones polideformados gabroicos, dioríticos, monzograníticos y graníticos que afloran en sector costero, en contacto tectónico con el Complejo Metamórfico del Choapa por medio de fallas normales. Son rocas cataclásticas y miloníticas de protolito plutónico, con una edad de 212 Ma obtenida por análisis U-Pb en circones, definiendo una edad de cristalización Triásica Superior (Emparán y Pineda, 2006).

Superunidad Mincha, son granitoides hololeucocráticos del Jurásico Inferior a Medio que intruyen al Complejo Metamórfico del Choapa, Formaciones Arrayán y Huentelauquén y a Formaciones El Quereo, Pichidangui y los Estratos de Pupío. Es la franja occidental más antigua de intrusivos Mesozoicos, al sur de los 31°S (Rivano et al., 1985).

2.1.3. Jurásico Medio-Superior

Corresponden a rocas plutónicas y volcanosedimentarias distribuidas discontinuamente en el sector occidental costero y franjas longitudinales angostas en la Cordillera Principal, asociadas a ambiente de arco pluto-volcánico y una cuenca de tras-arco hacia el este que pasa de ambiente marino a continental desde el Caloviano (Rossel et al., 2013).

2.1.3.1. Unidad Jmsvsc

Unidad formada por secuencias de rocas volcano-sedimentarias continentales representadas por formación Algarrobal, Baños del Toro, Mostazal, Tordillo y Estratos de Barriquita en la Cordillera de los Andes (Rivano y Sepúlveda, 1991). Son lavas y brechas andesíticas, tobas dacíticas, conglomerados, areniscas de color rojo y yeso, depositadas concordantemente sobre rocas del Triásico Medio-Jurásico Inferior marino. (Dedios, 1967; Makshev et al., 1984; Mpodozis y Cornejo, 1988).

Formaciones Ajial y Horqueta representan a esta unidad en la Cordillera de la Costa, siendo depósitos piroclásticos ácidos a intermedios del arco volcánico subaéreo (Cancino et al., 1991).

2.1.3.2. Unidad Jsg

Son las rocas intrusivas del Jurásico Superior, correspondientes a monzogabros, monzodioritas cuarcíferas a granodioritas, de grano medio a grueso. Se exponen en franja de plutones alargados con dirección N-S distribuidos discontinuamente en la Cordillera de la Costa (30°30'S – 31°S). Son cortadas por diques de felsitas afaníticas de la misma edad. (Thomas, 1967 y Emparan y Calderón, 2012).

Un ejemplo de estas rocas es el Plutón San Juan (ca 148 Ma) a 30 km al norte de La Serena, correspondiente a dioritas porfídicas. La falla Romeral es causante de la deformación dúctil de estas. Por el oeste, la unidad está en contacto por medio de fallas con el Complejo Plutónico Altos de Talinay (TrmJig) y, hacia el este, intruida por plutones del Cretácico Inferior (Kig).

2.1.4. Cretácico Inferior

Corresponden a rocas volcánicas y sedimentarias marinas, rocas sedimentarias continentales y rocas intrusivas. Afloran en el borde oriental de la Cordillera de la Costa, en el borde occidental de la mediana montaña en una franja continua de N-S y algunas en el borde occidental de la Cordillera de los Andes.

2.1.4.1. Unidad JsKivsm

Las secuencias de rocas volcano-sedimentarias atribuidas al Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Se encuentran a lo largo de toda la región, abarcando parte de la Cordillera de la Costa y parte de la mediana montaña, representadas por el Grupo Bandurrias (Moscoso, 1984) y Grupo Ovale (Thomas, 1967; sensu Moscoso, 1984).

Grupo Bandurrias, constituido por formación Bandurrias y Formación Punta del Cobre. Al norte engranan lateralmente hacia el este con rocas de las secuencias sedimentarias marinas (kism) del Grupo Chañarcillo (Segerstrom, 1958). Se apoyan discordantemente sobre las secuencias marinas Triásico-Jurásicas y los complejos metamórficos del Paleozoico.

Grupo Ovale, compuesto por Estratos de Tamaya, Estratos de El Reloj y la Formación Arqueros. Esta última se definió por Emparán y Pineda (1999; 2000) como una sucesión rocas volcánicas, principalmente andesitas basálticas y con intercalaciones sedimentarias marinas, mayormente calizas, areniscas y lutitas. Los afloramientos forman franja orientación N-S. Estos autores le determinaron una edad Berriasiana-Aptiana.

2.1.4.2. Unidad Kism

Se compone por una alternancia de areniscas, lutitas y calizas asignadas al Grupo Chañarcillo del Cretácico Inferior y aflora en el sector de media montaña desde más allá del norte de la región, representado por las formaciones Abundancia, Nantoco, Totalillo y Pabellón (Segerstrom y Parker, 1959 en Corvalán, 1973).

En la Cordillera Principal aflora como rocas carbonatadas de origen marino de la formación Río Tascadero asignada al Cretácico Inferior que forma franja de 60 km que se extiende desde Portezuelo El Azufre (31°20'S) hasta el valle de Los Molles y Quebrada Represas (Mpodozis y Cornejo, 1988). Esta formación cubre, en discordancia angular, las formaciones Mostazal y Algarrobal. Estos autores le otorgan edades del Barriasiano Superior, Valanginiano y Hauteriviano.

La unidad cubre en discordancia de erosión a la Formación Pucalume (Pineda y Emparán, 2006), sobreyace a Grupos Bandurrias y Ovale (Emparán y Pineda, 2000b), infrayace a las formaciones Cerrillos y/o Viñita y, además, la intruyen numerosos plutones de edad Cretácica (140-70 Ma).

2.1.4.3. Unidad Kisc

Rocas sedimentarias continentales, representada por la Formación Pucalume.

Formación Pucalume, una secuencia estratificada de areniscas y conglomerados (Dedios, 1967), que se distribuyen en el borde occidental de la Cordillera de los Andes. Cubre y engrana con Formación Río Tascadero y se apoya, directamente, sobre la Formación Algarrobal en lugares como Quebrada San Agustín y Río Claro. Su techo está marcado por el paso discordante a la Formación Viñita atribuida al Cretácico Superior. Su edad sería Cretácica Inferior (Mpodozis y Cornejo, 1988).

2.1.4.4. Unidad Kig

Comprende una serie de complejos plutónicos que se distribuyen a lo largo de la Cordillera de la Costa, siendo aproximadamente el 60% del total de las unidades litológicas que conforman el Cretácico Inferior. Posee características batolíticas y se reconocen complejos plutónicos de composiciones desde granito a diorita.

Intruyen a Formaciones Punta del Cobre, Arqueros y Quebrada Marquesa del Cretácico Inferior y a franjas intrusivas del Jurásico. Rivano et al. (1985) agrupó estas rocas al sur de los 31° como Superunidad Illapel, o también denominado Complejo Plutónico Illapel, compuesto por dioritas, tonalitas y granodioritas, con una edad en el rango de los 117 y 87 Ma (Morata et al., 2010).

2.1.5. Cretácico Superior

Franja N-S a lo largo de mediana montaña. Son rocas volcánicas y sedimentarias continentales y rocas intrusivas.

2.1.5.1. Unidad Ksvsc

Es una secuencia volcánica continental constituida por coladas de lavas andesíticas, andesítico basálticas, tobas de lapilli y brechas piroclásticas con intercalaciones de rocas sedimentarias epiclásticas. Se representan por las formaciones Viñita, Cerrillos, Salamanca y Lo Valle, y Estratos de Quebrada La Totorá (Nasi et al., 1990; Mpodozis y Cornejo, 1988; MaksaeV et al., 1984; Rivano y Sepúlveda, 1986; Rivano y Sepúlveda, 1991)

Se distribuye a lo largo de una franja de rocas volcánicas y sedimentarias de orientación N-S, con una extensión de más de 350 km a lo largo de la mediana montaña y el margen occidental de la Cordillera Principal y con un ancho de 30 km.

2.1.5.2. Unidad Ksg

Corresponden a intrusivos dispuestos en una franja que va desde el extremo norte de la región hasta el embalse de Cogotí en la mediana montaña del Cretácico Superior (ca 100-70 Ma). Son principalmente complejos félsicos a intermedios de composición que va desde granito a diorita, de grano grueso a medio e incluye en menor proporción cuerpos hipabisales de composición dacítica a andesítica, las que intruyen a las formaciones Punta de Cobre, Arqueros, Quebrada Marquesa, Cerrillos y/o Viñita y también a las rocas plutónicas del Cretácico Inferior. (Pineda y Emparán, 2006 y Pineda y Calderón, 2008).

2.1.6. Paleógeno

Son rocas volcánicas, sedimentarias continentales y rocas intrusivas que afloran en una franja N-S a lo largo de la mediana montaña y parte de la Cordillera de los Andes. En este periodo sigue la actividad magmática que parte en el Cretácico Superior donde su distribución es controlada regionalmente por las fallas Vicuña, Rivadavia y Tuluahuén.

2.1.6.1. Unidad Pgvsc

Son secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias continentales (lavas, tobas y brechas) de composición basáltica a riolítica, ubicadas en la mediana montaña y parte de la Cordillera de los Andes desde el norte hasta la latitud de Illapel.

Es representada por *Formación Los Elquinos y Estero Cenicero*, y los *Estratos de Quebrada El Calvario* y de *Quebrada Yungay* de probable edad Cretácico Inferior a Paleoceno. Emparán y Pineda (1999) redefinieron Formación Los Elquinos, separándola en 2 unidades: Estratos de Quebrada Yungay (kqy) y la Formación Los Elquinos (Kle), quedando la primera como secuencia volcánica de lavas y tobas e ignimbritas y la segunda como una secuencia volcanosedimentaria continental bien estratificada.

Se extiende en forma continua desde el valle del río Elqui hasta la quebrada del Chacay. Su edad Campaniana Maastrichtiana se debe a sus relaciones de contacto; en su base la Formación Viñita y los plutones de 66 ma que los intruyen (Emparán y Pineda, 2006).

Parte de esta unidad corresponde a complejos volcánicos discretos: *Cerro El Inca* y *La Corina* del Paleoceno, y *Cerro Blanco* y *Altos del Yareta* del Eoceno. Se suman las rocas asociadas a Calderas Casablanca y Llano Perrada del Paleoceno, y la caldera Tierras Blancas del Eoceno (Emparan y Pineda, 2000).

2.1.6.2. Unidad Pgg

Corresponde a intrusivos dispuestos en franja N-S que atraviesa la región de edad Paleocena Eocena (ca. 68-40 Ma) y se distribuyen en el borde oriental de la mediana montaña y la parte occidental de la Cordillera Principal, en cercanías de intrusivos del Cretácico Superior.

Estos complejos plutónicos están compuestos por granodiorita, monzogranito, monzodiorita, diorita, diorita cuarcífera, y algunos intrusivos hipabisales riolíticos a andesíticos (Pineda y Emparán, 2006). Intruyen a las formaciones Cerrillos, Viñita, Los Elquinos y Salamanca, y a cuerpos intrusivos del Cretácico Superior (ksg), con una distribución controlada por fallas Vicuña y Rivadavia (Creixell et al., 2013).

En el sur de la región se encuentra la *Unidad San Lorenzo* y *Superunidad Cogotí*. Rivano et al., 1985 describió esta última como una franja de intrusivos que aflora en la vertiente occidental de la Alta Cordillera entre 31° y 32°S. Dataciones K-Ar (biotita) parecen indicar una edad, principalmente, Paleocena-Eocena (Mpodozis y Cornejo, 1988).

Dentro de esta unidad se incluyen también unidades intrusivas como *Complejo Plutónico Peralta* (42-40 Ma), *Complejo plutónico Los Morros* (ca. 64 Ma), *Complejo Plutónico El Orito* (ca. 50 Ma), Granitoides de la carta Condoriaco Rivadavia (56.51 Ma), *Granodiorita Guatulame* (ca.

50 Ma) y *Granodiorita Rapelcillo* (ca. 57 Ma), los cuales son contemporáneas con rocas volcánicas de calderas Casablanca, Llano Perrada y Tierras Blancas y a los complejos volcánicos Cerro El Inca y La Corina (Emparán y Pineda, 1999).

2.1.7. Neógeno al Reciente

Ocurre la última fase andina en la región, desarrollándose el sollevamiento de la Cordillera de los Andes, la migración arco volcánico y el desarrollo de unidades morfoestructurales que forman las planicies litorales (Charrier et al., 2007). Se acumulan rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias Neógenas distribuidas en la Cordillera de los Andes y estas son atravesadas por rocas intrusivas de la misma edad.

2.1.7.1. Unidad OMvsc

Unidad constituida por rocas volcano-sedimentarias del Oligoceno Mioceno. La representa la Formación Doña Ana.

Formación Doña Ana, denominada así por Martin et al. (1995), es constituida por lavas, brechas y conglomerados andesíticos con tobas subordinadas. Esta formación tiene dos miembros, el miembro Titilo, formado por flujos de ignimbritas riolíticas y dacíticas, tobas y escasas intercalaciones de lavas andesítico-basálticas, y el miembro Escabroso, correspondiente a una secuencia maciza de más de 300 metros de aglomerados que alternan con coladas de lavas andesíticas de color gris-verdoso y pardo-rojizo.

2.1.7.2. Unidad Og

Rocas intrusivas restringidas a la Cordillera de los Andes, al este de la franja de intrusivos del Paleógeno. Se conforma por Unidad Bocatoma y Superunidad Río Grande. Intruyen a granitoides del Paleozoico Triásico (PzsTrg) y a secuencias volcano-sedimentarias del Jurásico al Cretácico.

Unidad Bocatoma, unidad que aflora entre río Cochiguaz y el río Mostazal, compuesta por granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas (ca. 34 Ma Oligoceno Inferior).

Superunidad Río Grande, un conjunto de rocas intrusivas que afloran entre Río Grande y las nacientes del Río Cogotí. Se constituye por unidad Río Las Cuevas (monzogranitos, granodioritas, monzodioritas y dioritas cuarcíferas) y unidad El Polvo (pequeños stocks de dioritas y gabros). Este Plutón intruye a la Formación Río Tascadero en el valle del Tascadero. Rivano et al., (1985) obtuvieron una edad K-Ar Oligocena Superior-Miocena Media(?) de la superunidad.

2.1.7.3. Unidad Msvsc

Corresponden a rocas volcanosedimentarias que afloran en la Cordillera de los Andes entre los 29°30' y 30°30'S y de una edad Miocena. Se representa por las formaciones Cerro Las Tórtolas, Vacas Heladas y Vallecito. (Nasi et al., 1990).

Formación Cerro Las Tortolas, es una secuencia volcánica que sobreyace de manera discordante a Formación Baños del Toro (Jurásico Superior-Cretácico) y a Formación Doña Ana (Oligoceno Mioceno). Diversos autores como Makshev et al. (1984), Martin et al., (1995) y Ortiz y Merino (2015) otorgaron a esta formación una edad Miocena Inferior-Media, ca. 13.18 Ma.

Formación Vacas Heladas, de edad Miocena Medio-Superior (Martin et al., 1995), se extiende desde zona de Maricunga en Región de Atacama hasta franja de yacimientos epitermales de El Indio. Es concordante a Formación Cerro Las Tórtolas y está cubierta por gravas aluviales del Mioceno (Ortiz y Merino, 2015).

Formación Vallecito, una secuencia de brechas poco consolidadas con intercalación de rocas sedimentarias lacustres, yeso e ignimbritas riolíticas, con una edad Mioceno Superior-Plioceno, 7, 6-4 Ma (Makshev et al., 1984; Nasi et al., 1990).

2.1.7.4. Unidad Mg

Contiene rocas intrusivas del Mioceno distribuidas discontinuamente en Cordillera de Los Andes cercanas a la frontera y al este de la franja de intrusivos del Oligoceno. La constituyen la Unidad Infiernillo y Superunidad Río Chicharra.

Unidad Infiernillo, compuesta por agrupación de pequeños stocks situados entre los ríos Grande y Hurtado en el cordón fronterizo pero que continúan hacia el norte a través de las nacientes del río Ingaguás y Quebrada San Andrés. Las rocas cajas son el Complejo Metamórfico El Cepo, Formación Pastos Blancos, granitoides paleozoicos y, en el valle del río La Laguna, Formación Doña Ana (Rivano y Sepúlveda, 1986). Makshev et al. (1984) propusieron una edad Miocena Inferior (17-14 Ma).

Superunidad Río Chicharra, correspondiente a franja de stocks e intrusivos subvolcánicos, composición ácida a intermedia que intruye rocas Cretácicas y Cenozoicas. Se distinguen tres unidades: Río Cerro Blanco del Mioceno Medio (Rivano y Sepúlveda, 1991), Portezuelo del Azufre del Mioceno (Rivano et al., 1985) ubicada en las nacientes del estero Cenicero (31°20'S), y Tambillos de edad Miocena Superior (Rivano et al., 1991), ubicada en el sector del río Ttotal.

2.1.7.5. Unidad NgQsm

Constituida por rocas sedimentarias marinas de la Formación Coquimbo de ambiente litoral marino.

Formación Coquimbo, es definida por Emparán y Pineda (2000) como sucesión sedimentaria marina fosilífera, bien estratificada. Presenta facies sedimentarias de ambiente litoral y, en parte, transicional, y numerosas discontinuidades intraformacionales, por lo que posee un ambiente depositacional litoral marino. Dataciones K-Ar en biotita determinó una edad de 6 Ma y, además, posee antecedentes paleontológicos que confirman la edad en el rango Mioceno-Pleistoceno (Emparán y Sepúlveda, 2012).

2.1.7.6. Unidad NgQsc

Rocas sedimentarias continentales de la Formación Confluencia y depósitos de sedimentos aluviales semiconsolidados asignados a las Gravas de Atacama.

Formación Confluencia es una secuencia sedimentaria continental bien estratificada y con débil litificación. Forma terrazas que alcanzan su mayor expresión en zona litoral y las desembocaduras de los grandes valles transversales en localidades Los Choros, La Serena, Coquimbo, Ovalle, Illapel y ríos Elqui, Limarí, Choapa y Estero Conchalí (Emparán y Pineda, 2000).

Se otorgó una edad Mioceno Pleistoceno por Emparán y Pineda (2000) por la relación de engrane lateral con los depósitos de la Formación Coquimbo y la fauna fósil marina en esta.

2.1.7.7. Unidad QPlsc

Constituida por depósitos no consolidados generados a partir de procesos aluviales, fluviales, fluvioaluviales, coluviales, glaciares, fluvioglaciares, lacustres, morrénicos, eólicos y de remoción en masa.

Se distribuyen y forman el material de los principales valles y quebradas de la región. Destacan por la extensión de los depósitos fluvio-aluviales de ríos Elqui, Limarí y Choapa, y en menor medida, el estero Pupio y el río Quilimarí. La edad de estos depósitos es Pleistocena-Holocena (Emparán y Pineda, 2000).

2.2. Caracterización tectónica

2.2.1. Geomorfología

El territorio nacional se caracteriza en gran parte por poseer 3 unidades morfoestructurales principales, Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal de los Andes. No obstante, la Región de Coquimbo del centro-norte de Chile, se caracteriza por la ausencia de la depresión tectónica central, lo que es consecuencia de la compresión tectónica W-E (Parada et al., 2007).

El relieve de la zona con orientación W-E incluye una estrecha llanura costera con un rango de 10 a 20 km de ancho, una zona de media montaña con un ancho promedio de 55 km y altitudes entre 200 y 2000 msnm; la parte más occidental, Cordillera de la Costa, y el cinturón montañoso andino, de 40 a 60 km de ancho y que alcanza alturas de 5000 msnm. El límite entre estos dominios morfoestructurales, Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes, es bastante marcado y está controlado por fallas de empuje (Oyarzún et al., 2017).

2.2.2. Tectónica y estructural

El área de estudio se caracteriza por distintos dominios estructurales orientados en dirección norte sur.

La génesis de estas morfoestructuras es en la tectónica de placas desde el Cretácico Inferior hasta el reciente. En el Cretácico Inferior Tardío-Superior da comienzo a la deformación y tectónica a partir de un colapso de la cuenca marginal “abortada” del Norte Chico, como definió Mpodozis y Ramos (1988) a la cuenca volcánica extensional de tras-arco. A lo largo del margen occidental de la Cordillera Frontal la deformación fue absorbida a través de una serie de grandes láminas a favor de las que el relleno de la cuenca marginal cabalgó sobre o fue empujado bajo del margen occidental de la cordillera frontal.

Se deformó esta cordillera posterior al colapso de la cuenca marginal al momento de la instalación del arco magmático Oligo-Mioceno sobre ella y debilitó termalmente la corteza (Figura 2.2). La cordillera frontal se deformó en un estilo de acortamiento de la corteza continental que se caracteriza por un apilamiento de cabalgamientos que afectan a la cobertura sedimentaria principalmente y en menor grado al basamento cristalino. Al norte, en la zona de antepaís, la deformación es menor y, esto, podría relacionarse directamente con el muy alto nivel de la zona de transición Frágil Dúctil (ZTFD), consecuencia del magmatismo durante la deformación.

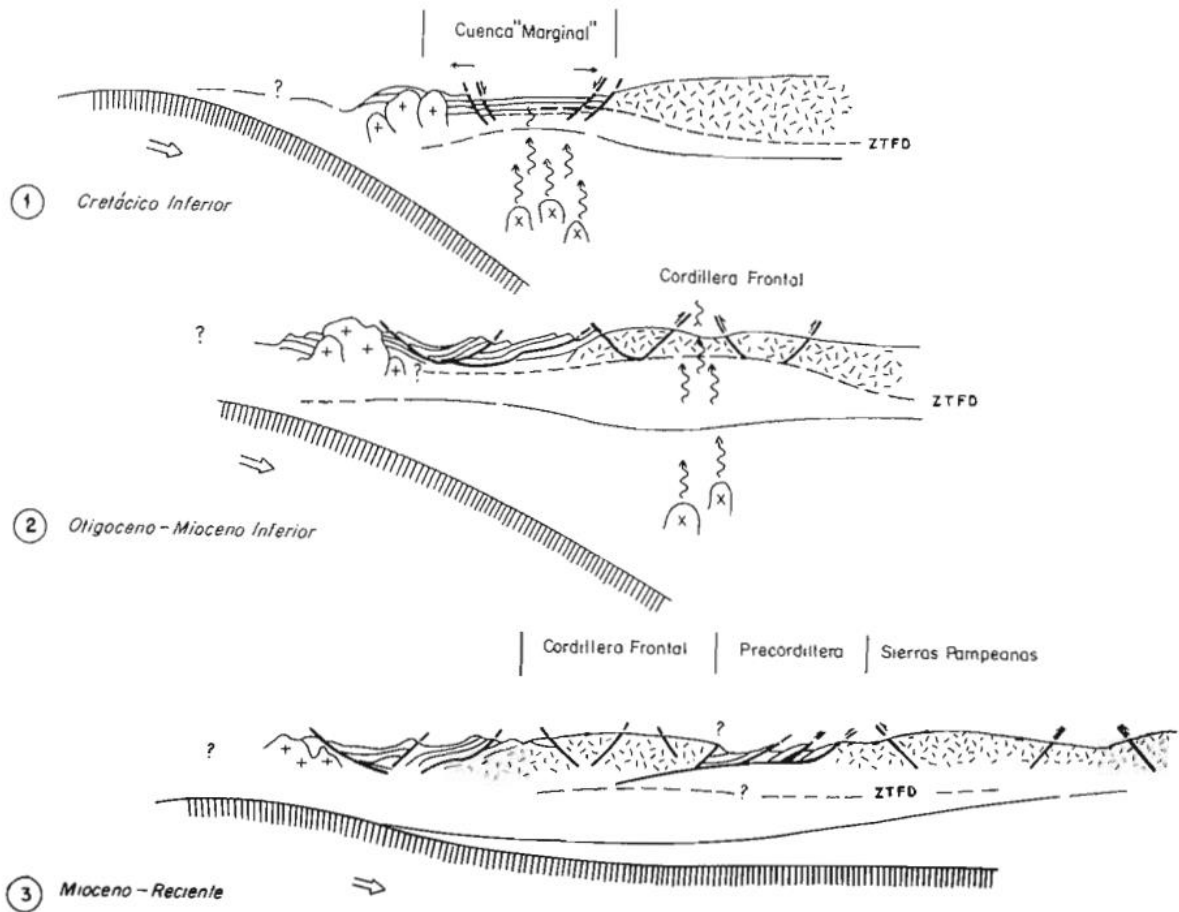


Figura 2.2: Esquema de la evolución tectónica del Norte Chico desde el Cretácico Inferior hasta el Reciente (Moscoso y Mpodozis, 1988).

Frente a que la cordillera frontal no es propiamente una cadena de antepaís, sino que constituye el núcleo del orógeno andino, Moscoso y Mpodozis (1988) la describen como cadena de antepaís fósil inactiva, atrapada al interior del sistema por la migración hacia el este del frente de deformación por el aplanamiento del ángulo de subducción en el Mioceno.

La Región de Coquimbo posee 3 dominios estructurales distinguibles: dominio occidental, central y oriental.

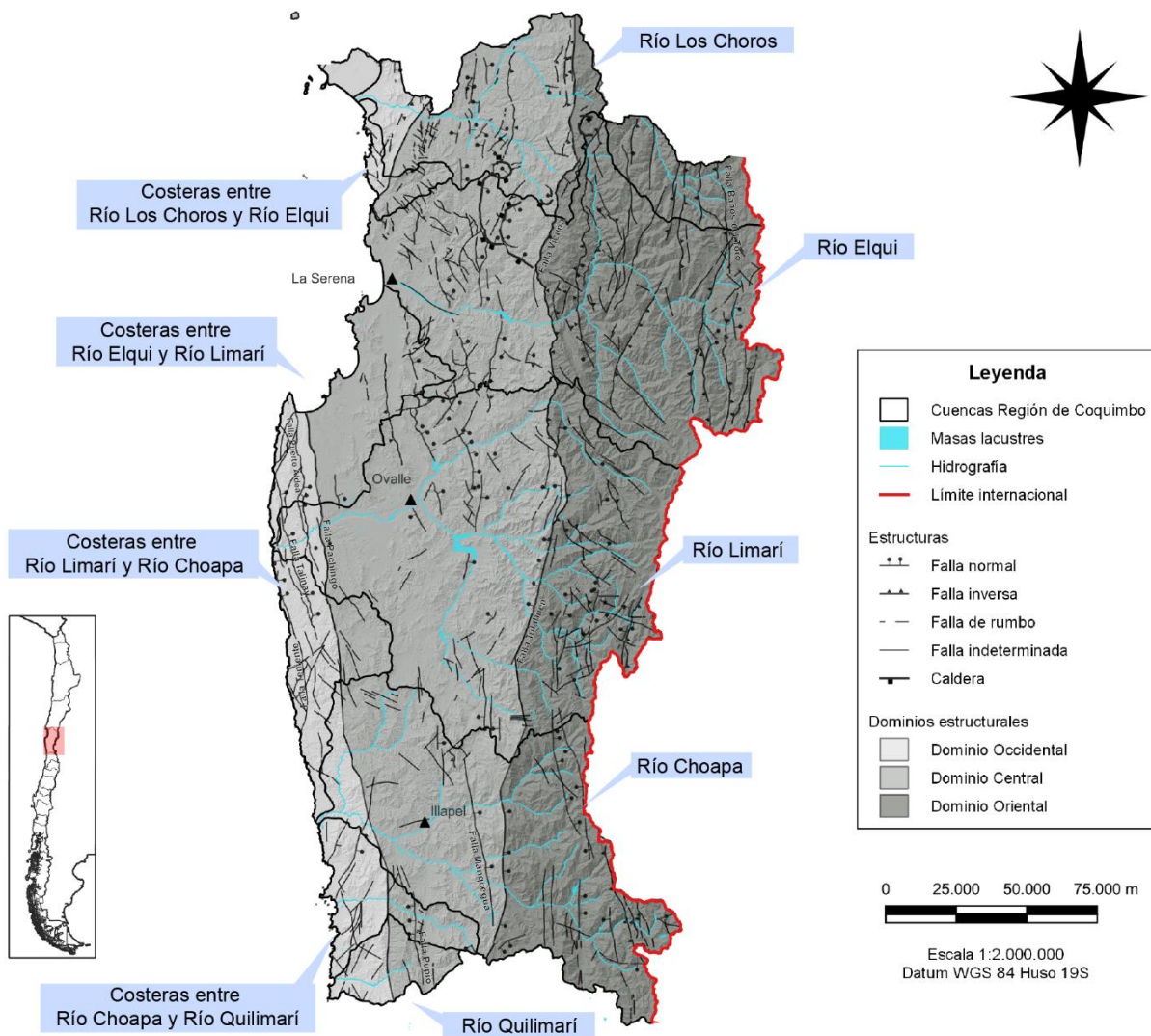


Figura 2.3: Dominios estructurales y principales estructuras del área de estudio.

En primer lugar, el *dominio estructural Occidental* cubre el sector occidental de la Región de Coquimbo y abarca parte de la actual Cordillera de la Costa donde el límite occidental es la línea de costa actual y límite oriental está constituido por los sistemas de fallas Atacama, Puerto Aldea, Pachingo y sus prolongaciones al sur. El dominio está conformado por un sistema de fallas reconocido desde Puerto Aldea hacia el sur (Emparán y Pineda, 2006). Corresponden a fallas normales con dirección N-S a N-NO, que levantan el bloque costero. Sus trazas se curvan regionalmente a los 31° de latitud aproximadamente por efecto de un sistema de fallas Noreste, interpretándose como el sistema de fallas P en el modelo de Riedel por causa del movimiento de bloques a lo largo de fallas Puerto Aldea, Pachingo, Los Huiros, Talinay y Teniente, o por una reactivación normal (Thomas, 1967; Gana, 1991, Muñoz Cristi, 1942, 1973; Emparan y Pineda, 2006).

En fallas mayores de este dominio, como la falla Teniente, existen rasgos de deformación dúctil que reflejan una evolución. Es una falla sinistral con componente normal que levanta

bloque occidental de la Cordillera de la Costa y se representa como una franja milonítica de protolito sedimentario y plutónico, asociable a una etapa de deformación dúctil, transpresiva de edad Triásica Superior a Jurásica. Además, se han descrito franjas cataclásticas a miloníticas asociadas a la falla Talinay, las cuales ejercieron control en el emplazamiento de unidades intrusivas del Jurásico Superior (Emparan y Calderón, 2012).

En el sector sur de este dominio se encuentra la falla Silla del Gobernador, ubicada entre Los Vilos y Pichidangui. Se interpreta como falla de cizalle dúctil con edades geocronológicas que indican un movimiento entre los 109-97 Ma, coincidente con la exhumación obtenida por Maksaeve (1990) y Scheuber y Andriessen (1990) en la falla Romeral y falla de Atacama. Estas edades se interpretan como la edad de inversión de la cuenca Jurásico-Cretácica Inferior, al final de la primera etapa de evolución andina.

En segundo lugar, el *dominio estructural central* se emplaza en una zona que comprende el sector oriental de la Cordillera de la Costa y la mediana montaña. El límite al Occidente está marcado por el sistema de fallas de Atacama por el norte y fallas Puerto Aldea, Pachingo al centro, y hacia el sur, otras fallas de orientación N-S sin nombre. Los límites por el Oriente son marcados por fallas Vicuña, Tulahuén y Llimpo (Emparán y Pineda, 2006).

El sistema de fallas de Atacama, SFA, es una megaestructura regional con orientación submeridiana N-NE que caracteriza al borde oriental de la Cordillera de la Costa al norte de Chile por más de 1000 km de longitud (20°- 29°30' latitud sur). Arabasz (1971) designó subdivisiones de estos, siendo el principal el segmento El Salado en el extremo noroccidental de la región, con extensión entre localidades Taltal y La Serena.

Este sistema estructural comprende serie de fallas orientación meridional y sistemas conjugados de rumbos NE y NO. Hay zonas de deformación dúctil asociadas a fallas transcurrentes y constituyen franjas miloníticas donde algunas están formadas a lo largo de los bordes de intrusivos del Cretácico Inferior (Uribe y Niemeyer, 1984; Scheuber, 1994; González, 1996; Cembrano et al., 2010, Naranjo et al., 1984). Thiele y Pincheira (1987) lo vincularon con la convergencia oblicua de placas.

Por último, el *dominio estructural oriental* corresponde al sector de la Cordillera de los Andes que se ubica al este de la falla Vicuña. Presenta grandes fallas inversas longitudinales dirección N- que alcanzan a las rocas intrusivas del Paleozoico Superior-Triásico hacia el este. Estas estructuras del núcleo paleozoico permitieron desarrollar una deformación del tipo piel gruesa (thick skinned) en que grandes bloques están limitados por fallas inversas lograr cubrir en sectores secuencia de rocas Triásica Jurásica (TrJism) y secuencias continentales del Jurásico Medio Superior (Jmvs) (Moscoso y Mpodozis, 1988; Nasi et al., 1990).

El área de estudio posee fallas destacables como las fallas Vicuña, Tulahuén, Baños del Toro y Pocuro. Son reconocidas desde más allá del extremo norte de la región uniéndose con falla San Felix hasta el río Tomes por el sur, donde es cortada por falla Tulahuén (Rivano y Sepúlveda, 1991). Esta última es una falla normal que alza el bloque oriental e intersecta a rocas del Cretácico Superior y del Paleógeno, con un desplazamiento promedio de 2 km y vergencia hacia el oeste. Posee una extensión de 50 km aproximadamente en dirección N-S desde río Tomes hasta río Cogotí.

La falla Baños del Toro es descrita por Nasi et al. (1990) como una falla regional de tipo inversa con rumbo NS a NNO, manteo 60° a 80° O y vergencia al este. Posee una extensión de 100 km desde río Potrerillos (Región de Atacama) hasta el sector norte de las nacientes del río Cochiguaz por el sur de la región de estudio.

Las fallas Vicuña y Baños del Toro son el pilar tectónico de las rocas Paleozoica Superior-Triásicas, las cuales están afectadas por fallas inversa de rumbo NS y desplazamientos verticales de 800 a 1500 m. Determinan una serie de grabenes secundarios en los cuales rocas Meso-Cenozoicas se alojan y amoldan.

La falla Pocuro se reconoce entre $31^{\circ}45'$ y 33° S, con un rumbo predominantemente N-S (Rivano y Sepúlveda, 1991). Rivano (1996) lo describió como elemento estructural mayor que corresponde a una zona de falla extensiva, en parte de rumbo, con una serie de fallas paralelas y conjugadas que obliteran la estratificación por el intenso clivaje. Campbell (2005) lo denominó un sistema formado por fallas inversas de alto ángulo y vergencia oeste. Estuvo activo al menos hasta Mioceno Inferior.

Cabe destacar la falla Pelambres, la cual es una falla inversa con vergencia al este y forma parte de fajas plegadas y corridas de alta cordillera mostrando en la zona de estudio una intensa deformación, con estilos de piel gruesa y delgada, una deformación de bloques de basamento y de la cobertura, expresada por corrimientos y estructuras imbricadas (Mpodozis et al., 2009; Perelló et al., 2012).

Capítulo 3: Marco hidrogeológico

3.1. Descripción general de cuencas

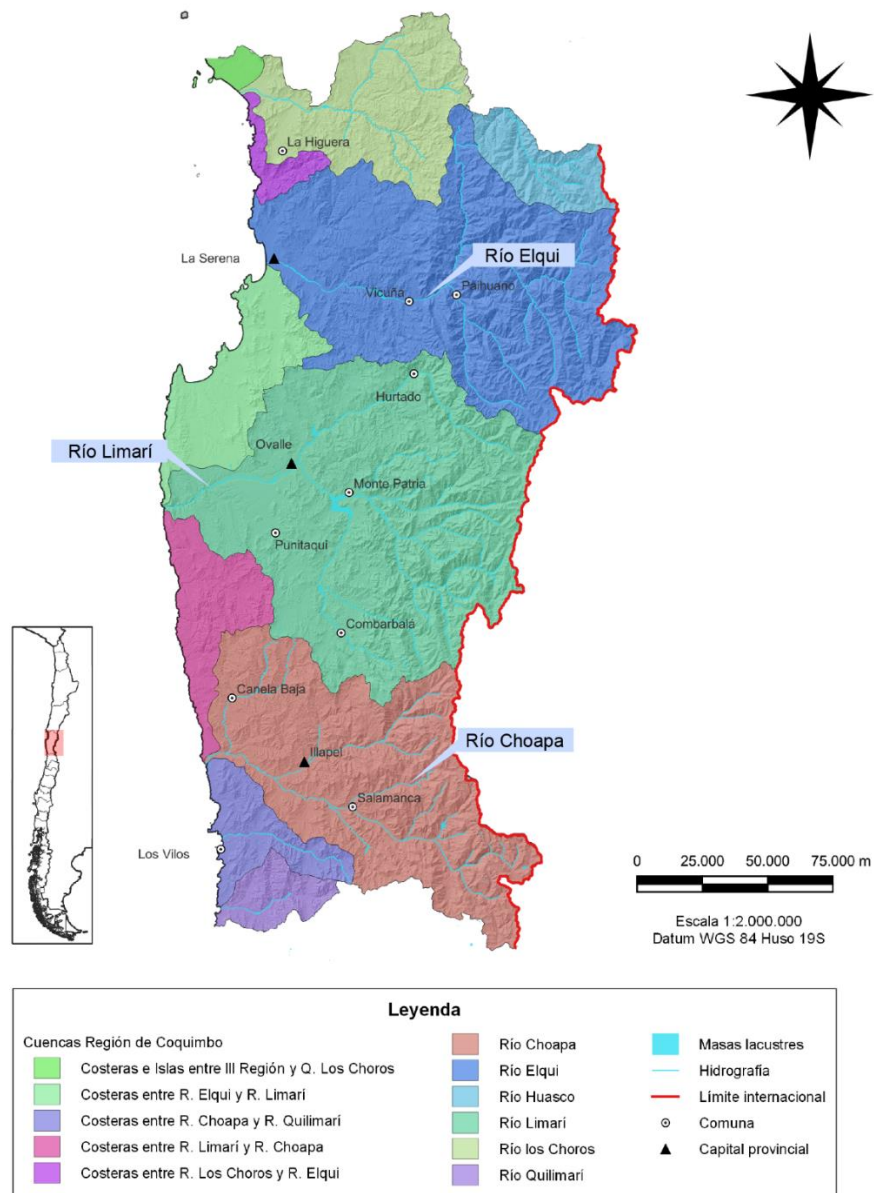


Figura 3.1: Cuencas hidrográficas de la Región de Coquimbo

Los principales rasgos de esta región son la existencia de tres importantes valles transversales, que de norte a sur se conocen como los valles de Elqui, Limarí y Choapa. Por el norte de la región se emplaza el valle del Elqui, que es uno de los más anchos y largos. En el centro de la región se ubica el valle del río Limarí, que se caracteriza por un encajonamiento en su curso superior, con laderas de pendientes abruptas. Al sur de la región se ubica el valle del río Choapa, siendo el más estrecho de las principales cuencas.

Los ríos Elqui, Limarí y Choapa nacen en la Cordillera de Los Andes y desembocan en el mar. En la Figura 3.1, se presenta una vista general de la región y las cuencas hidrográficas en las que se divide.

En la zona norte de la región, el río Elqui nace a los 815 msnm. en la Cordillera Principal, con una cuenca de 9.826 km², un caudal medio de 15 m³/s y un régimen principalmente nival, con deshielos en verano. Sus principales tributarios en época de deshielo, son los ríos Turbio y Claro. Sus aguas se utilizan principalmente en el regadío del valle del Elqui y para consumo humano de las principales ciudades como La Serena, Coquimbo y Vicuña (DGA, 2004a). En la parte alta la permeabilidad es muy baja debido a la existencia de rocas metamórficas y sedimentarias, volcánicas y plutónicas e hipabisales del Paleozoico, motivo por el cual el escurrimiento subterráneo es paralelo a los cauces. Uno en dirección E-W paralelo a Río Turbio, otro en dirección sur a norte, paralelo al río Claro y un tercer escurrimiento desde Rivadavia hasta la desembocadura en la Serena en dirección E-W (Zabala et al., 2008).

El río Limarí nace en la Cordillera Principal y se encuentra en el centro de la región, los aportes más importantes son los ríos Hurtado, Grande y Guatulame. Tiene un área aportante de 11.800 km² aproximadamente con un caudal medio de 25 m³/s. La regulación de sus aguas es mediante el sistema de embalses Recoleta, La Paloma y Cogotí. (DGA, 2004a). La cuenca posee en general un régimen pluvio-nival similar al de la cuenca del río Elqui, con crecidas en invierno y primavera producto de las lluvias y deshielos respectivamente (Alfaro y Honores, 2001). El sentido de escurrimiento es de oeste a este, siguiendo curso del río, con un gradiente promedio de napa subterránea desde Rivadavia a La Serena de 1% (CORFO, 1955).

En la zona sur, el río Choapa nace en plena Cordillera Principal y se forma por la confluencia de los tributarios Totoral, Leiva y del Valle. Aguas abajo y aún dentro de la cordillera, el río Choapa recibe como afluentes al Cuncumén y al Chalinga, en su curso medio recibe un afluente importante, el río Illapel. Su cuenca hidrográfica abarca una superficie de 8.124 km². Desemboca al mar junto a la Caleta de Huentelauquén, a unos 35 km al norte del puerto de Los Vilos (DGA, 2004a).

Las cuencas Costeras entre estos ríos, como Río Elqui y Río Limarí, corresponden a cuencas exorreicas que tienen una superficie de 2.300 km² y se encuentra en las provincias de Elqui y Limarí. La principal característica es que no nacen en la cordillera y dado que las precipitaciones son escasas, los ríos que la integran rara vez llevan agua. Como ocurre en todas las cuencas costeras, están afectadas por el fenómeno de la camanchaca hasta los 800 o 1000 msnm (DGA, 1984).

Las cuencas en que se enfoca este trabajo corresponden a Río Elqui, Río Limarí y las cuencas costeras entre estos ríos, los que se determinaron de acuerdo con ciertos criterios, que se indican a continuación. En primer lugar, la superficie que abarcan en conjunto equivale al 59% del área regional y en ella se encuentran dos de los tres valles de mayor importancia. Esta unidad territorial se extiende desde la Cordillera Principal de los Andes hasta la línea de costa y se tiene registro de todos los tipos de clima, relieve y geformas.

En segundo lugar, según el Censo del año 2017, la población en este territorio corresponde a 531689 habitantes (70% de los habitantes de la región). Esta concentración se correlaciona directamente con un mayor uso y consumo de agua personal o ligado a actividades agrícolas y, en menor medida, mineras.

	Población total	Hombres	Mujeres	Porcentaje hombres (%)	Porcentaje mujeres (%)
Región de Coquimbo	757.586	368.774	388.812	48,7	51,3
Provincia de Elqui	496.337	239.495	256.842	48,3	51,7
La Serena	221.054	105.836	115.218	47,9	52,1
Coquimbo	227.730	109.872	117.858	48,2	51,8
Andacollo	11.044	5.519	5.525	50,0	50,0
La Higuera	4.241	2.236	2.005	52,7	47,3
Paihuano	4.497	2.240	2.257	49,8	50,2
Vicuña	27.771	13.792	13.979	49,7	50,3
Provincia de Choapa	90.670	46.144	44.526	50,9	49,1
Illapel	30.848	14.739	16.109	47,8	52,2
Canela	9.093	4.632	4.461	50,9	49,1
Los Vilos	21.382	11.061	10.321	51,7	48,3
Salamanca	29.347	15.712	13.635	53,5	46,5
Provincia de Limarí	170.579	83.135	87.444	48,7	51,3
Ovalle	111.272	53.619	57.653	48,2	51,8
Combarbalá	13.322	6.656	6.666	50,0	50,0
Monte Patria	30.751	15.270	15.481	49,7	50,3
Punitaqui	10.956	5.452	5.504	49,8	50,2
Río Hurtado	4.278	2.138	2.140	50,0	50,0

Tabla 2: Porcentaje de hombres y mujeres por comuna, Región de Coquimbo, Censo 2017 (INE, 2019).

En tercer lugar, las características geológicas de estas cuencas presentan potencial para albergar acuíferos debido a ser rocas antiguas y competentes definidas como material con muy baja permeabilidad, pero la zona presenta reconocidas estructuras que podrían conferir una permeabilidad secundaria. Las unidades en la cabecera de estas cuencas representan parte del arco magmático Oligo-Mioceno del cual aún se preservan sistemas geotermales y zonas de alteración argílica relacionada. En estas rocas se identifican estructuras en direcciones N-S y E-W que podrían otorgar condiciones favorables para almacenamiento y transporte de aguas subterráneas.

En cuarto lugar, en estas cuencas se concentra gran parte de los sectores de la región con pozos de mayor productividad, antecedentes que se ven corroborados con la información de los expedientes de DAA subterráneos recopilados, detallados más adelante (Tabla 1).

3.2. Clima y precipitación

La Región de Coquimbo es considerada una zona de transición entre el clima desértico característico del norte del país y el clima templado mediterráneo presente a grandes rasgos en el centro-sur del mismo.

A lo largo de toda la costa se presenta el clima de tipo estepárico costero o nuboso, cuya influencia llega hasta 40 km al interior. Se caracteriza por una abundante nubosidad, humedad, temperaturas moderadas y un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales con un período seco de 8-9 meses (Cepeda et al., 2008). Al interior de la región, por sobre los 800 msnm., predomina el clima de estepa templado marginal que se caracteriza por ausencia de nubosidad y una atmósfera seca. En la Cordillera principal, sobre los 3.000 msnm., predomina el clima de estepa fría de montaña, que se caracteriza por altas precipitaciones, bajas temperaturas, fuertes vientos, una alta radiación solar y nieves permanentes que constituyen un importante aporte de agua en el período estival (Cepeda et al., 2008).

A grandes rasgos, el clima está fuertemente condicionado por el Anticiclón del Pacífico Sur el cual es un área de altas presiones semipermanente que se ubica en el océano frente al norte y centro del país. Los vientos producidos por este giran en el sentido antihorario y son cálidos y secos, lo que en definitiva genera un clima estable semiárido, con escasas lluvias. La temperatura media anual a lo largo de la costa es de 14°C, aumentando a 16°C hacia el interior. La precipitación media anual en el interior es de 100 mm (promediando los últimos 30 años en Ovalle), mientras que en la Cordillera de los Andes es de aproximadamente 180 mm (lluvia más nieve). Además, la región se caracteriza por fuertes variaciones inducidas por los vientos del oeste que se correlacionan con los años de "El Niño", que traen las lluvias intensas e inundaciones repentinas (Oyarzún, 2006).

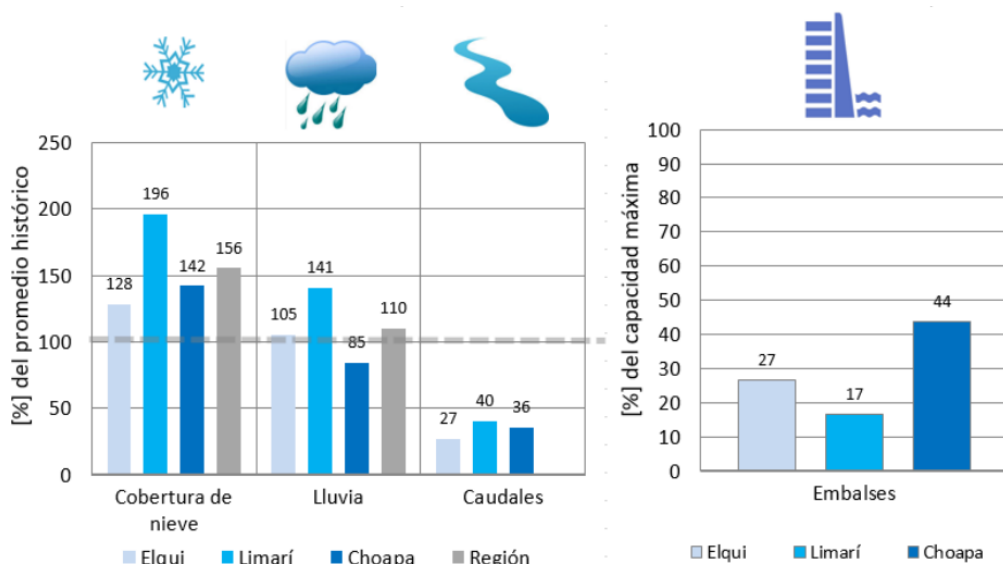


Figura 3.2. Estado precipitaciones y caudales al 30 de noviembre, 2022 (lado izquierdo) y Estado Embalses al 30 de noviembre, 2022 (lado derecho) (CEAZA, 2022).

El déficit de precipitaciones aumentó al doble desde 2020 a 2021, lo cual ha provocado que los caudales se presenten bajos por cuarto año consecutivo con valores muy bajos. La temporada actual presenta un 27% de los históricos en Elqui, 40% en Limarí y 36% en Choapa, situación que también ha llevado a una constante disminución de los niveles de agua embalsados en los últimos años. En la actualidad, el agua embalsada en Elqui es de un 27% de su capacidad, Limarí un 17% y Choapa un 44% (CEAZA, 2022).

3.3. Escorrentía

La Región de Coquimbo presenta tres importantes ríos: Elqui, Limarí y Choapa, todos ellos nacen en la Cordillera de Los Andes y desembocan en el mar. El río Elqui es de régimen de alimentación mixta. Sus principales tributarios, en época de deshielo, son el río Turbio y Claro. El río Limarí que posee tributarios como los ríos Hurtado, Grande y Guatulame. Destacan en su estructura la regulación de sus aguas por los embalses de Recoleta, La Paloma y Cogotí. Los ríos Tocolnal e Illapel son los principales tributarios del río Choapa.

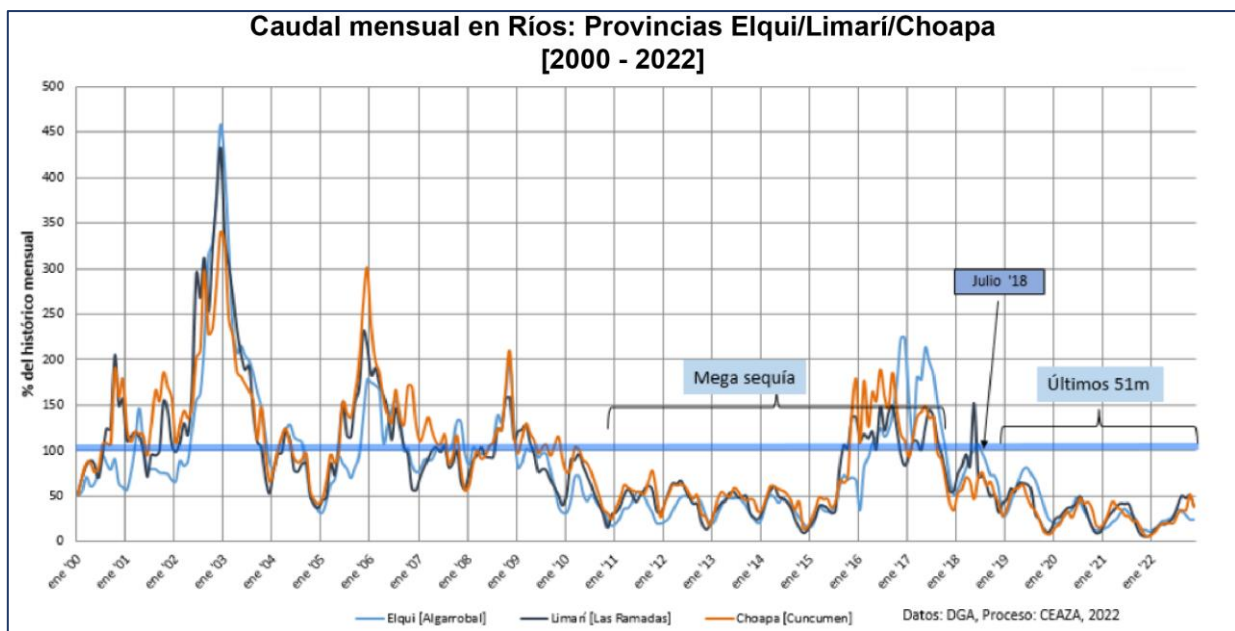


Figura 3.3: Evolución de los caudales como porcentaje del histórico mensual por cuenca, desde enero del 2000 a la fecha (CEAZA, 2022).

Desde inicios de 2022, los caudales se presentan bajo lo normal en las 3 cuencas detalladas. Los ríos principales, de las tres provincias de la región, registraron 24% (Elqui), 39% (Limarí) y 38% (Choapa) de los valores históricos de la temporada, respectivamente.

Actualmente, la región está en una situación muy precaria, en términos de los promedios anuales de los caudales observados en lo que fue el 2021 el promedio más bajo de la climatología (1990-2020) en las tres cuencas. Los caudales presentan niveles muy bajos desde la primavera de 2017 (Figura 3.3), debido a las escasas lluvias y nevadas de los últimos 4 años consecutivos. (CEAZA, 2022).

3.4. Embalses

Entre los 27°y 33°S se presentan cuencas hidrográficas exorreicas, en donde la red hídrica está marcada por angostos valles transversales, los más importantes de ellos de alcance cordillerano, con ríos de régimen mixto aunque fundamentalmente nival, y caudales crecientes, de 2 hasta 30 m³/s. En esta zona se ha construido numerosos embalses para regularizar y aprovechar los escurrimientos superficiales (DGA, 1986).

La cantidad de agua contenida en los embalses regionales en la actualidad está entre el 11% y el 60%. Porcentualmente, existe mayor reserva de agua embalsada en Choapa y menos en Limarí. Elqui registra un nivel intermedio de ambas provincias, finalizando sus embalses con un 27% de su capacidad máxima.

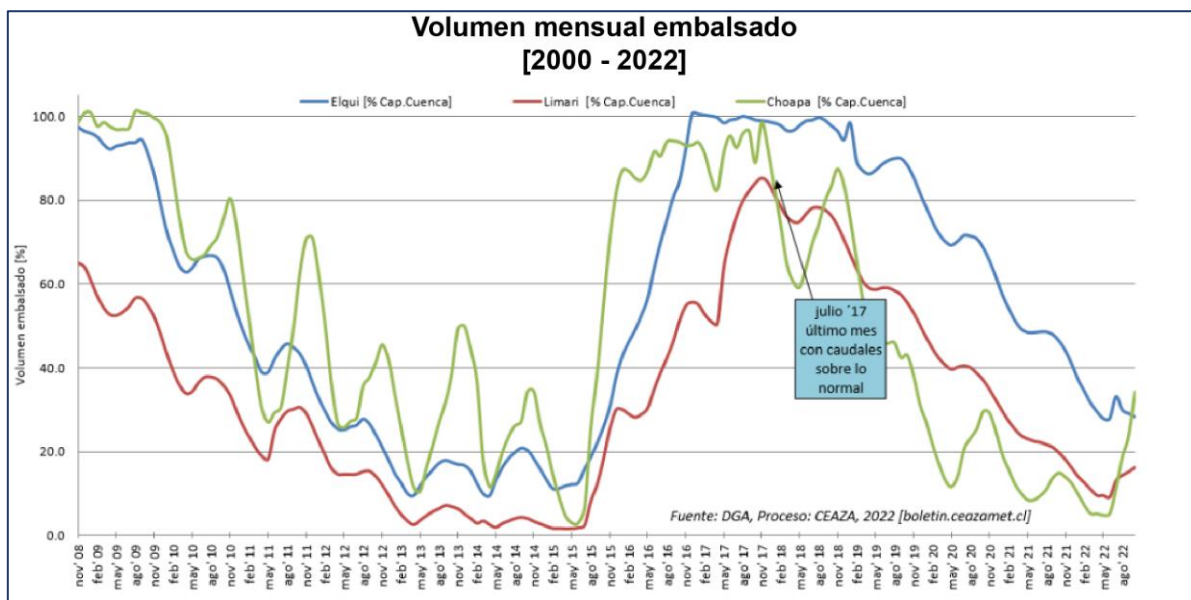


Figura 3.4: Comparativa interanual del volumen mensual embalsado regional y por cuenca del período 2000- 2022 (CEAZA, 2022).

Debido a las capacidades y diferencias en las cuencas, el agua embalsada se comporta muy diferente en las 3 cuencas: Elqui actualmente mantiene en la cuenca un 28% embalsado, en donde su embalse de cabecera, La Laguna, corresponde a un 60% de las reservas y con un 21% en el embalse Puclaro. Limarí tiene un 17% embalsado, siendo La Paloma el más crítico con un 16%. En cambio, la provincia de Choapa tiene un 44% embalsado (Figura 3.4).

La intensa actividad agrícola que se desarrolla en las cuencas seleccionadas depende, en gran parte, del abastecimiento de agua que se genera desde la regulación de la escorrentía superficial mediante embalses, concentrándose en las dos primeras cuencas.

3.5. Usos de suelo

La información referente a los usos del suelo en la región se resume en la tabla 2. Se aprecia que las provincias de Elqui y del Limarí poseen la mayor extensión de superficies con uso de suelo y, particularmente, con importantes terrenos agrícolas en ciudades de mayor población como La Serena, Coquimbo y Ovalle.

CATASTRO DE BOSQUE NATIVO			CATEGORÍAS DE USOS DE SUELO							TOTALES		
Región	Provincia	Comuna	Áreas urbanas e Industriales	Terrenos Agrícolas	Praderas y Matorrales	Bosques	Humedales	Áreas desprovistas de vegetación	Cuerpos de Aguas o Aguas Continentales	Otros	Total Comunal	Total Provincial
Coquimbo	Elqui	La Higuera	1.232	101	407.296		51	5.270		722	414.673	1.708.131
		Vicuña	217	7.981	468.531	44	39.190	243.279	437		759.679	
		La Serena	3.446	11.464	171.555	421	941	2.347			190.174	
		Coquimbo	3.615	10.542	126.280	146	1.517	395	12	2	142.509	
		Andacollo	1.623	623	49.259			38			51.543	
		Paihuano		4.582	68.449			76.522			149.553	
	Limarí	Ovalle	1.427	41.612	309.472	738	326	956	676		355.205	
		Río Hurtado	138	4.922	149.662			65.792			220.515	
		Punitaqui	182	4.537	103.732	288		157			108.897	
		Monte Patria	323	17.954	274.212	1.337	2.309	122.040	2.602		420.777	
	Choapa	Combarbalá	382	4.980	177.624	1.570	5.938	38.517	669		229.680	
		Canela	261	2.388	212.829	2.712	11	1.266	13		219.480	
		Illapel	529	6.807	194.200	1.897	9.208	50.279	5		262.925	
		Los Vilos	698	1.901	163.356	16.094	39	3.720	113	22	185.944	
	Salamanca	335	11.753	187.909	9.108	2.164	133.549	130		344.948		
Total Regional			14.409	132.146	3.064.368	34.356	61.692	744.127	4.657	747	4.056.502	4.056.502

Tabla 3: Superficie con categorías de Uso de Suelo en miles de hectáreas a nivel comunal y provincial (CIREN, 2012)

El 75% de la superficie regional se encuentra cubierta por vegetación del tipo matorral y praderas, debido a las condiciones climáticas imperantes caracterizadas por la aridez y la escasa precipitación, la alta humedad que se acentúa hacia el sur de la región, entre otros factores. Estas condiciones se ven reflejadas en el tipo de vegetación dominante correspondiente a la arbustiva.

Otro porcentaje importante son las áreas desprovistas de vegetación que alcanzan un 18,3%, las cuales consideran a las playas y dunas, afloramientos rocosos y las áreas sobre el límite de vegetación que para la zona se consideran sobre la cota 3.800 msnm. El uso de suelo agrícola alcanza el 3,3% del total de la superficie regional (Figura 3.5). Esta actividad se ve relegada solo a valles y sectores de secano interior y se debe a que la región tiene como actividad principal la minería extractiva, que corresponde al sector económico primario.

La agricultura se desarrolla principalmente por el uso intensivo de los valles transversales, desde el norte hacia el sur: Elqui, Limarí y Choapa. La alta actividad caprina también se destaca dentro de este sector, la cual es alimentada por la vegetación natural dominante del sector (CIREN, 2012).

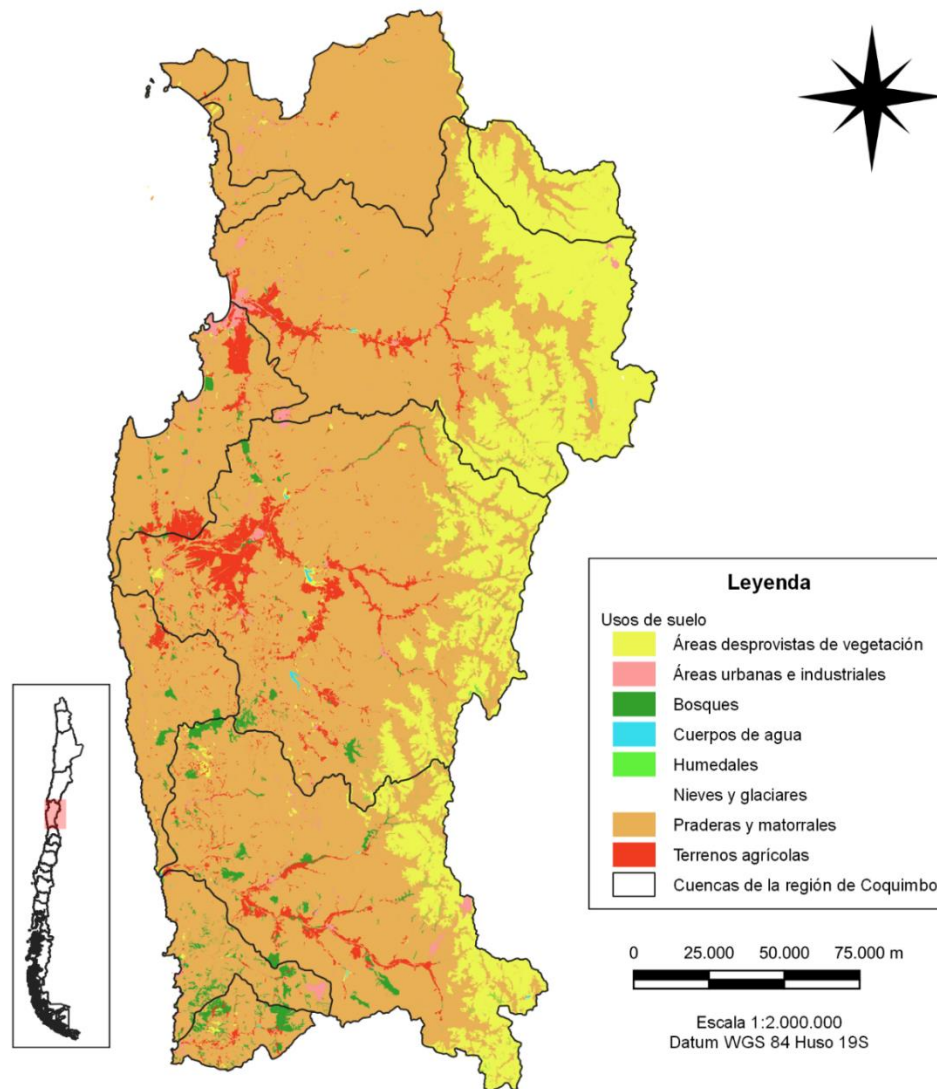


Figura 3.5: Usos de suelo en la Región de Coquimbo

3.6. Franja metalogénica

En Chile la principal área productiva del país es la minería metálica, siendo el principal productor de cobre del mundo con presencia importante de yacimientos de otros metales tales como plata, oro y hierro. La concentración anómala de estos metales y, posterior explotación, puede tener consecuencia en su entorno, tanto por procesos naturales como por factores antrópicos. Esto incrementa las posibilidades de que estos yacimientos interactúen con los diferentes reservorios de aguas subterráneas.

En primera instancia, desde una perspectiva genética, el emplazamiento de los diferentes yacimientos metálicos andinos está condicionado a la actividad magmática durante las diferentes etapas de formación del orógeno Andino. Una de las condiciones de primer orden que determina

la ubicación y características de los diferentes depósitos, es el tipo y emplazamiento de cuerpos intrusivos en el arco volcánico. En la historia Andina, desde el Jurásico Tardío hasta la actualidad, se ha evidenciado una marcada tendencia de migración del arco hacia el este. Esto ha permitido agrupar a los yacimientos Andinos en diferentes *Franjas Metalogénicas* (Maksaev 2001).

Se identifican dos etapas importantes en la metalogénesis Andina:

I. Jurásico – Cretácico Temprano, que se caracteriza por depósitos estrato-ligados de Cu (Ag), de Cu-Au-óxidos de Fe (IOCG), óxidos de Fe-apatito, pórfidos Cu subordinados y baja ley. En esta etapa se pueden identificar 2 franjas Metalogénicas: Jurásica y Cretácica Temprana.

II. Cretácico Tardío – Presente, la cual posee un fuerte dominio de pórfidos cupríferos y epitermales de metales preciosos. Se pueden identificar 3 franjas metalogénicas mayores: Paleoceno - Eoceno, Eoceno Tardío – Oligoceno, y Mioceno - reciente.

En la Región de Coquimbo se presentan mayormente yacimientos asociados a actividad magmática hidrotermal, y en menor medida una asociación con eventos sedimentarios hidrotermal o concentración mecánica en placeres. A continuación, se presentan generalidades sobre las características de los depósitos de las franjas Metalogénicas de mayor importancia del área de estudio.

- *Franja Metalogénica del Cretácico Inferior*

Ubicada en el extremo occidental de la Cordillera de los Andes, donde se identifican algunos pórfidos cupríferos subeconómicos. El pórfido Cu-Mo es el principal yacimiento en explotación con alta ley de Oro (0.23 g/t Au). El control estructural regional de estos depósitos ferríferos está dominada por el Sistema de Falla de Atacama.

- *Franja Metalogénica del Cretácico Superior*

Corresponde a una franja en la parte media del país, la cual incluye vetas mesotermiales a epitermales de oro y plata. La mayor parte de las vetas auríferas corresponden a sistemas de tipo carbonato-metales base-oro como Mantos de Punitaqui en el caso de la región de estudio (Maksaev 2001).

- *Franja Metalogénica del Neógeno*

Es la franja más oriental de Chile, la que incluye otro grupo de pórfidos cupríferos de gran importancia económica para el país, como Los Pelambres, Río Blanco - Los Bronces y El Teniente. En la Alta Cordillera entre los 26° y 33° se incluye Fajas de Maricunga y El Indio con depósitos epitermales de metales preciosos mayormente de tipo sulfato- ácido.

Los depósitos epitermales de la franja de El Indio tienen una edad comparable a la de pórfidos cupríferos del Mioceno Superior de la zona central de Chile y la misma posición geográfica en alta cordillera superponiéndose con los pórfidos cupríferos. De manera

complementaria, la existencia de mineralización de tipo pórfido cuprífero se ha mencionado en niveles profundos del distrito El Indio (Maksaev, 2001).

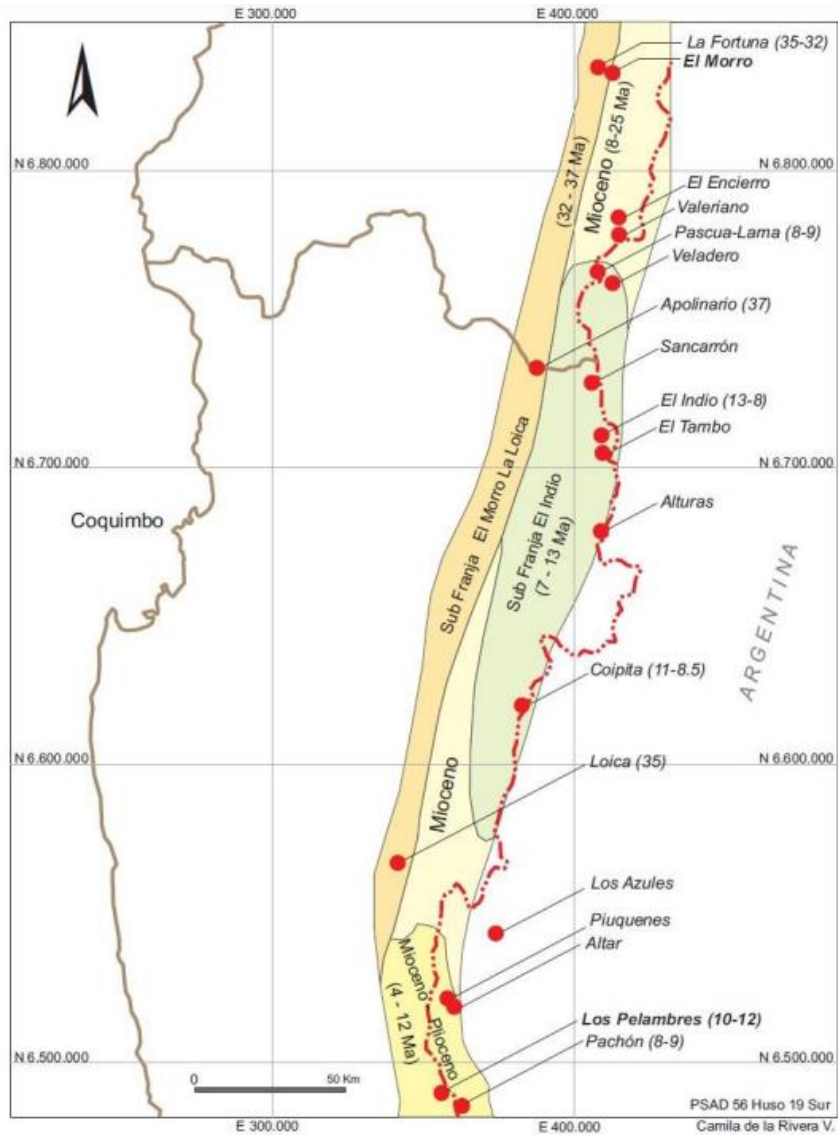


Figura 3.6: Distribución de las Franjas Metalogénicas y de los depósitos asociados a la zona de estudio por Codelco 2017 (Rivera, C.,2018).

3.7. Derechos de agua consuntivos

Un derecho de agua consuntivo significa que se faculta al titular para consumir las aguas en cualquier actividad, lo cual es descrito por la Ley 1122, Art.12, 1981. A partir de aquello, es importante realizar un monitoreo de estos derechos otorgados para así poder tener un control de posibles repercusiones en la realización de un balance hídrico.

De acuerdo con la información disponible en la base de datos de la DGA, la región de Coquimbo tiene un total de 6864 expedientes de derechos de aguas subterráneas. Dentro de todos estos tipos de expedientes los ND (nuevos derechos) conforman el 85% del total.

Cuencas	Derechos Subterráneos ND (L/s)	%
Los Choros	1445	6,8
Elqui	5691	26,9
Limarí	4704	22,2
Choapa	2072	9,8
Quilimarí	686	3,2
III Región - Los Choros	6	0
Los Choros - Elqui	2065	9,8
Elqui - Limarí	3921	18,5
Limarí - Choapa	59	0,3
Choapa - Quilimarí	515	2,4
Total	21164	100

Tabla 4: Caudales de derechos subterráneos (DGA, 2021).

La distribución espacial de los derechos de aprovechamiento de agua subterránea en la Región de Coquimbo corresponde a 21164 L/s en términos de caudal permanente y continuo, y se concentra el 60% en los valles de Elqui, Limarí y Choapa. Estos valores de caudales entregan de forma indirecta información relacionada con el rendimiento de los pozos y del tipo de captaciones.

Capítulo 4: Resultados

4.1. Exploración Geofísica

El estudio geofísico realizado en la región de Coquimbo bajo el desarrollo del proyecto DGA (2022) incluyó 5 metodologías en función de la gravedad, velocidad y resistividad, las que se aplicaron principalmente sobre complejos plutónicos e intrusivos del Paleozoico Triásico Inferior y del Cretácico, depósitos continentales y marinos del Neógeno y depósitos no consolidados más recientes.

Con el análisis de método gravimétrico es posible delimitar el contacto entre el basamento y el relleno sedimentario suprayacente mediante el análisis de variaciones de anomalías gravitatorias, que están asociadas a un contraste de densidad entre ambos dominios (Telford et al., 1990).

El método sísmico MASW permite conocer el grado de consolidación de los sedimentos y sus límites con el basamento, por medio de la diferenciación de unidades de acuerdo con la velocidad en el subsuelo. Analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores (Park et al., 1999).

Los métodos geoelectricos correspondientes a ERT, TEM y AMT tienen como objetivo determinar características geoelectricas de subsuperficie que permitan identificar la distribución de resistividad eléctrica lo cual contribuye a caracterizar acuíferos en cuanto a su geometría y salinidad de aguas (Keller G. y Frischnecht F., 1966).

A partir de los resultados del estudio, se realizó una división dentro de los perfiles de acuerdo con la resistividad o velocidad predominante, lo cual se puede observar en la siguiente tabla resumen y generalizada.

Unidad	Resistividad (Ohm m)	Unidad	Velocidad Vs (m/s)
A	Variable	a	< 600
B	Menor a 20	b	600 - 800
C	25 - 60	c	800 - 1400
D	60 - 300	d	> 1400
E / E*	> 350 / < 300		

Tabla 5: Clasificación unidades en perfiles geoelectricos y sísmicos en función de rangos de resistividad (Ohm-m) y velocidad Vs (m/s), respectivamente.

Cabe destacar que, de los perfiles presentados, sólo se analizará las señales sísmicas y geoelectricas en profundidad y no la simbología presente, como fallas conocidas o inferidas, debido a que esas interpretaciones no constituyen parte de este trabajo de memoria.

A continuación, se analizan los métodos citados para las cuencas de interés.

4.1.1. Cuenca Río Elqui

La medición de datos geofísicos dentro de la cuenca Río Elqui se concentró en sectores como la desembocadura y tramo bajo de río Elqui (A), elegidos por la potencia del relleno sedimentario según la información geológica recopilada.

En segundo lugar, se realizan mediciones en Quebrada El Arrayán en tramo medio de la cuenca (B) y sector Rivadavia y Guanta en la zona alta (C). Su elección se debe a la existencia de fallas importantes, y escasos expedientes de derechos de aguas subterráneas en el caso de este último.

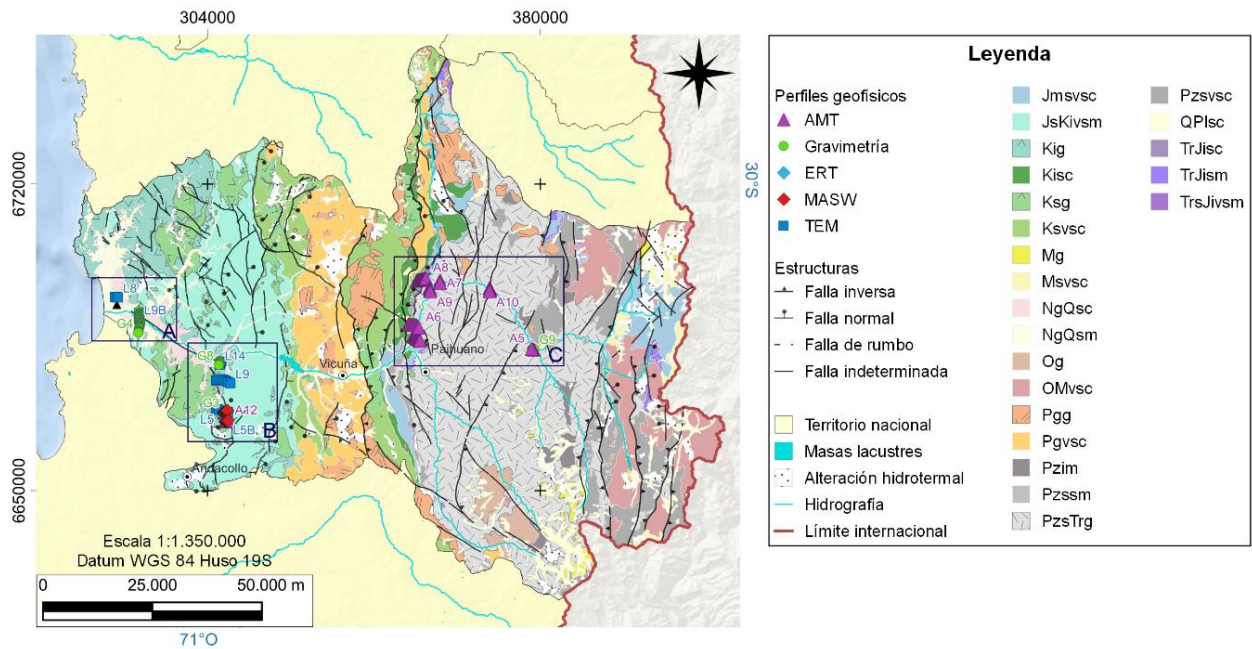


Figura 4.1: Ubicación perfiles geofísicos en cuenca Río Elqui.

4.1.1.1. Gravimetría

Los perfiles gravimétricos realizados en la cuenca Río Elqui se concentran en la parte baja de río Elqui, denominada anteriormente como zona A y B, con una dirección E-O (G3) y N-S (G4 y G8).

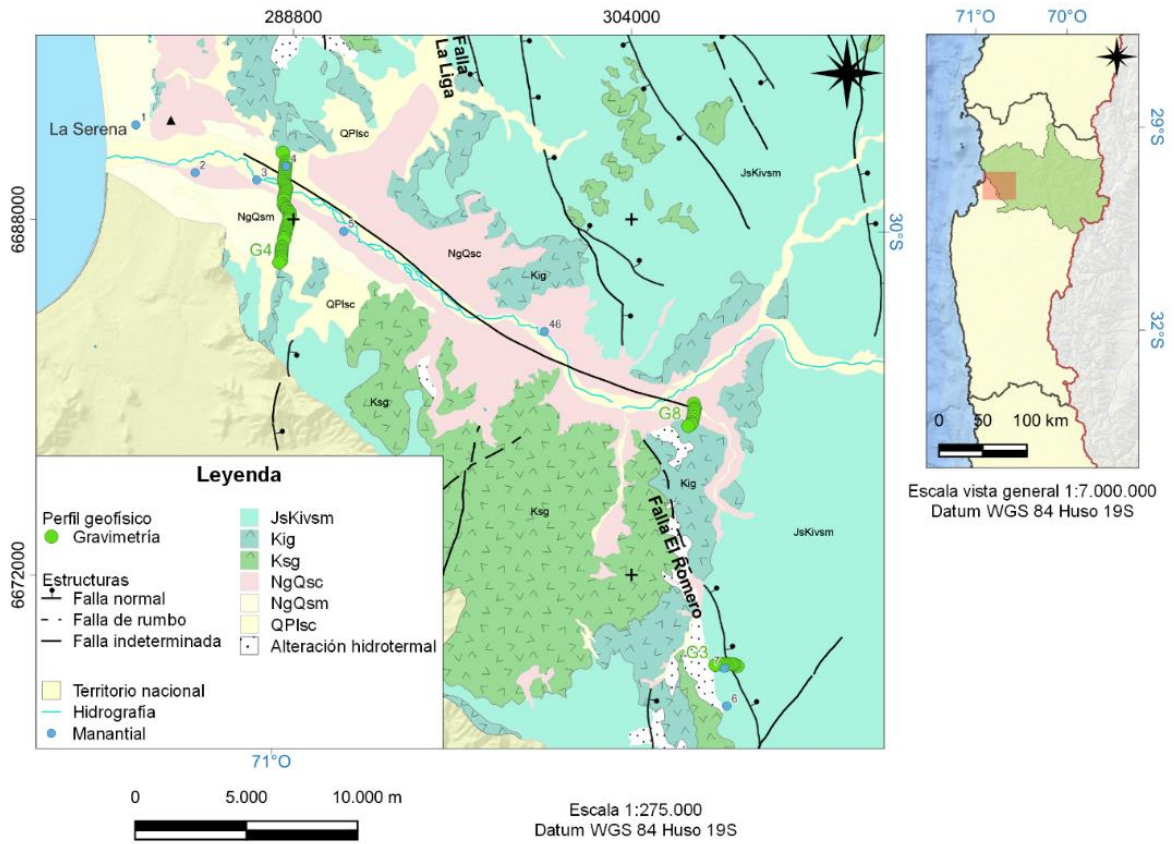


Figura 4.2: Ubicación perfiles gravimétricos en tramo bajo río Elqui.

A continuación, en la Figura 4.3 se presentan los perfiles de gravimetría con un contraste de densidad de 0.4 g/cc.

Estudio gravimétrico en cuenca Río Elqui, Región de Coquimbo
Perfiles G3, G4 y G8

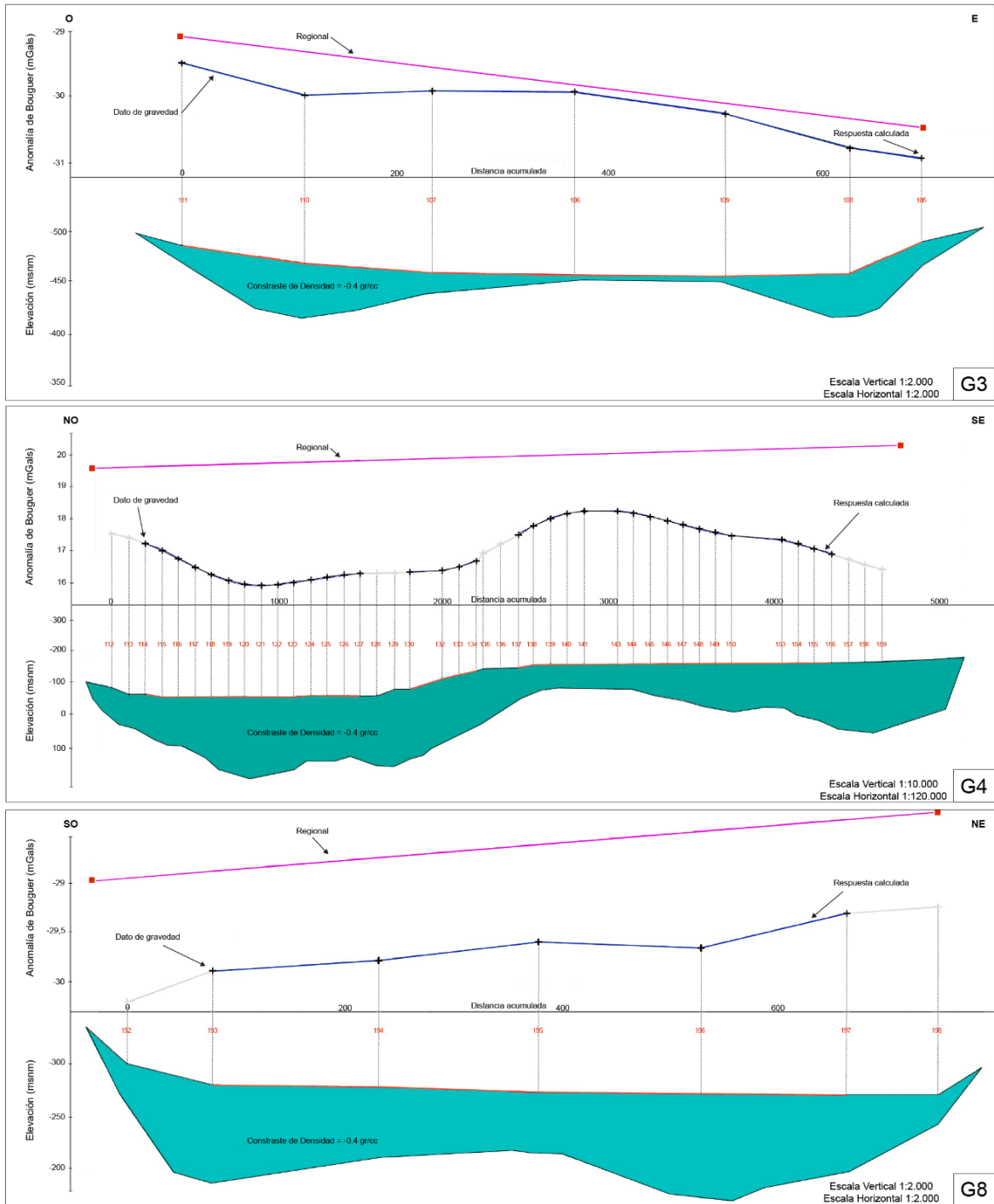


Figura 4.3: Modelos gravimétricos G3, G4 y G8 con ajuste de profundidad al basamento. Modificado de proyecto DGA (2022).

De acuerdo con estos resultados, la anomalía de gravedad residual negativa del perfil ubicado en el sector sur de quebrada Arrayán (G3) aumenta hacia el este. La profundidad del basamento varía de 400 m a 500 m y el espesor de la capa sedimentaria está entre 10 y 100 m.

Este espesor mínimo se concentra en la parte intermedia del perfil por una distancia de 200 m aproximadamente coincidiendo con la profundidad mínima del basamento. La magnitud del depósito aluvial aumenta hacia el este, llegando a valores de 100 m mientras que su espesor es mínimo a lo largo de aquella zona con una posible densidad de fracturas abiertas estrechamente espaciadas a causa de falla El Romero, responsables del déficit de masa observada.

La anomalía residual del perfil en zona norte de quebrada Arrayán (G8) muestra leves cambios entre sus dos extremos, existiendo 2 anomalías más cercana a -30 mGals, coincidentes con los depocentros de mayor espesor, 100 - 120 m. El espesor del depósito aluvial está entre 55 y 120 m, siendo menor en la parte central del perfil.

La anomalía residual del perfil en tramo bajo de río Elqui (G4) muestra cambios a lo largo del perfil, siendo al noroeste más negativa. En la parte media del perfil esta anomalía tiene un cambio notorio a mayores valores alcanzando los 18.5 mGals. Los espesores del relleno aluvial varían de 50 a 250 m, el cual es de mayor magnitud hacia las zonas laterales del curso del río. La geometría de contacto sedimento-basamento es más irregular que en perfil anterior a causa de procesos de meteorización de la roca.

4.1.1.2. MASW

Los perfiles sísmicos realizados en la cuenca Río Elqui se concentran en la parte baja del río Elqui en el valle de la quebrada Arrayán (zona B) con una dirección SO-NE (S1 y S2).

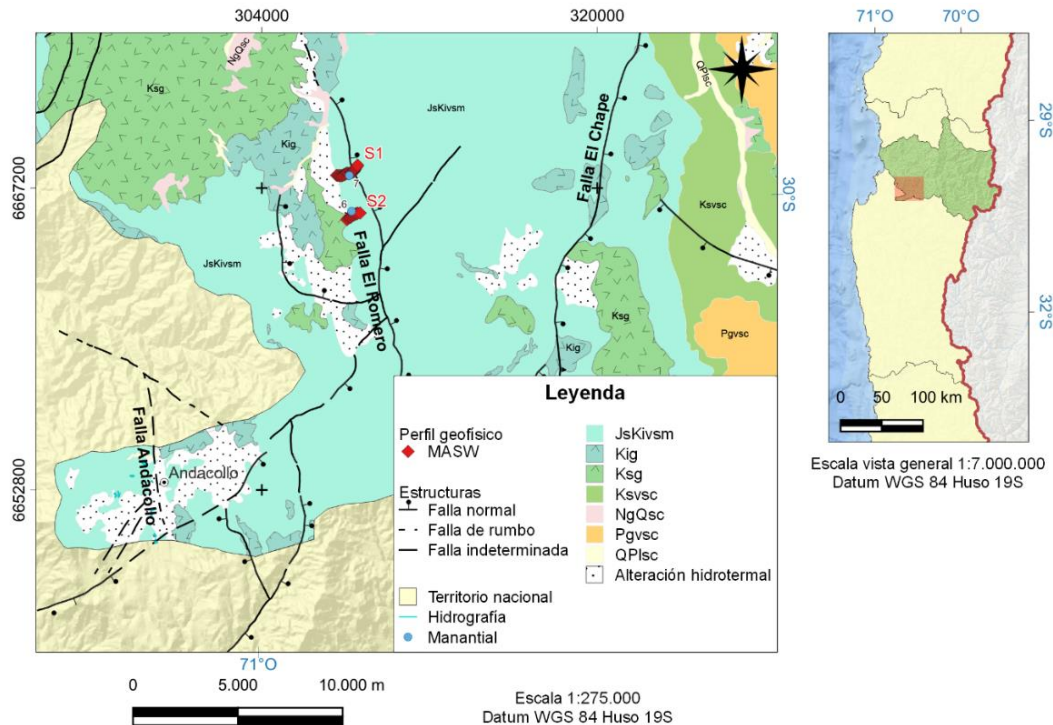


Figura 4.4: Ubicación perfiles sísmicos en cuenca Río Elqui.

A continuación, en la Figura 4.5 se presentan los perfiles sísmicos.

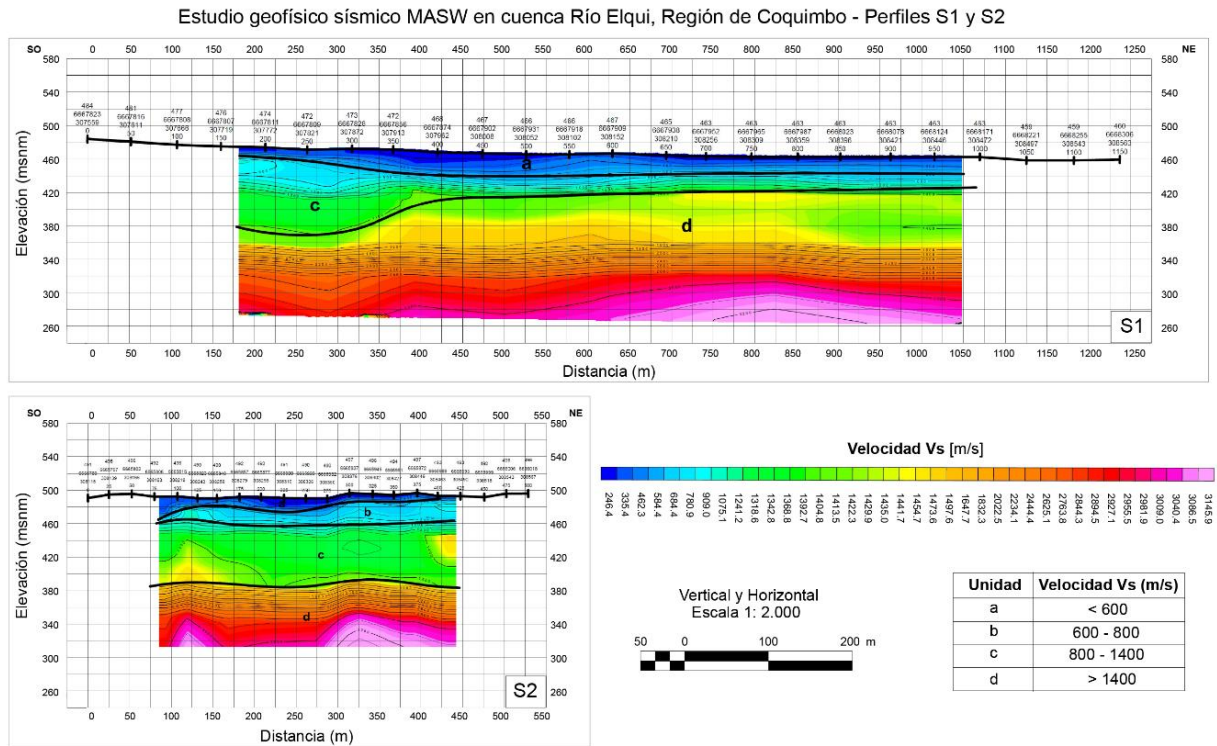


Figura 4.5: Integración de modelos 1D de Velocidades de onda S a lo largo en zona B de cuenca Río Elqui. Modificado de proyecto DGA (2022).

El resultado del análisis efectuado para las líneas sísmicas conformada por el perfil MASW S1 muestra un unidad superficial con velocidades menores a 600 m/s. Esta unidad posee un espesor que varía de 5 m a 40 m. La segunda unidad podría corresponder a un material de compacidad densa con velocidades de ondas de corte Vs en el rango de 800 m/s a 1400 m/s, el cual posee un espesor que varía entre 20 a 90 m. A profundidades mayores a 100 m en el lado SO y mayores a 40 m al NE las velocidades superan los 1400 m/s por lo que se estaría en presencia de roca hasta al menos los 200 m de profundidad.

El perfil S2 muestra una unidad superficial con velocidades menores a 600 m/s con un espesor igual al definido en el perfil S1. Estas velocidades aumentan continuamente hacia mayores profundidades pudiendo hacer una diferencia mayor de unidades. La segunda unidad podría corresponder a un material de compacidad medianamente densa con velocidades de ondas de corte Vs en el rango de 600 m/s a 800 m/s. Este estrato posee un espesor que varía entre 10 m en el SO y 40 m hacia el NE.

A profundidades entre los 40 y 110 m de profundidad las velocidades se encuentran entre los 800 y 1400 m/s, siendo un material de compacidad densa. Las velocidades a profundidades mayores a 110 m superan los 1500 m/s, pudiendo señalarse como el techo de la unidad roca.

En general, los depósitos sedimentarios de mayor consolidación aumentan de espesor hacia la zona sur de la quebrada y hacia el suroeste, mientras que la profundidad del basamento disminuye en cercanías de la falla normal El Romero.

4.1.1.3. AMT – TEM – ERT

Un conjunto de perfiles de resistividad realizados en la cuenca Río Elqui se concentran en la parte baja del río Elqui (A) y en el valle de la quebrada Arrayán (B).

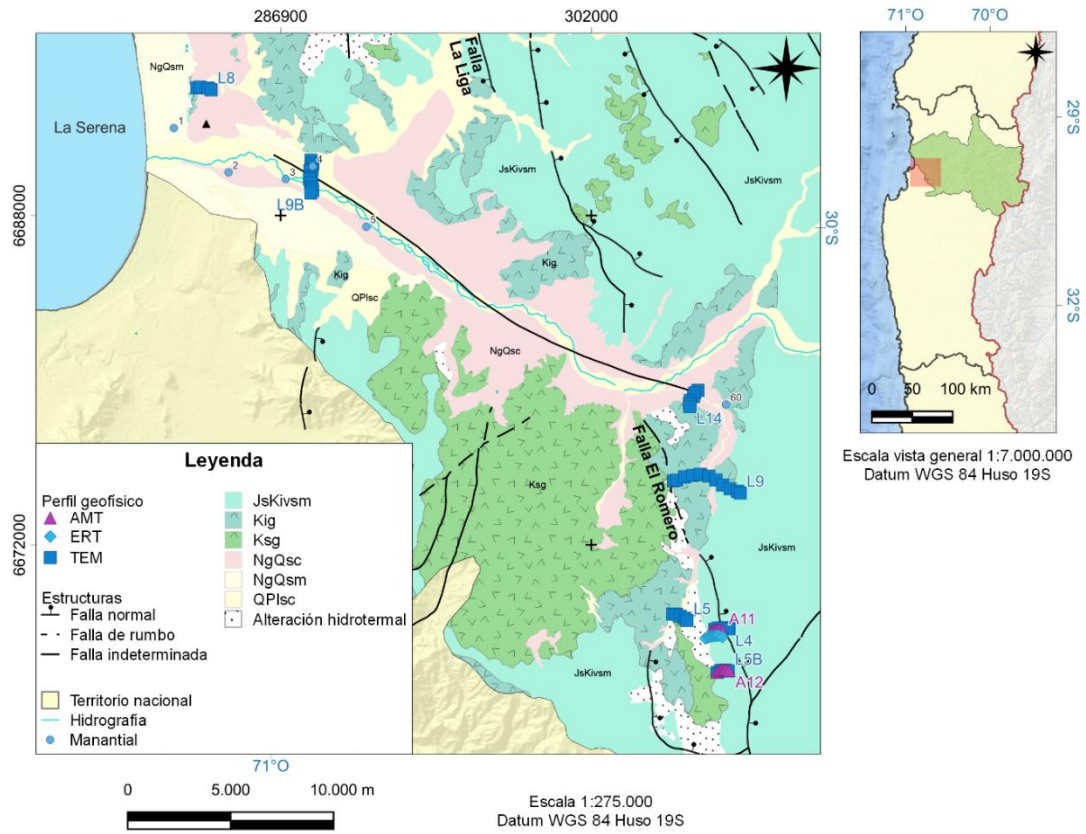


Figura 4.6: Ubicación perfiles geoelectricos en tramo bajo de cuenca Río Elqui.

A continuación, en las Figura 4.7 y 4.8 se presentan los perfiles TEM en la zona oeste de la región.

Estudio geofísico de resistividad mediante TEM en cuenca Río Elqui, Región de Coquimbo Perfiles L-8 y L-9B

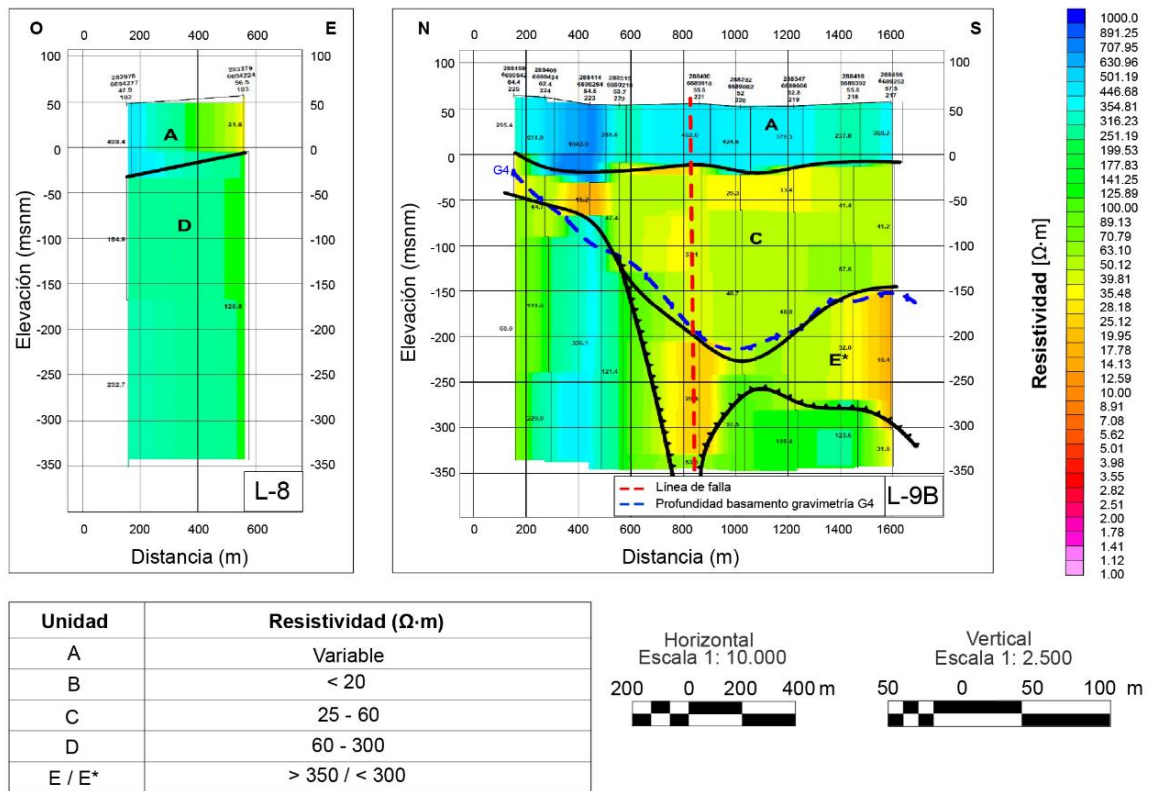


Figura 4.7: Sección de interpretación de línea L8 y L9B. Modificado de proyecto DGA (2022).

Los resultados obtenidos y representados para los perfiles a las cercanías costeras evidencian la presencia de una secuencia superior que se distribuye hasta los 80 m de profundidad en perfil L-8 y cercano a los 70 m en perfil L-9B con valores de resistividad variable entre los 31 $\Omega \cdot m$ y 1042 $\Omega \cdot m$.

En el perfil O-E se aprecia resistividades que varían entre 120 y 230 $\Omega \cdot m$ correspondiente a depósitos sedimentarios de tamaño grueso distribuidos más allá de los 50 m de profundidad. En el caso de perfil N-S, transversal al curso del río Elqui, se aprecia este depósito con espesor que varía entre 50 y 300 m, con una resistividad entre 29 y 48 $\Omega \cdot m$. Existe un contraste de resistividad tanto al norte del perfil como a profundidades mayores de 300 m y que superan los 100 $\Omega \cdot m$ asociados a presencia de roca. Sin embargo, tanto en la parte superior como al centro del sótano, se observa un dominio (menor a 30 $\Omega \cdot m$) que varía desde unos pocos metros hasta decenas de metros de espesor.

El rango de resistividad eléctrica en el agua subterránea varía entre 17 y 25 $\Omega \cdot m$, por ende, las variaciones observadas deberían resultar de cambios geológicos controlados por el dominio estructural oriental de la región. Esta capa de transición geoelectrica probablemente ilustra un horizonte erosionado y fisurado, que es típico en el contexto de rocas duras (Lachassagne et al., 2011).

Estudio geofísico de resistividad mediante TEM en cuenca Río Elqui, Región de Coquimbo - Perfiles L-4, L-5B y L-9

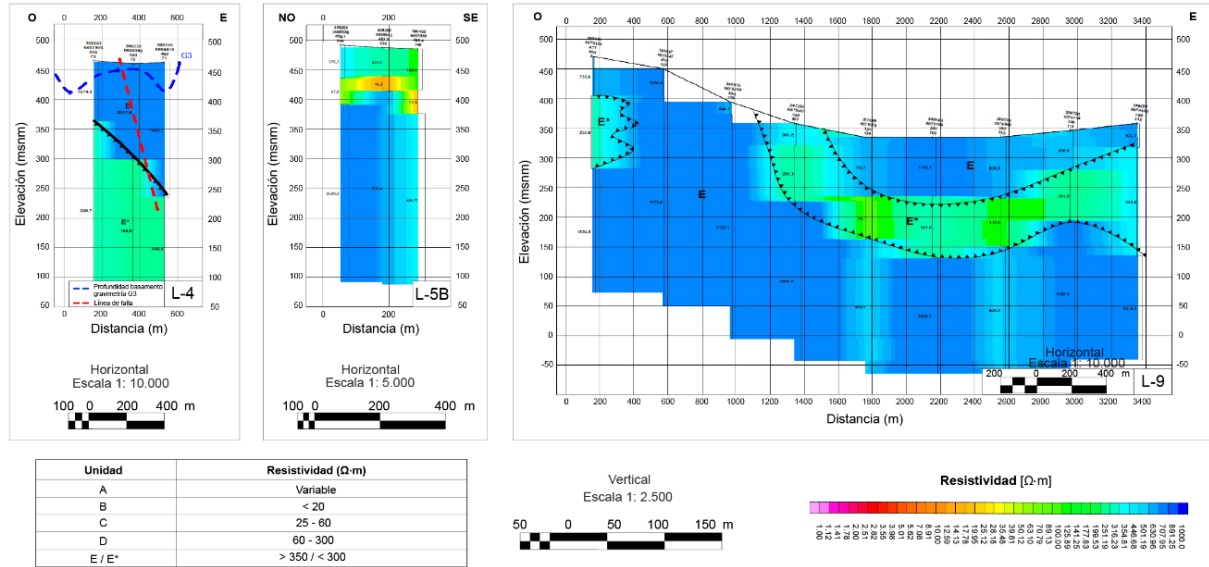


Figura 4.8: Sección de interpretación de línea L-4, L-5B y L-9. Modificado de proyecto DGA (2022).

En los valles de la Quebrada Arrayán se realizaron perfiles con dirección O-E y NO-SE. En perfil L-5B se aprecia una transición de dominios resistivos, donde el dominio superior varía entre 150 y 250 $\Omega \cdot m$ por al menos 50 m de profundidad, y el inferior supera los 400 $\Omega \cdot m$ hasta al menos los 400 m de profundidad. Se aprecia una transición geoelectrica entre estos dominios que probablemente ilustra un horizonte erosionado y fisurado de la roca que aflora en la zona.

Hacia el norte por esta quebrada el perfil L-4 muestra desde la superficie resistividades mayores a 1000 $\Omega \cdot m$ entre los 100 y 225 m de profundidad. Dentro de este rango de metros en profundidad, se simboliza lo demarcado como nivel del basamento según perfil gravimétrico G3. Estos valores de resistividad disminuyen a valores menores de 200 $\Omega \cdot m$ en sector más profundo del perfil.

Los dominios geoelectricos más al norte de la zona estudiada reflejan en el perfil L-9 resistividades desde 1200 $\Omega \cdot m$ hasta 3000 $\Omega \cdot m$ en profundidad. No obstante, el perfil revela la presencia de cuerpos de baja resistividad bien definidos en sectores específicos de este basamento. Mediante la observación de los perfiles anteriores, es más somero y alcanza la superficie a lo largo de toda la quebrada. La presencia de fallas posiblemente provocó alteración y mineralización de la roca, siendo resistividades similares a la del relleno saturado observado en otras partes de la cuenca.

En quebrada Arrayán se realizaron perfiles de resistividad complementarios mediante método AMT con dirección O-E (Figura 4.9).

Estudio geofísico de resistividad AMT en cuenca Río Elqui, Región de Coquimbo - Perfiles A11 y A12

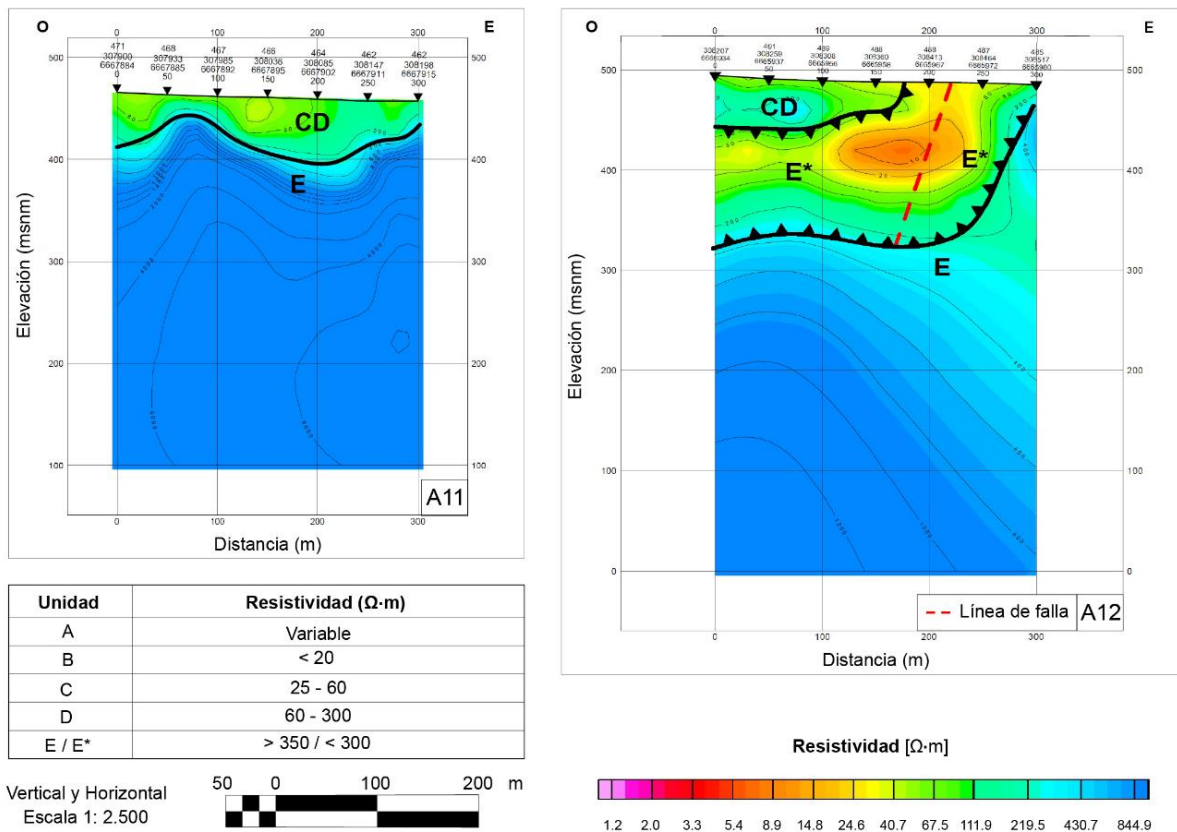


Figura 4.9: Sección de resistividad AMT en línea 11 y 12. Modificado de proyecto DGA (2022).

En el perfil A11, con la misma dirección y ubicación cercana al perfil L-4, se aprecia un dominio geoelectrico de resistividades entre 50 y 200 $\Omega \cdot m$ con un espesor de hasta 50 m. En profundidad, la resistividad va aumentando gradualmente y alcanza los 10000 $\Omega \cdot m$ hacia el este, extendiéndose hasta los 350 m de profundidad.

En el perfil A12 se observa en superficie resistividades que promedian los 150 $\Omega \cdot m$ y con un espesor menor a 50 m. Existe una anomalía conductora desde la superficie en el sector este del perfil hacia profundidades de 160 m y desviándose hacia el oeste y con tonalidades amarillentas, naranjas y verdes de resistividades entre los 10 y 100 $\Omega \cdot m$. A 180 m de profundidad la resistividad varía de 400 a 1100 $\Omega \cdot m$.

Estos perfiles corroboran lo observado por la metodología TEM, pudiendo apreciar el basamento somero y alterado en sub-superficie por probable acción del dominio estructural central de acuerdo con lo mapeado en la zona.

Un segundo conjunto de perfiles de resistividad realizados en la cuenca Río Elqui se concentran en la cordillera principal en sectores de Rivadavia y Guanta. Estos se encuentran transversales a curso de río Claro (zona C).

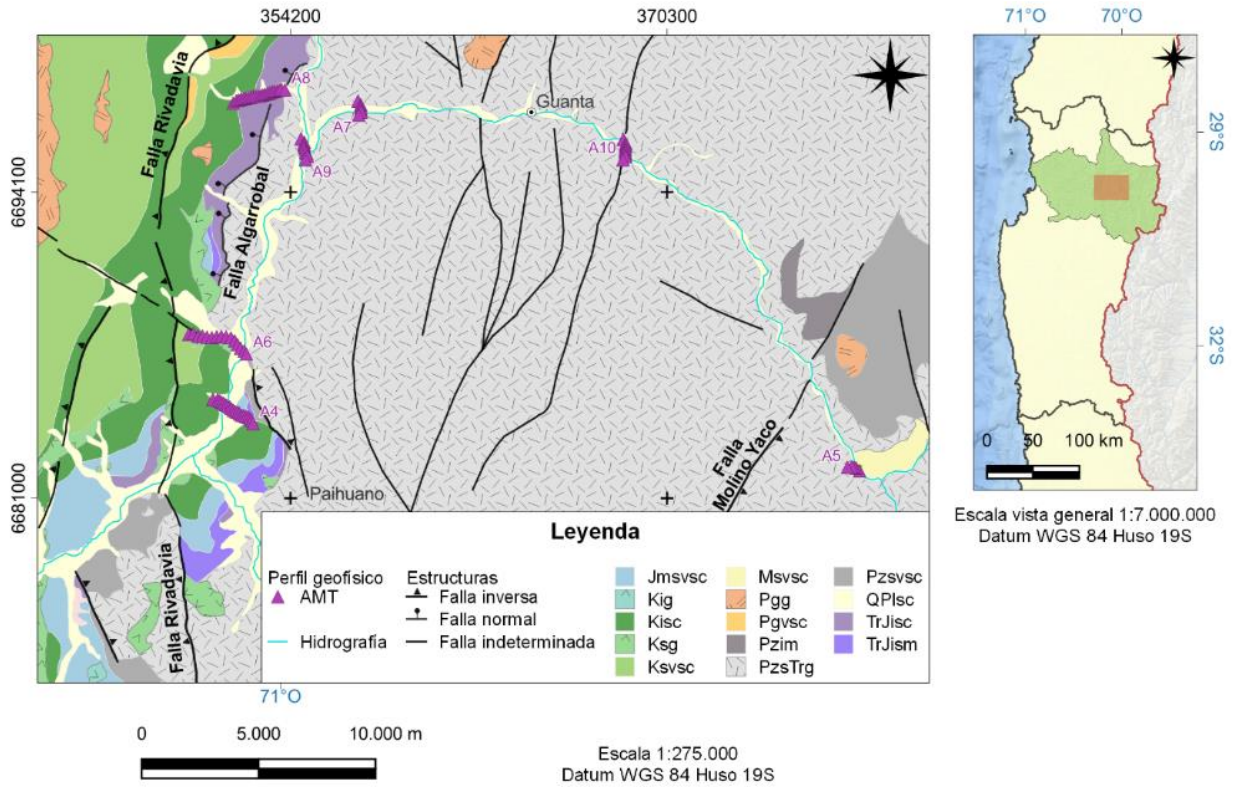
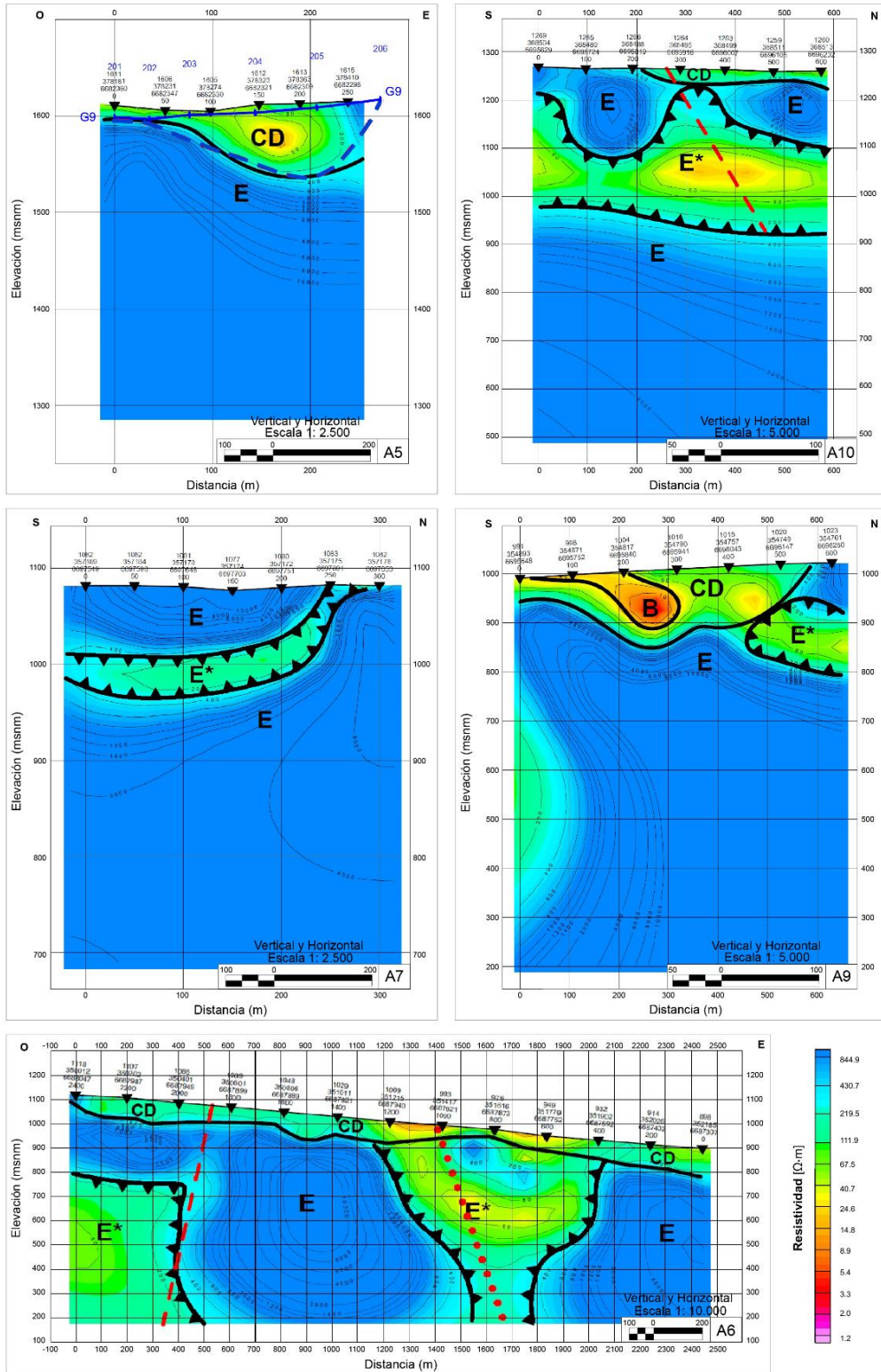


Figura 4.10: Ubicación perfiles geoelectrónicos en tramo alto de cuenca Río Elqui.

La Figura 4.11 muestra los perfiles sísmicos realizados en este sector de la cuenca. Se encuentran ordenados de acuerdo con en el tramo de río Claro en el que se desplegaron.

Estudio geofísico de resistividad AMT en cuenca Río Elqui, Región de Coquimbo - Perfiles A5, A10, A7, A9 y A6



Unidad	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
A	Variable
B	< 20
C	25 - 60
D	60 - 300
E / E*	> 350 / < 300

Simbología	
--	Línea de falla
•••	Falla inferida
- - -	Profundidad basamento gravimetría G9

Figura 4.11: Sección de interpretación líneas AMT A5, A10, A7, A9 y A6. Modificado de proyecto DGA (2022).

En tramos superiores de río Claro se realizaron perfiles A5 y A10. Se aprecia en sector más somero un dominio geoelectrico con resistividad menor a 200 $\Omega\cdot m$ y con espesor de 40 - 60 m. En profundidad, las resistividades varían de 400 a 10000 $\Omega\cdot m$. En perfil A10 se aprecia una variación anómala horizontal de resistividad desde la superficie hasta profundidades de 200 m en su tramo medio. De acuerdo con esto, se interpreta como depósitos sedimentarios de grano medio a grueso saturados que alcanzan los 50 m de profundidad sobre paleorelieve de la zona alta de la cuenca.

Siguiendo el curso del río, los perfiles A7 y A9 están ubicados transversalmente a este. A7 refleja hasta los 400 m de profundidad resistividades que varía de 400 a 10000 $\Omega\cdot m$ y presenta en su interior un cuerpo horizontal de baja resistividad a una profundidad de 90 m. Se refleja que el basamento aflora pero en zonas más someras se encuentra alterada/fracturada por acción de fallas importantes como la falla Algarrobal en el dominio estructural oriental. En perfil A9 presenta sobre el basamento un dominio geoelectrico de resistividad entre los 10 y 80 $\Omega\cdot m$ de espesor máximo de 140 m. De acuerdo con esta información, el paleorelieve existente en la zona, se encuentra cubierto por sedimentos superficiales no saturados.

El perfil A6 muestra un sector aguas abajo donde se observa el cambio litológico y presencia de grandes estructuras. Se aprecia en este perfil O-E un dominio geoelectrico de hasta 100 m de espesor con resistividades menores a 200 $\Omega\cdot m$, la cual sobreyace a un extenso dominio geoelectrico de resistividades superiores a 400 $\Omega\cdot m$. A 1600 m del extremo oeste existe una banda vertical bien definida con un espesor que va disminuyendo a profundidad y con resistividades entre los 50 y 200 $\Omega\cdot m$, las cuales también se observan en una segunda zona en extremo oeste. Estos sectores logran ilustrar la alteración del basamento y cambios geológicos en la cordillera principal, como el posible contacto entre rocas sedimentarias continentales cretácicas y complejos intrusivos del Carbonífero Superior-Triásico Inferior. Lo anterior es controlado por zona de fallas del dominio estructural oriental, principalmente entre falla Rivadavia y falla Algarrobal. El basamento fracturado posiblemente es un sector relleno de material de falla.

Interpretación general de cuenca Río Elqui

Los depósitos sedimentarios en cercanía a la costa, están saturados con agua salobre y el tamaño de grano de sedimentos y su espesor aumenta hacia el interior a grano grueso saturado y posible presencia de depósitos consolidados. En cercanía a río principal Elqui, se observa anomalías en la resistividad en el basamento y se debe a la acción de falla longitudinal al valle.

Los depósitos de sedimentos secos o húmedos, se siguen observando en tramos medios de la cuenca y sobreyace a depósitos sedimentarios saturados, el cual es de mayor tamaño de grano y más profundo hacia el interior de quebradas importantes. En este sector, la roca también se encuentra fisurada y no se descarta mineralización en algunos sectores.

En zona alta de la cuenca el relleno tiene espesores variados, el cual era un máximo en tramo bajo de 300 m aproximadamente y disminuye hacia la cabecera en donde su espesor alcanza un máximo de 30 m. Estos depósitos sedimentarios sobreyacen a roca fracturada en la mayoría de las zonas analizadas debido a la gran cantidad de estructuras presentes.

4.1.2. Cuenca Costera Río Elqui – Río Limarí

La medición de datos geofísicos dentro de las cuencas costeras entre Río Elqui y Río Limarí se concentra en sectores Quebrada Pachingo y Quebrada Seca en zona sur, los cuales son elegidos por la potencia de relleno sedimentario y la posible existencia de medios fisurados por la acción del tectonismo particular costero.

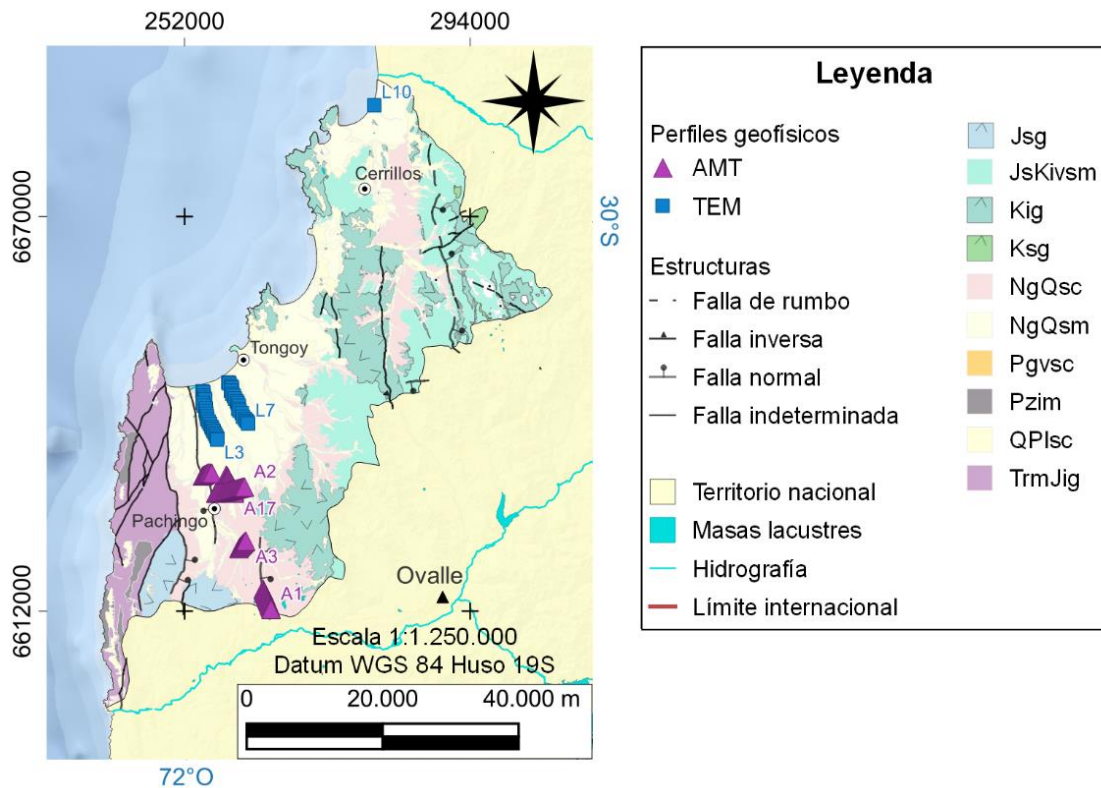


Figura 4.12: Ubicación perfiles geofísicos en cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí.

4.1.2.1. AMT – TEM – ERT

Los perfiles en esta cuenca corresponden a estudios geofísicos de resistividad.

Estudio geofísico de resistividad mediante TEM en cuencas costeras entre Río Elqui - Río Limarí, Región de Coquimbo
Perfiles L-3 y L-7

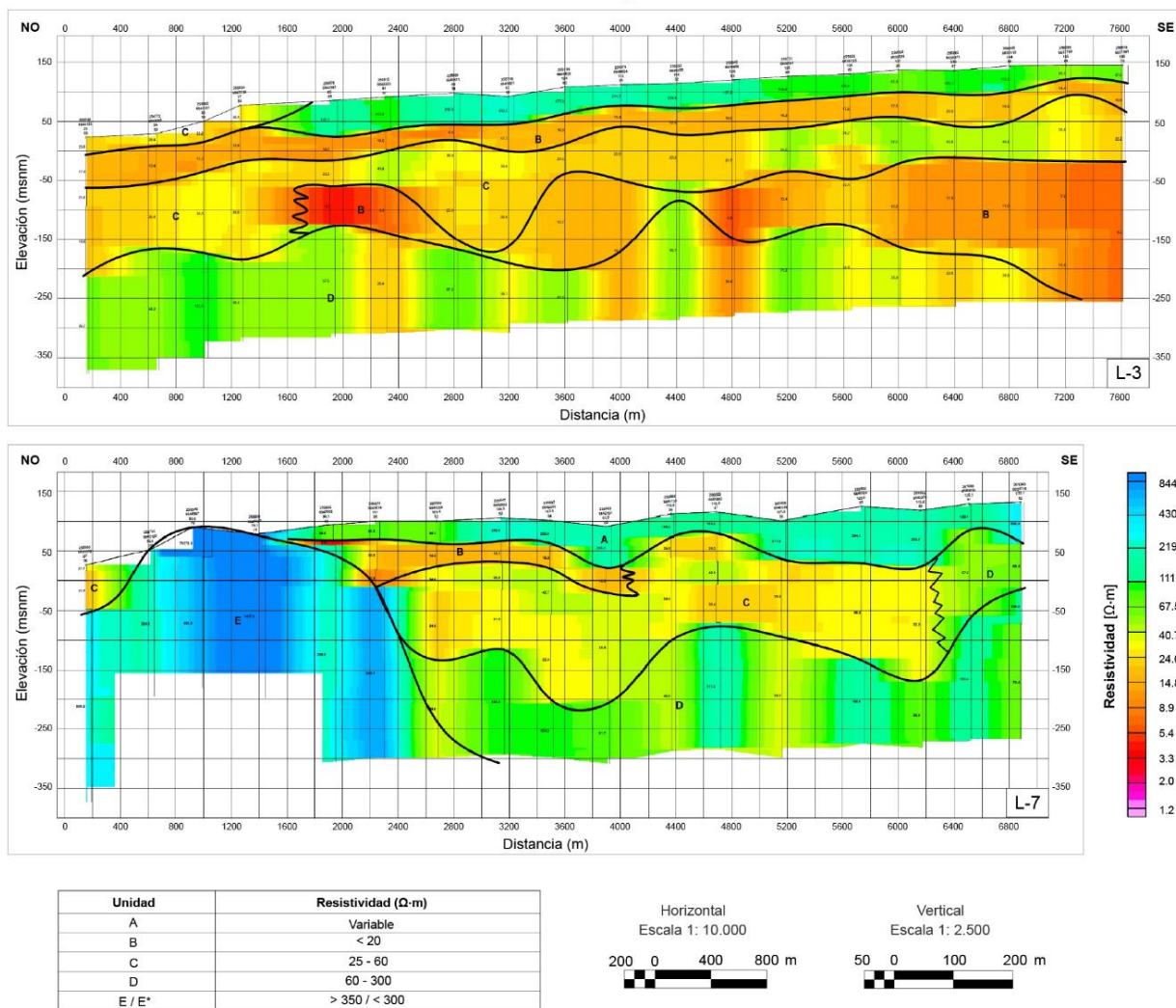


Figura 4.14: Sección de interpretación líneas TEM L3 y L7.

El perfil L-3 se encuentra en sector sur de la cuenca y se aprecia un dominio geoelectrico con espesor de 50 m y resistividades que varían entre 60 y 270 $\Omega \cdot m$, las cuales disminuyen a 20 $\Omega \cdot m$ hacia el noroeste. Bajo este se aprecian dominios geoelectricos de espesor similar y constante a lo largo de todo el perfil, pero con resistividades que varían entre 9 y 18 $\Omega \cdot m$ y así, alternándose a profundidades mayores. A los 250 m de profundidad superan los 30 $\Omega \cdot m$ y llegan a los 125 $\Omega \cdot m$ hacia la costa, logrando corroborarse lo mapeado como depósitos sedimentarios que aumentan de granulometría en profundidad.

El perfil L-7 se encuentra dispuesto hacia el noreste y de manera paralela al perfil L-3. Muestra un dominio geoelectrico somero con resistividades que varían entre 80 y 300 $\Omega \cdot m$. Las resistividades disminuyen a $\sim 30 \Omega \cdot m$ en un dominio de espesor variado entre 130 y 210 m y que cubre un dominio de 200 $\Omega \cdot m$ que se extiende hasta los 150 m de profundidad. A diferencia del perfil L-3, se produce un cambio importante de resistividad que supera los 1000 $\Omega \cdot m$ desde la superficie hasta profundidades de 450 m. Estos valores altos se asocian a basamento rocoso, el cual aflora hacia el noroeste, pero hacia el interior es cubierto por depósitos sedimentarios

saturados con un espesor de hasta 400 m. Existe parte de estos sedimentos que alejándose de la costa están probablemente secos o húmedos a diferencia de los saturados cercanos a esta.

En Quebrada Pachingo y Quebrada Seca se realizaron perfiles de resistividad mediante método AMT.

Estudio geofísico de resistividad AMT en cuencas costeras entre Río Elqui - Río Limarí, Región de Coquimbo - Perfiles A2, A3, A17 y A22

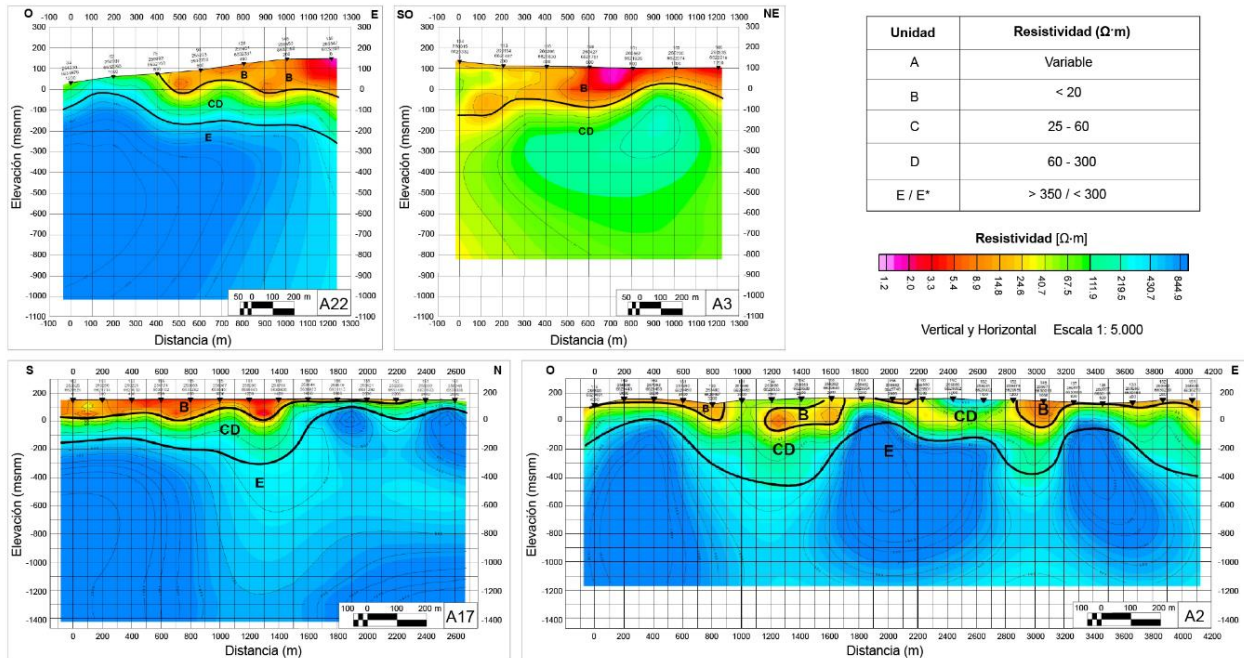


Figura 4.15: Sección de interpretación líneas AMT A22, A3, A17 y A2. Modificado de proyecto DGA (2022).

En perfil A22 con dirección O-E se aprecia un dominio geoelectrico superior de resistividades menores a $20 \Omega\cdot m$ en el sector oeste y de un espesor variable entre 100 y 150 m, valores que van aumentando a profundidad. Se aprecia un dominio inferior entre 40 y $300 \Omega\cdot m$ de un espesor máximo de 200 m y que se extiende a lo largo de todo el perfil. Bajo los 50 metros las resistividades superan los $400 \Omega\cdot m$ hasta los 1000 m y alcanza mayor profundidad hacia el este del perfil. En esta quebrada el basamento se encuentra más somero hacia el oeste y lo cubren depósitos sedimentarios de grano medio a fino saturados de al menos 200 metros de espesor y que hacia el este subyace a una capa superficial irregular de sedimentos no saturados.

El contacto entre depósitos y basamento es más irregular hacia el este, como lo refleja el perfil A2, el cual tiene la misma dirección del perfil anteriormente descrito. Se observan depósitos sedimentarios de espesor variado y del doble de magnitud. El perfil A17 se encuentra transversal a A2 y refleja que estos se extienden en dirección S-N.

En perfil A3 de dirección SO-NE y ubicado en quebrada Seca, se aprecia depósitos sedimentarios con espesor entre los 150 y 200 m. Bajo esta el cuerpo rocoso se extiende hasta profundidades de 900 m.

Interpretación general de Cuencas Costeras Río Elqui – Río Limarí

El relleno sedimentario aumenta su consolidación a profundidad y tiene un espesor desde los 150 m en sector norte y hacia el sur un espesor de hasta 600 m. Los primeros 150 metros de esta capa de depósitos se encuentra saturado con agua salobre. Hacia límite sur de la cuenca el basamento está fracturado y logra profundidades someras de no más de 500 m. Sin embargo, Quebrada Seca es ejemplo de que depósitos sedimentarios saturados y no saturados logran espesores de 900 m sobre la roca fisurada.

4.1.3. Cuenca Río Limarí

La medición de datos geofísicos dentro de la cuenca Río Limarí se concentró en sectores como la desembocadura y tramo bajo de río Limarí (A'), elegido por la potencia del relleno sedimentario según la información geológica recopilada.

Además, se realizan mediciones en sector Punitaqui (B'), elegido por el escaso relleno sedimentario y una extensa alteración de la roca. Los sectores Combarbalá (C') como río Grande (D') y río Hurtado (E') son elegidos por la existencia de fallas importantes y escasos expedientes de derechos de aguas subterráneas.

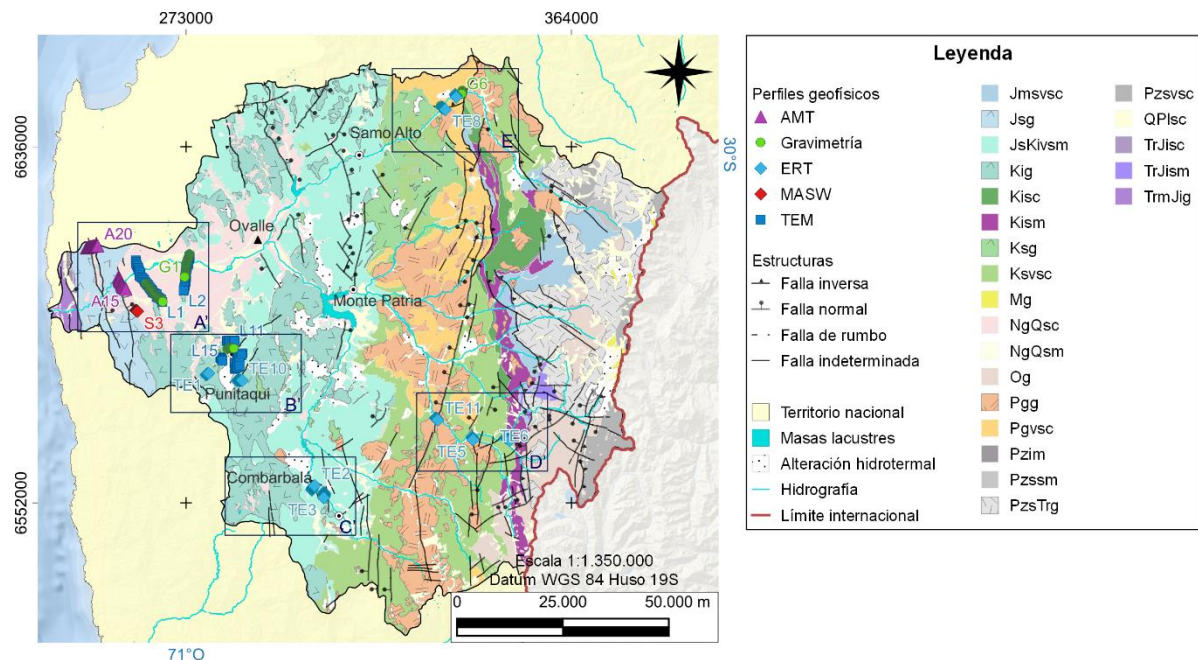


Figura 4.16: Ubicación perfiles geofísicos en cuenca Río Limarí.

4.1.3.1. Gravimetría

Los perfiles gravimétricos realizados en la cuenca Río Limarí se concentran en 2 sectores. Un primer conjunto de estos estudios se encuentran en sector A', en la parte baja de río Limarí, con una dirección SO-NE (G1) y NO-SE (G2), y en sector B' en valles de Punitaqui, con dirección E-O (G5).

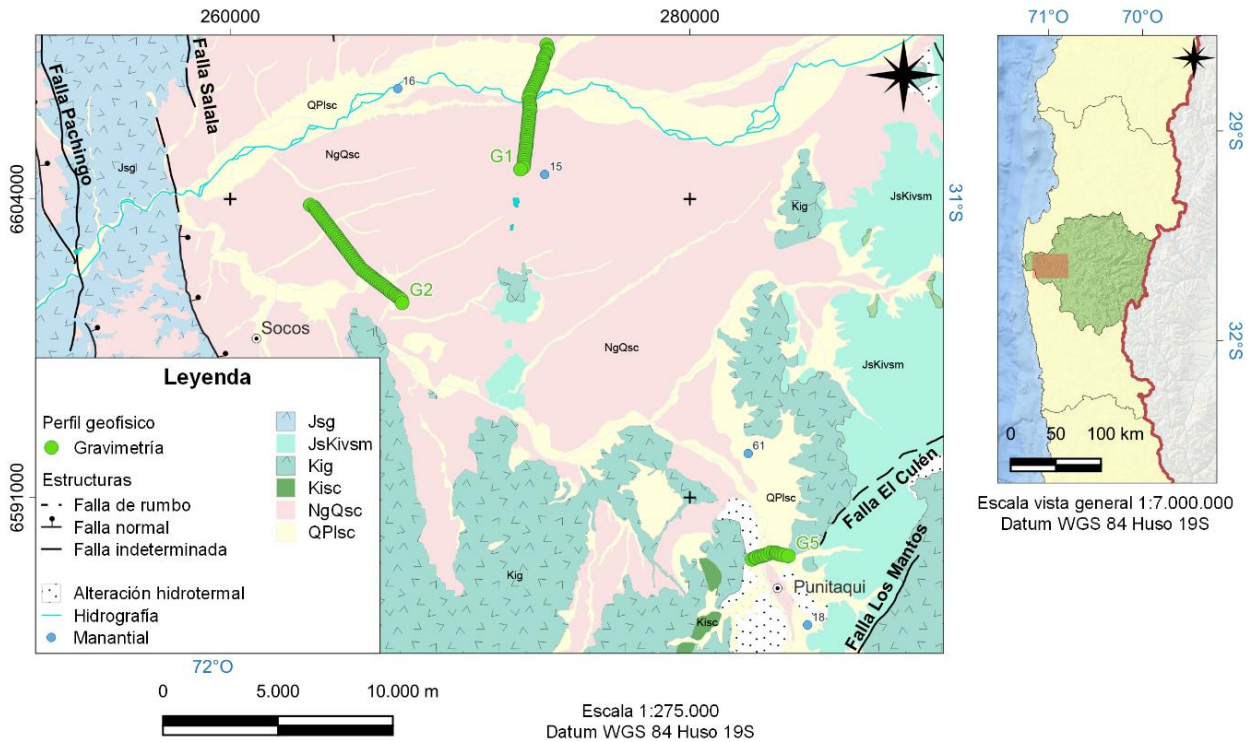


Figura 4.17: Ubicación perfiles gravimétricos en zona baja cuenca Río Limarí.

A continuación, en la Figura 4.18 se presentan los perfiles de gravimetría con un contraste de densidad de 0.4 g/cc.

Estudio gravimétrico en cuenca Río Limarí, Región de Coquimbo
Perfiles G1, G2 y G5

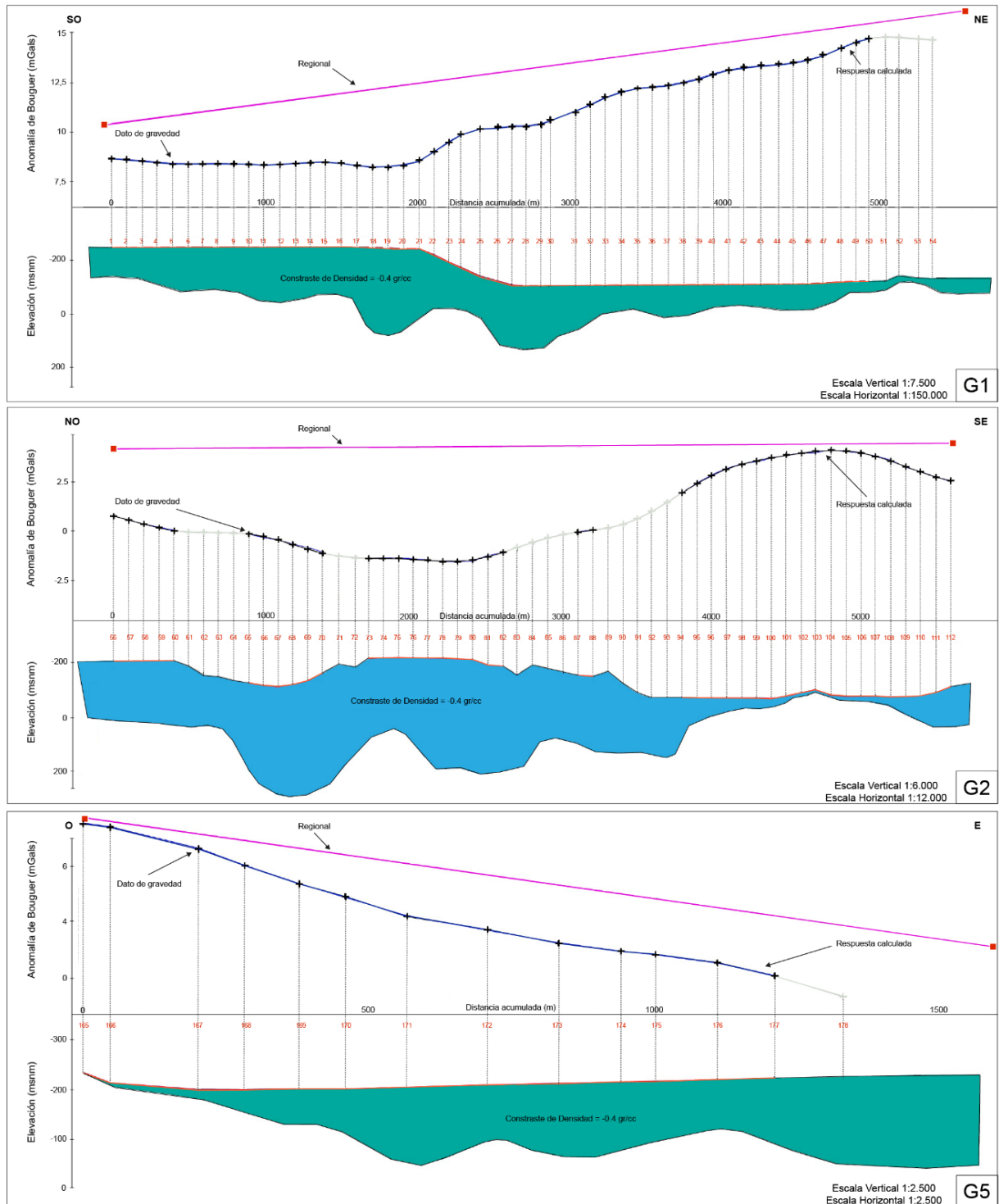


Figura 4.18: Modelos gravimétricos G1, G2 y G5 con ajuste de profundidad al basamento. Modificado de proyecto DGA (2022).

Las variaciones de la anomalía de gravedad residual observadas a lo largo de los perfiles de gravedad (Figura 4.18) corresponden a déficits de masa resultantes de variaciones de espesor de los depósitos aluviales no consolidados sobre las rocas del basamento (Complejo Plutónico

Illapel y Formación Confluencia). Cuanto más negativa es la anomalía de gravedad residual, mayor es el espesor de los depósitos aluviales.

De acuerdo con estos perfiles, la anomalía de gravedad residual del perfil desarrollado transversalmente a río Limarí (G1) se mantiene constante hasta los 2000 m hacia el noreste y de manera progresiva aumenta hasta los 15 mGals. Los resultados del modelado revelan que la profundidad del basamento disminuye desde este punto y el espesor del relleno aluvial logra un máximo de 200 metros en el depocentro a los 2600 m y un mínimo de 10 m al final del perfil. A los 1700 metros, existe un segundo depocentro y el espesor del relleno es de 300 m. Este es de mayor magnitud hacia el suroeste antes del cambio brusco de anomalía de gravedad residual probablemente debido a la presencia de fracturas en el basamento, lo que condujo a que posea una geometría irregular y a la disminución de la capa de sedimento aluvial hacia el noreste.

La anomalía de gravedad residual del perfil en sector de Socos (G2) muestra variaciones a lo largo del perfil, siendo al noroeste más negativa. En esta zona la disminución leve de la anomalía corresponde a depocentros con un espesor de hasta 200 m. El depósito aluvial posee espesores variables debido a las irregularidades del basamento que se encuentra posiblemente alterado por estructuras. La roca es más somera hacia el sureste.

El perfil gravimétrico G2 muestra un espesor máximo de relleno de 400 m a los 1100 metros desde el extremo noroeste, sin embargo, este perfil está trazado sobre rocas ígneas, por lo que esta modelación no representa la realidad. Es posible interpretar que los sedimentos modelados pueden corresponder a roca meteorizada y/o alterada, la que puede tener contrastes de densidad similares a los de los sedimentos (López et al., 2019).

La anomalía residual del perfil en sector de Punitaqui (G5) disminuye progresivamente hacia el este. La profundidad máxima del basamento es de 200 m siendo más somera hasta el oeste. Por otro lado, el espesor del relleno va en aumento hacia el este y varía entre 20 y 200 m. El contacto es más regular que en los perfiles anteriores. Los resultados revelan que el depósito aluvial es de mayor magnitud hacia el este y hacia el oeste del perfil se refleja lo mapeado como zona de alteración donde la roca está muy somera. La mineralización y la presencia de yacimientos de tipo IOCG en esta franja podría estar ocasionando que la señal gravimétrica aumente.

Un segundo conjunto de estos estudios se encuentran en sector E', en alta montaña, dispuestos transversalmente al curso de río Hurtado (G6 y G7).

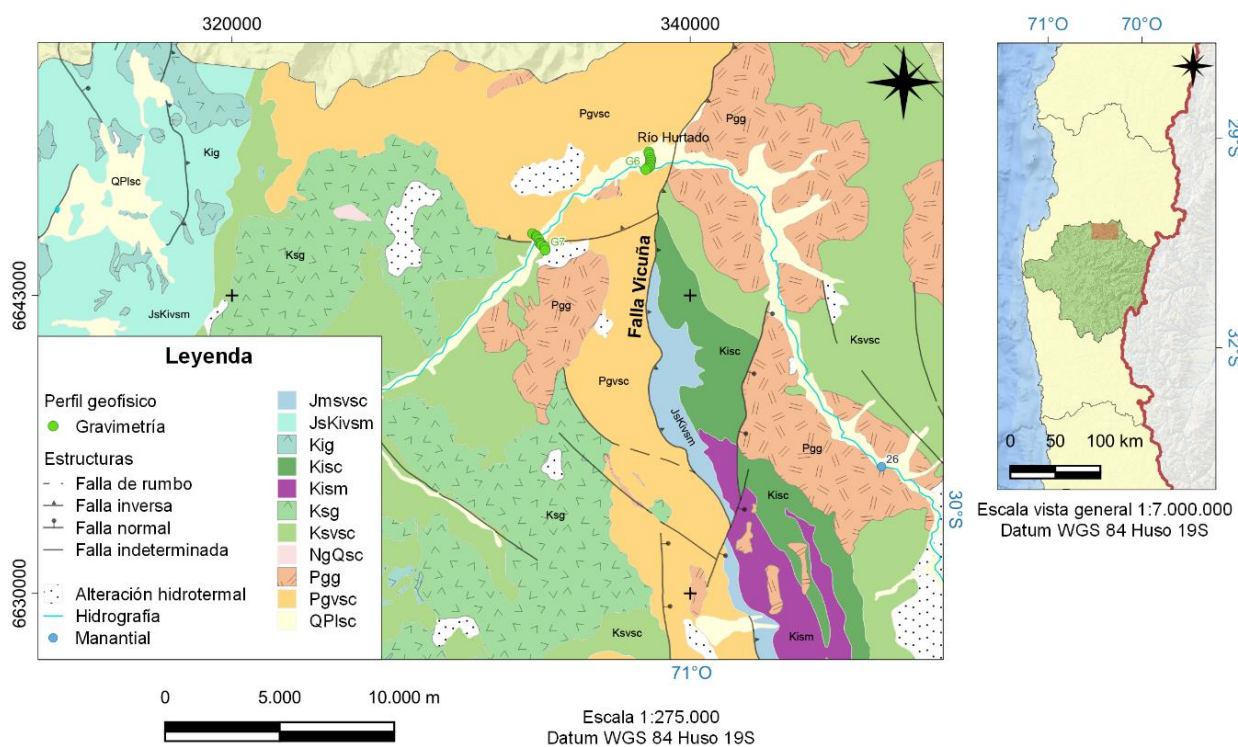


Figura 4.19: Ubicación perfiles gravimétricos en zona alta cuenca Río Limarí.

A continuación, en la Figura 4.20 se presentan los perfiles de gravimetría con un contraste de densidad de 0.4 g/cc.

Estudio gravimétrico en cuenca Río Limarí, Región de Coquimbo
Perfiles G6 y G7

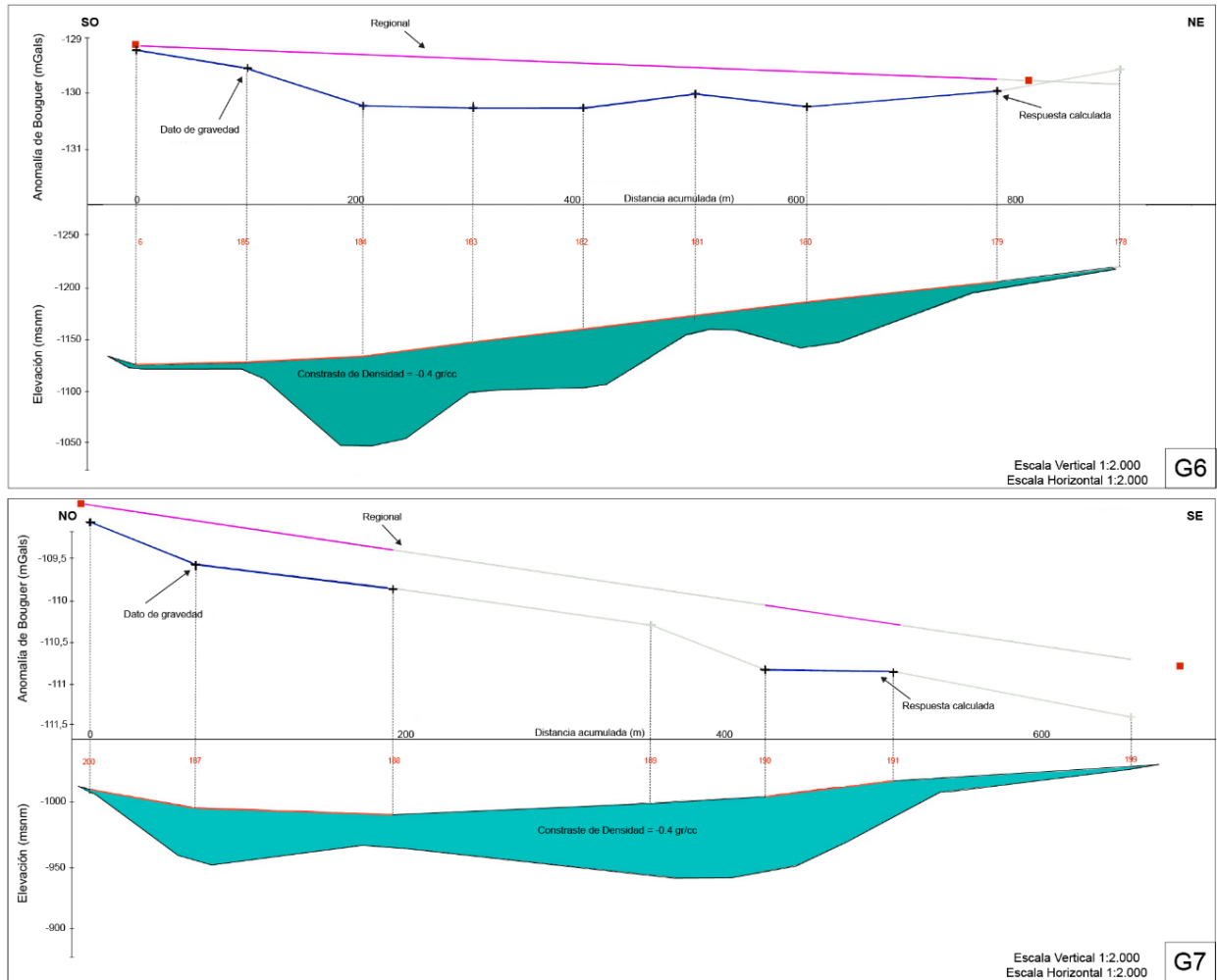


Figura 4.20: Modelos gravimétricos G6 y G7 de cuenca con ajuste de profundidad al basamento. Modificado de proyecto DGA (2022).

Las variaciones de la anomalía de gravedad residual observadas a lo largo de los perfiles de gravedad (Figura 4.20) corresponden a déficits de masa resultantes de variaciones de espesor de los depósitos aluviales no consolidados sobre las rocas del basamento (Formación Los Elquinos).

La anomalía de gravedad residual del perfil desarrollado transversalmente a río Hurtado y a cotas mayores (G6) se mantiene constante entre los -130 y -129 mGals, alcanzando este último en los extremos. El basamento es cada vez más somero y principalmente en extremo noreste. El espesor de los depósitos sedimentarios logra un máximo de 90 m a los 200 m hacia el noreste y un mínimo inferior a 10 m en los extremos. Existe un cambio brusco de su espesor a 200 m hacia el noreste alcanzando su máximo. El contacto resulta irregular a lo largo del perfil a causa de procesos de meteorización de la roca o como consecuencia de la presencia de fallas secundarias de falla Vicuña aguas arriba.

La anomalía de gravedad residual del perfil aguas abajo (G7) es más negativa gradualmente hacia el sureste. El espesor del relleno aluvial varía entre 10 y 60 m y el contacto con el basamento es más suave que la apreciada en perfil superior pero también más somera en los extremos de este. El depósito aluvial no es de gran espesor en esta zona estando la roca somera.

4.1.3.2. MASW

El perfil sísmico realizado en la cuenca Río Limarí se emplaza en el sector de Socos en la parte baja del río Elqui (A') en el valle de la Quebrada Arrayán con una dirección NO-SE.

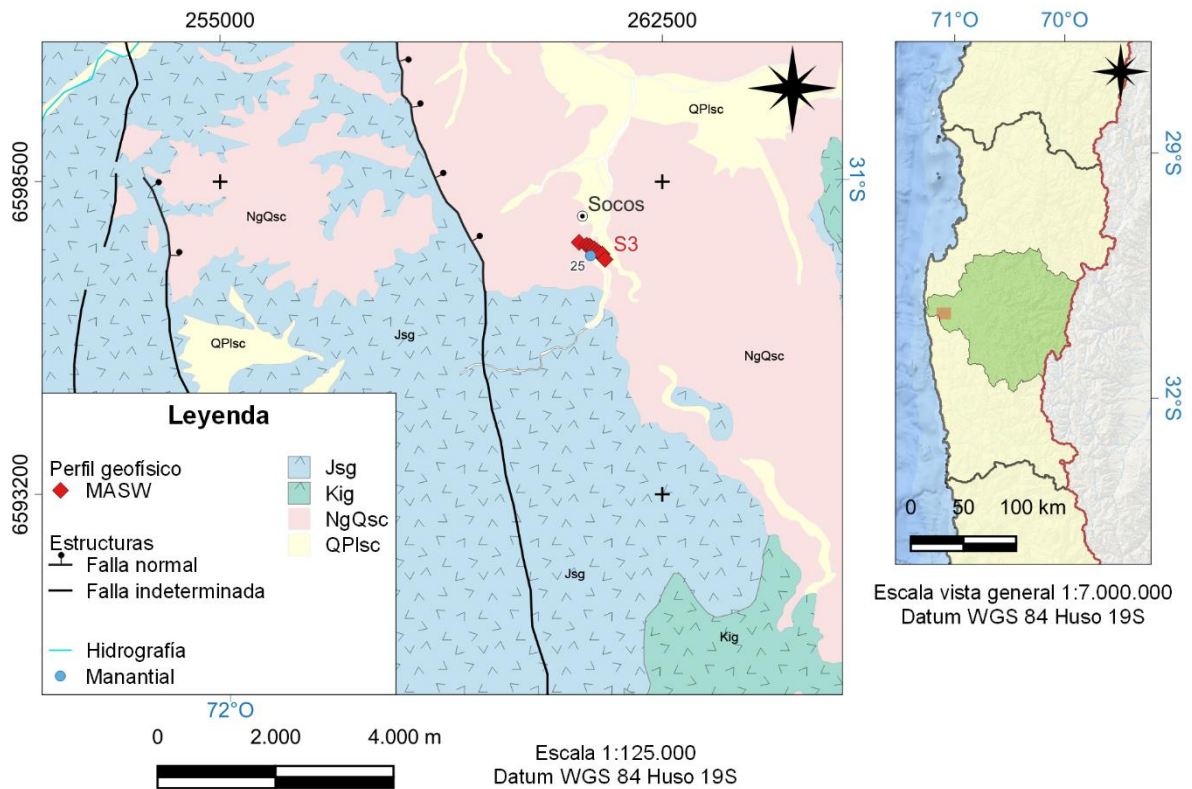
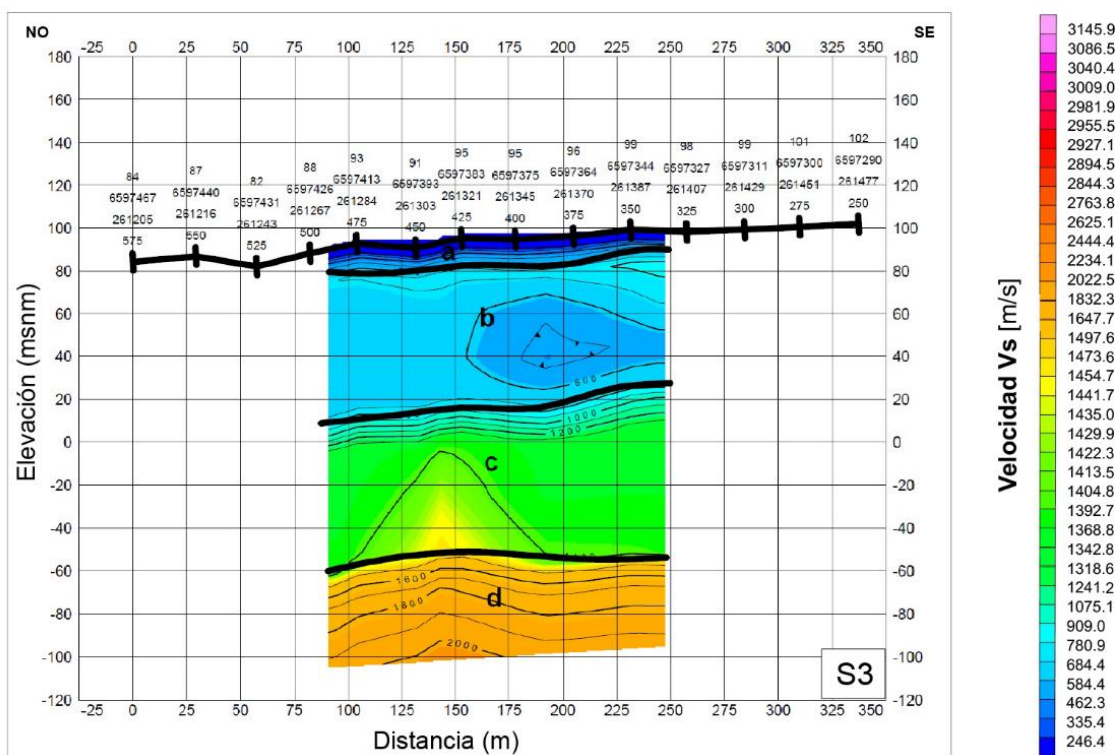


Figura 4.21: Ubicación perfiles sísmicos en zona baja de cuenca Río Limarí.

A continuación, en la Figura 4.22 se presenta el perfil S3.

Estudio geofísico sísmico MASW en cuenca Río Limarí, Región de Coquimbo - Perfil S3



Unidad	Velocidad Vs (m/s)
a	< 600
b	600 - 800
c	800 - 1400
d	> 1400

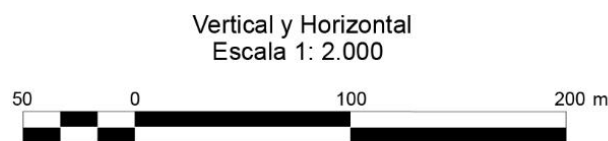


Figura 4.22: Integración de modelos 1D de Velocidades de onda S a lo largo en zona B de cuenca Río Limarí. Modificado de proyecto DGA (2022).

El resultado del análisis efectuado para las líneas sísmicas conformada por el perfil MASW S3 muestra una unidad superficial con velocidades de ondas de corte V_s menores a 600 m/s. Posee un espesor que varía entre 10 a 20 m y se encuentra sobre una unidad con velocidades entre 600 y 800 m/s, con 60 m de espesor.

La unidad inferior de un espesor similar corresponde a velocidades de ondas de corte en un rango de 800 a 1400 m/s, las cuales en profundidad superan los 1400 m/s. Se interpreta que la compacidad de material granular aumenta en profundidad hasta que a los 160 m se encuentra el contacto depósito-basamento.

El perfil se despliega en sector de Socos, en donde se realizó toma de muestra n° 25 correspondiente a afloramiento de agua termal por lo que puede asociarse que el basamento, somero y posiblemente fisurado por acción de fallas existentes en el tramo bajo de la cuenca, actúa como medio para su ascenso.

4.1.3.3. AMT – TEM – ERT

Un conjunto de perfiles de resistividad realizados en la cuenca Río Limarí se concentran en sector A', en tramo previo a la desembocadura de río Limarí y valles cercanos.

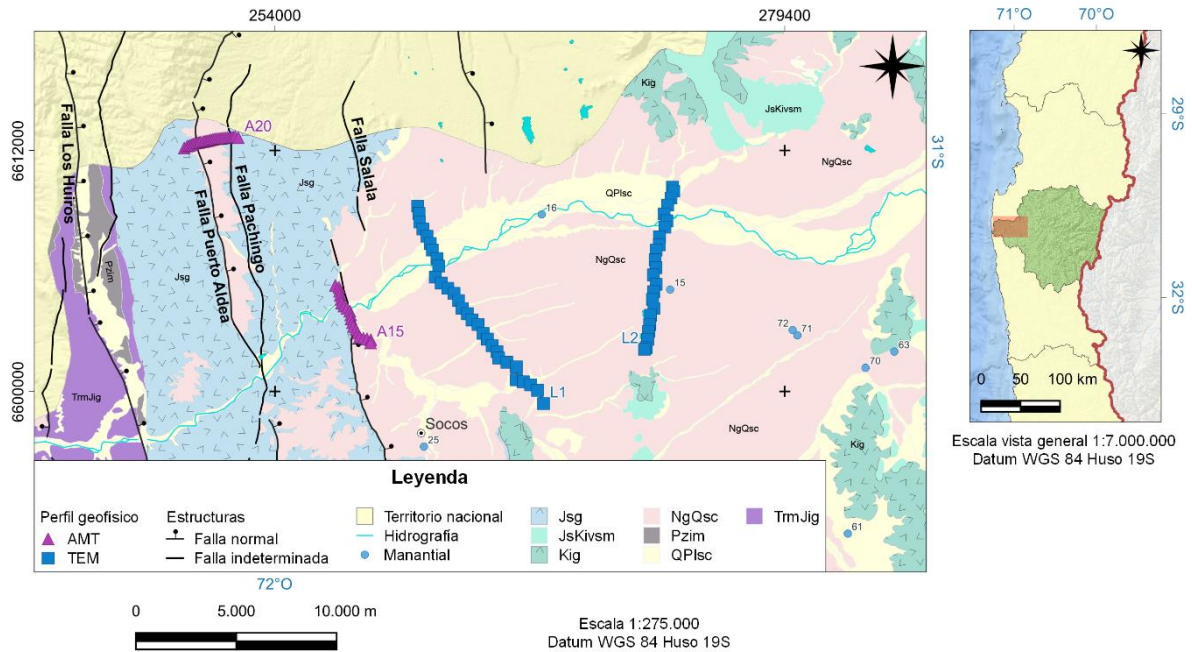


Figura 4.23: Ubicación perfiles geoelectricos en zona baja de cuenca Río Limarí.

A continuación, en la Figura 4.24 se presentan los perfiles TEM en la zona oeste de la cuenca.

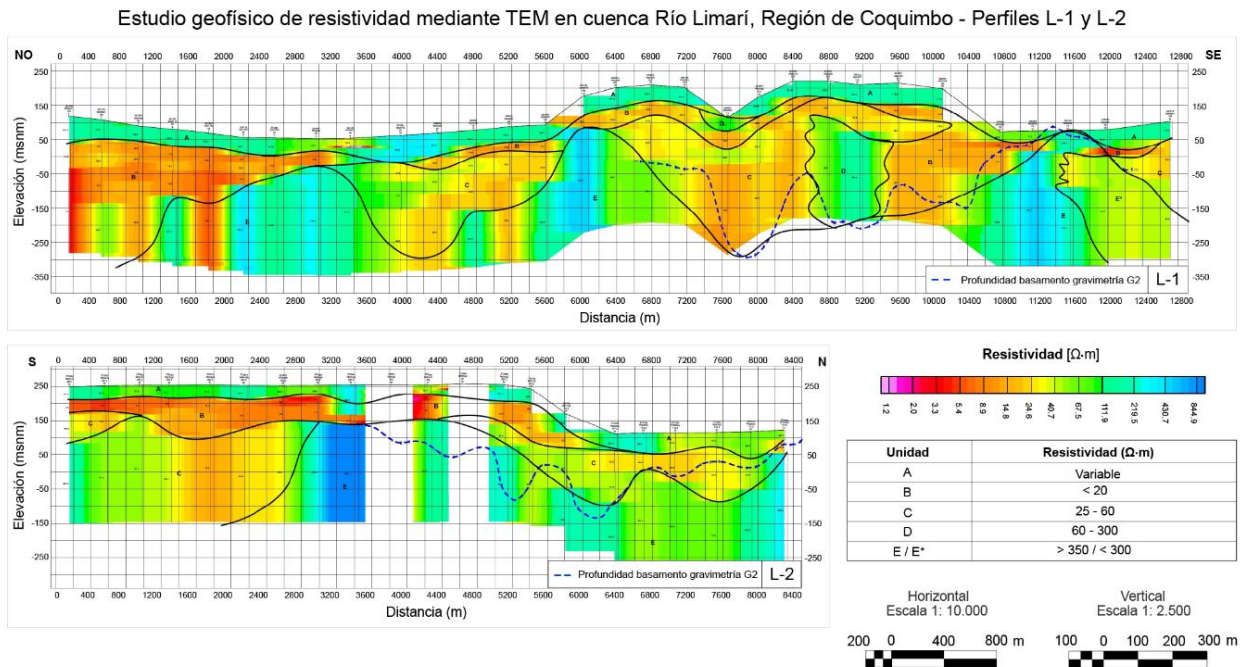


Figura 4.24: Sección de interpretación líneas TEM L1 y L2.

Estos perfiles TEM poseen una dirección NO-SE (L-1) y S-N (L-2) y son transversales al curso del río Limarí.

Ambos perfiles presentan un dominio geoelectrico superficial con 75 m de espesor y resistividad variable entre los 30 y 250 $\Omega \cdot m$. Las resistividades disminuyen a mayor profundidad, siendo inferior a 60 $\Omega \cdot m$ hasta los de 400 m. Esta unidad irregular con resistividad que varía entre los 60 y 7000 $\Omega \cdot m$ tiene al menos 100 metros de profundidad. Al relacionarlos con el perfil gravimétrico G2, la profundidad del basamento es similar al cambio de resistividad sobre los 100 $\Omega \cdot m$.

Se interpreta como un valle con presencia de depósitos sedimentarios de grano fino a medio saturados sobre roca que logra profundidades variables debido a que probablemente su horizonte se encuentra erosionado o fisurado por acción de estructuras de la zona como fallas de tipo normal, generando una alta densidad de fracturas abiertas y estrechamente espaciadas cubiertas por la capa de sedimentos superficial.

Si se observa la geología de la zona, existe mayor extensión de secuencias sedimentarias continentales, a diferencia de depósitos aluviales concentrados principalmente en cercanía del curso de agua. No se descarta la posibilidad de conexión entre curso de agua superficial con la roca fracturada debido a su cercanía a superficie en ese sector como también el flujo de agua subterránea mediante fracturas discretas presentes en el límite superior del basamento debido a la existencia de pozo de profundidad de 84 m a los 3 km desde extremo sur del perfil hacia su extremo norte con uso vigente por compañía Pisquera de Chile (muestra n° 15).

Estudio geofísico de resistividad AMT en cuenca Río Limarí, Región de Coquimbo - Perfiles A15 y A20

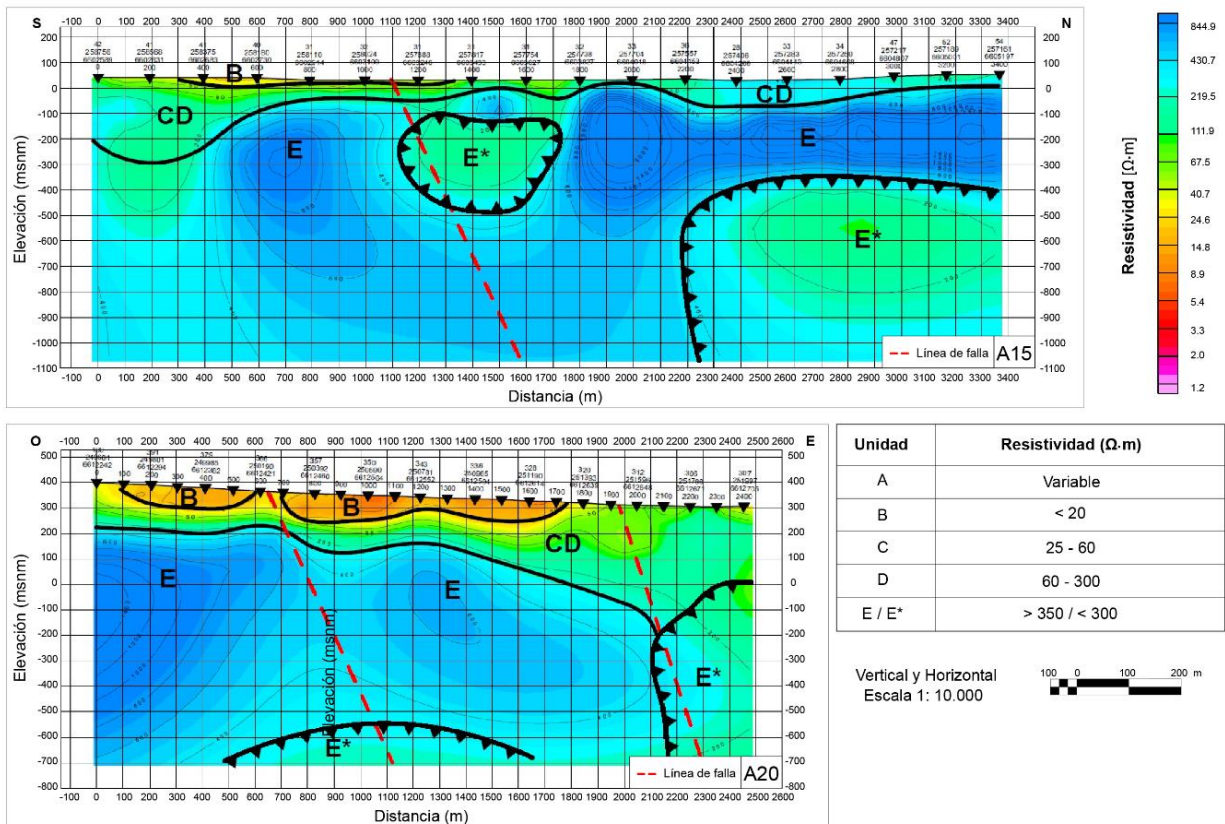


Figura 4.25: Sección de interpretación líneas AMT A15 y A20.

El perfil A15 se ubica transversal al curso del río Limarí aguas abajo de perfiles anteriormente descritos. En él se aprecia un dominio geoelectrico con resistividad menor a $200 \Omega \cdot m$, interpretado como depósitos sedimentarios de diversidad granulométrica saturados no superan un espesor de 350 m. Las resistividades van aumentando gradualmente a profundidad y superan los $400 \Omega \cdot m$ hasta al menos los 800 m correspondiendo a basamento somero alterado y con índices de posible fracturamiento al existir sectores que revelan la presencia de cuerpos irregulares de baja resistividad en la parte media del perfil y en la zona norte. Las variaciones de resistividad eléctrica observada son resultado de cambio geológico en tramo bajo de la cuenca controlado por dominio estructural occidental y central.

En perfil A20 con una dirección O-E se aprecian resistividades menores a $20 \Omega \cdot m$ y con una profundidad máxima de 100 m, valores de resistividad que aumentan en torno a los $100 \Omega \cdot m$ hasta los 400 m hacia el este. Estas unidades sobreyacen un dominio geoelectrico de resistividades que varían de 400 a $1400 \Omega \cdot m$ desde los 200 m a los 1100 m de profundidad, pero que muestran una disminución hacia el este de la capa. Se interpreta que este perfil refleja una capa superficial de sedimentos no saturados concentrada hacia el oeste sobre la roca fracturada en mayor grado en límite superior como en zona este del perfil, lo cual coincide con una posible zona de daño de estructura que, de acuerdo con la geología de la cuenca, corresponde a la falla Pachingo la cual controla el contacto de Jsg y Ngqsc (Figura 4.23).

Un segundo conjunto de perfiles de resistividad realizados en la cuenca Río Limarí se concentran en sector B', en valles del sector de Punitaqui. La Figura 4.26 muestra los perfiles de resistividad por metodología AMT realizados en este sector de la cuenca.

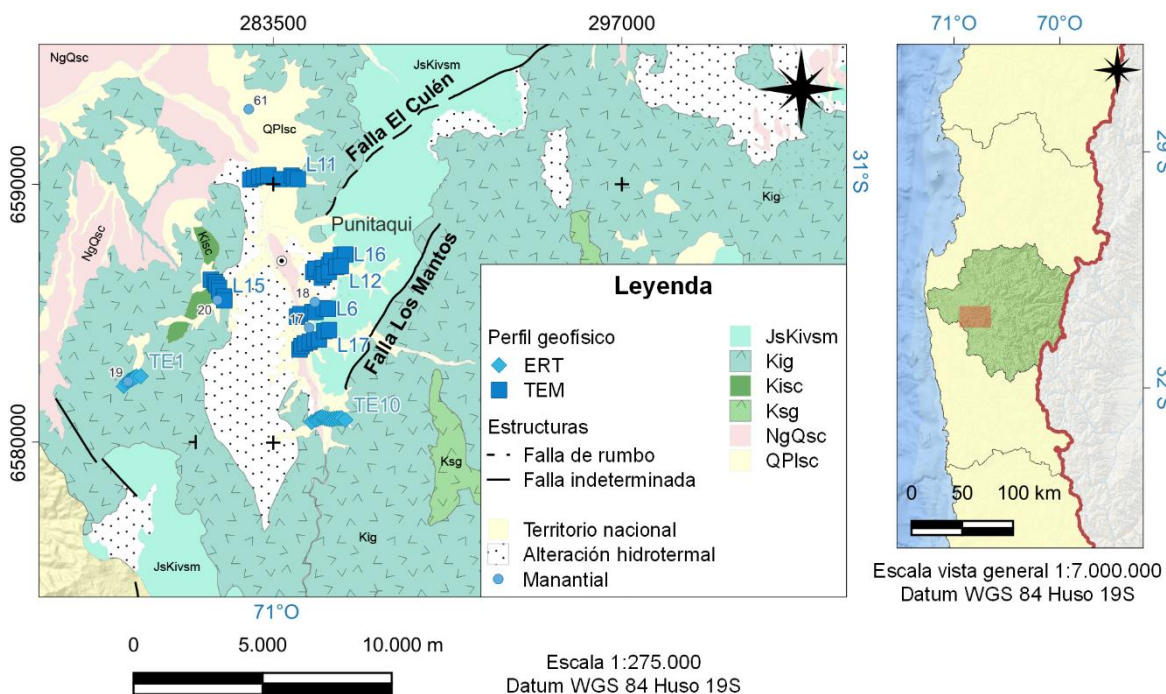


Figura 4.26: Ubicación perfiles geoelectricos en zona media de cuenca Río Limarí.

La Figura 4.27 muestra los perfiles de resistividad por metodología TEM y ERT realizados en este sector de la cuenca.

Estudio geofísico de resistividad mediante TEM y ERT en cuenca Río Limarí, Región de Coquimbo
Perfiles L-6, L-11, L-15 y TE10

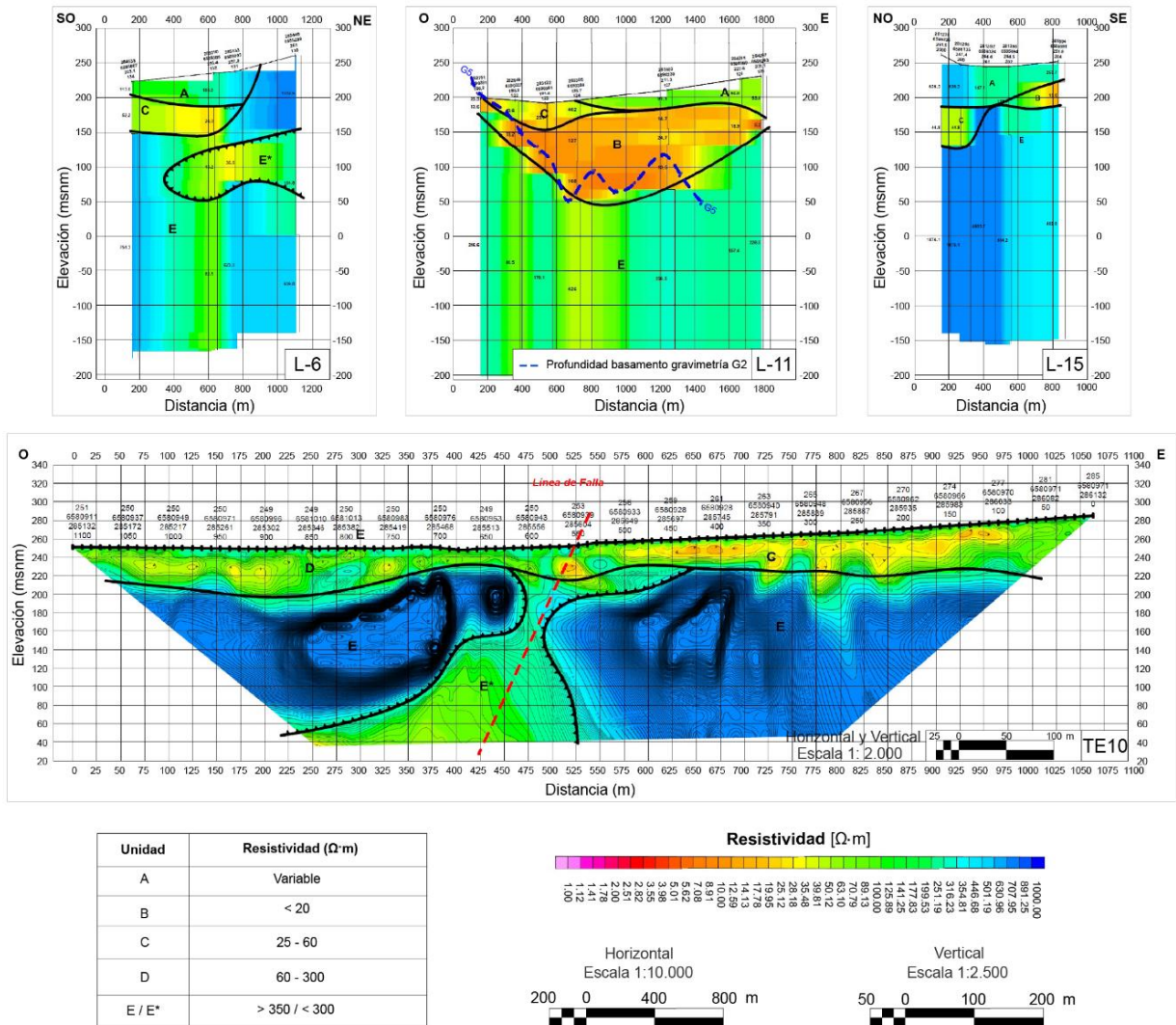


Figura 4.27: Sección de interpretación líneas TEM L6, L11 y L15, y línea ERT TE10.

Los perfiles TEM en la zona de Punitaqui presentan dominios geoelectricos superficiales con un espesor que varía entre 75 y 150 m en la cual las resistividades van desde 60 a 10 $\Omega \cdot m$ a mayor profundidad. Se observa puntualmente mayor resistividad en superficie. Estos corresponden a depósitos sedimentarios no saturados que sobreyacen a depósitos saturados de bajo espesor, pero aumentando hacia el norte de Punitaqui donde alcanzan los 200 m de profundidad.

En el dominio geoelectrico inferior las resistividades superan los 100 $\Omega \cdot m$ y es más somera en perfiles L-6 y L-15 ubicados de manera transversal en las quebradas aledañas. Este corresponde al basamento el cual tiene un contacto irregular con el relleno pudiendo considerarlo como paleorelieve, encontrándose fisurado y alterado.

En el perfil TE10 desarrollado con método ERT se aprecia una marcada diferencia de resistividades entre los primeros 60 m de profundidad y los siguientes 180 m. La unidad superficial varía entre los 30 y 200 $\Omega \cdot m$ donde los valores mayores se concentran hacia el oeste. Bajo esta,

subyace un dominio geoelectrico con resistividades superiores a $400 \Omega \cdot m$. En la parte central de este perfil se observa una banda vertical bien definida con un espesor que va variando a medida que se profundiza hasta los 300 m. Esta banda posee resistividades entre los 50 y $200 \Omega \cdot m$.

Se logra interpretar que bajo una capa de sedimentos superficiales saturados que pueden considerarse consolidados o de mayor granulometría hasta el oeste, el basamento se encuentra desde los 60 m hasta los 260 m de profundidad y se encuentra alterado en la parte central, una zona de fracturas como posible consecuencia de la acci3n de fallas cercanas o la extensi3n de la falla Los Montes la cual es mapeada hasta metros más al norte y que fue cubierta por el material sedimentario que conforma la mayoría de quebradas y valles de la regi3n.

Un tercer conjunto de perfiles de resistividad realizados en la cuenca Río Limarí se concentran en valles del sector de Combarbalá (sector C').

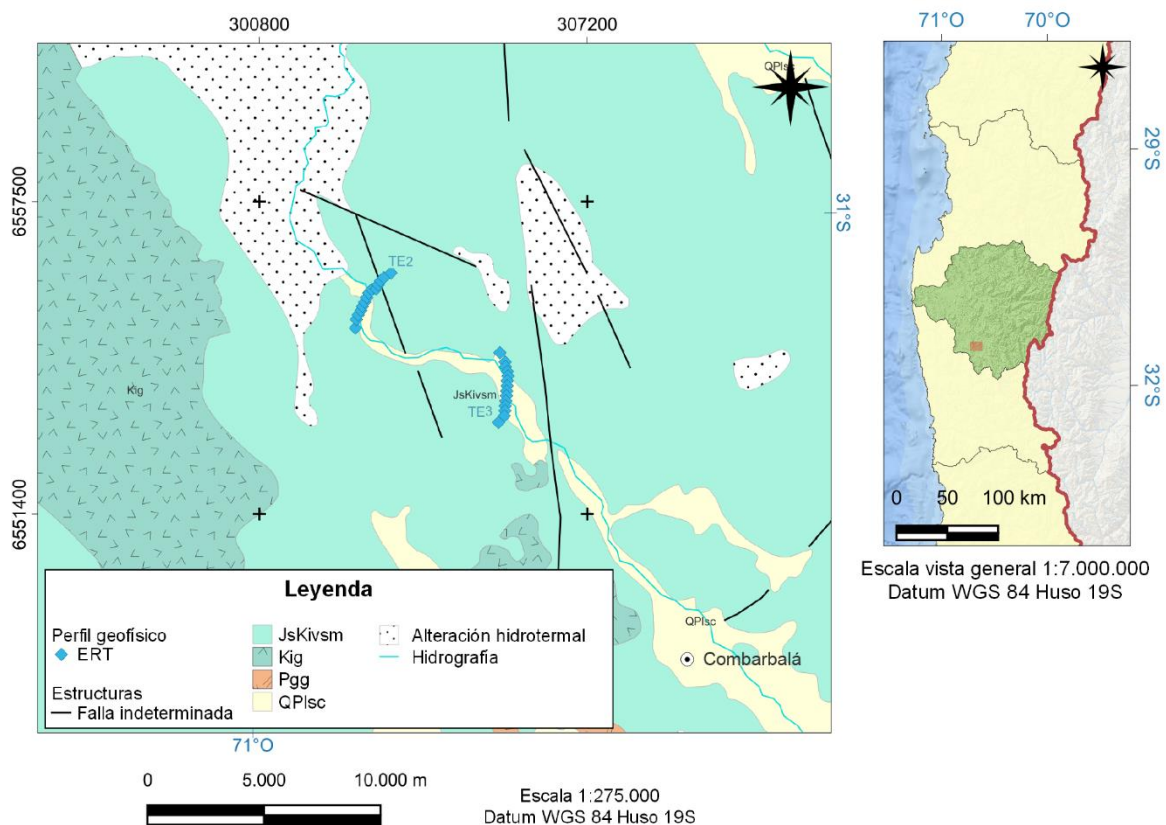


Figura 4.28: Ubicaci3n perfiles geoelectricos en zona media sur de cuenca Río Limarí.

La Figura 4.29 muestra los perfiles de resistividad realizados en este sector de la cuenca. Se encuentran ordenados de acuerdo con en el tramo de río Cogotí en el que se desplegaron.

Estudio geofísico de resistividad mediante ERT en cuenca Río Limarí, Región de Coquimbo - Perfiles TE2 y TE3

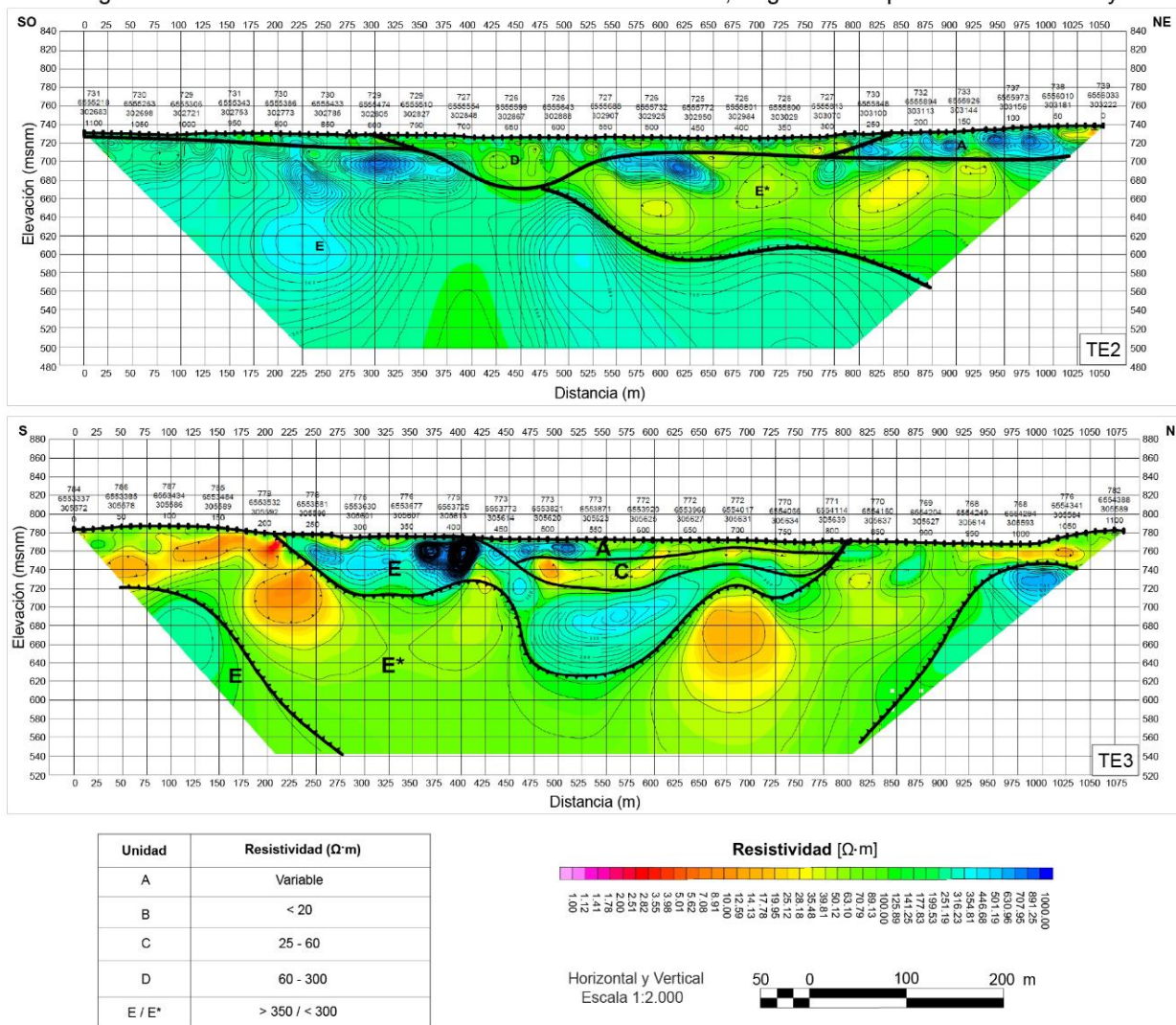


Figura 4.29: Sección de Interpretación líneas TE2 y TE3.

Los perfiles ERT en la zona de Combarbalá muestran resistividades superiores a $20 \Omega \cdot m$ y presentan una unidad superficial de resistividad variada, alcanzando profundidades de hasta 230 m en sector suroeste de perfil TE2. Hacia el noreste disminuye la resistividad a $30 - 100 \Omega \cdot m$ por al menos 100 m. En perfil TE3 la variación de resistividad es más notoria, sin embargo, los valores entre 5 y $100 \Omega \cdot m$ parecen encontrarse como una banda irregular desde la superficie en los extremos del perfil y alcanzando profundidades de 150 m en su parte central.

Se interpreta que depósitos sedimentarios no saturados de grano grueso se concentran en tramo aledaño a curso del río, mapeados como depósitos sedimentarios fluvio-aluviales, sobreyacen a un basamento erosionado y alterado como consecuencia de la acción de estructuras y geotectónica en la zona, en la cual se encuentran fallas mapeadas. Esta alteración en rocas volcano-sedimentarias jurásicas es mayor aguas arriba del perfil TE3 y, posiblemente, se encuentra fracturada saturada pudiendo ser medio de conexión entre agua del curso de agua superficial con el agua subterránea. Aguas abajo, zona en que se despliega el perfil TE2, se

interpreta como basamento somero alterado en mayor medida hacia el noreste lo que coincide con estructura presente.

Un cuarto conjunto de perfiles de resistividad realizados en la cuenca Río Limarí se concentran en tramos de río Grande en zona alta de la cuenca (sector D').

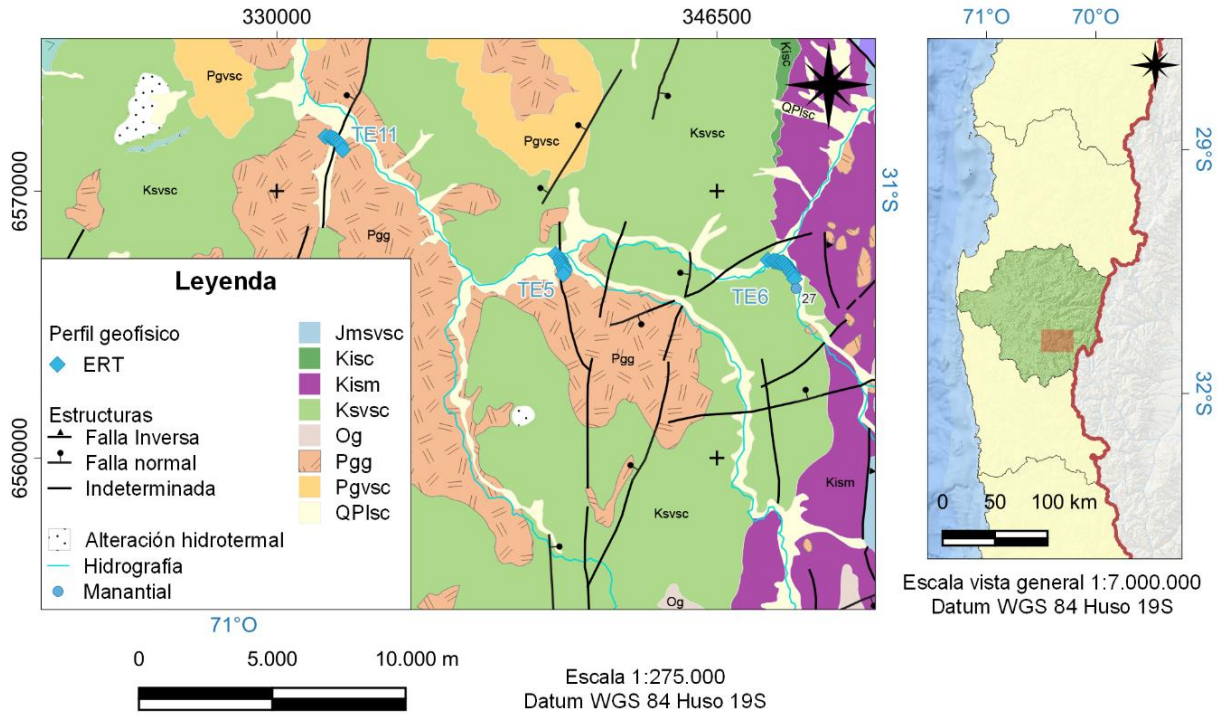


Figura 4.30: Ubicación perfiles geoelectricos en zona alta de cuenca Río Limarí.

La Figura 4.31 muestra los perfiles de resistividad realizados en este sector de la cuenca. Se encuentran ordenados de acuerdo con en el tramo de río Claro en el que se desplegaron.

Estudio geofísico de resistividad mediante tomografía eléctrica en cuenca Río Limarí, Región de Coquimbo - Perfiles TE5, TE6 y TE11

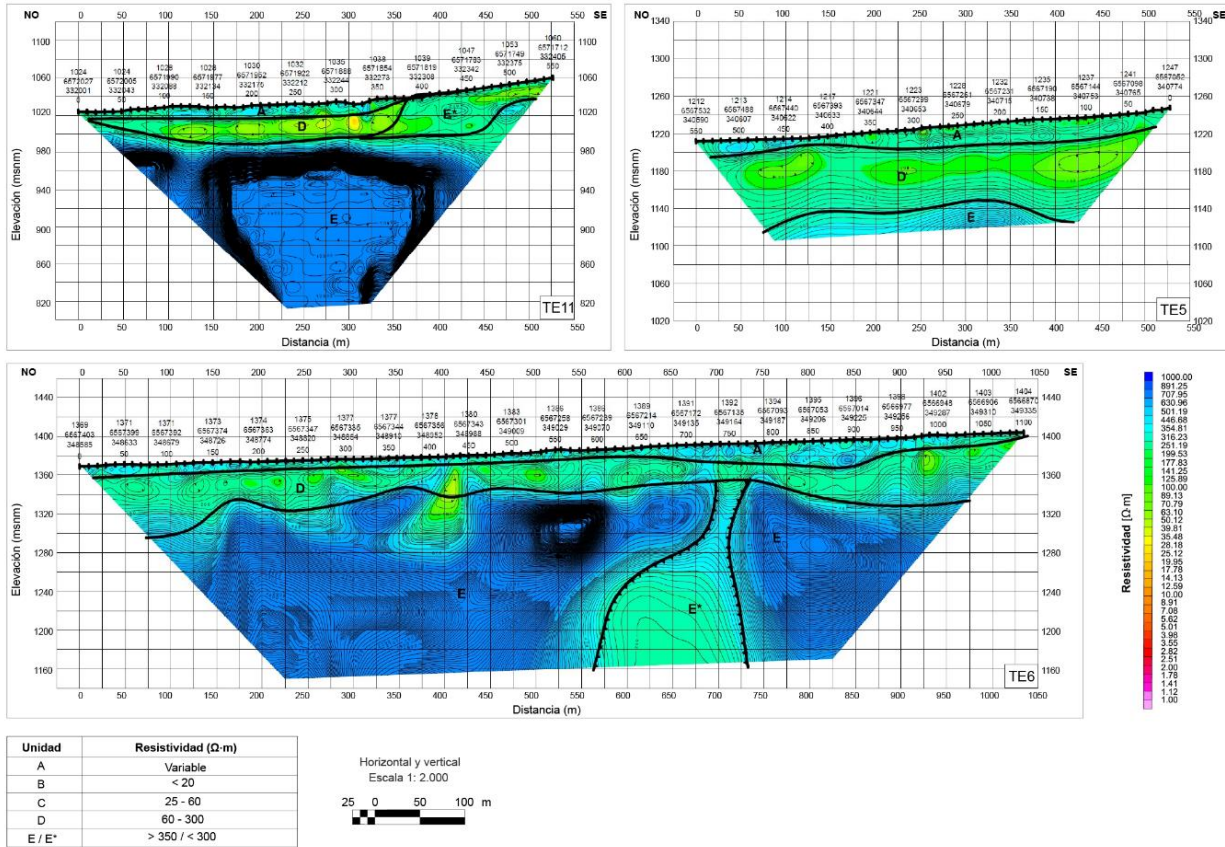


Figura 4.31: Sección de Interpretación líneas TE11, TE5 y TE6.

Los perfiles ERT en la zona sureste de la cuenca poseen una dirección NO-SE y dispuestos tanto de manera transversal al curso de río Grande (TE5 y TE6) como en zona aledaña a él (TE11).

Se aprecia que las resistividades son en general sobre los 30 $\Omega \cdot m$. El dominio geoelectrico superior de estos perfiles posee resistividades entre los 100 y 400 $\Omega \cdot m$ y con un espesor menor a los 30 m. El dominio geoelectrico identificado más profundo en estos perfiles es constituido por resistividades superiores a 400 $\Omega \cdot m$ y es más somero en los perfiles TE11 y TE6, mientras que en perfil TE5 se percibe a los 140 m de profundidad. El perfil TE6 revela la presencia de cuerpo alargado de baja resistividad bien definido al interior de este dominio.

Se interpreta que una capa de sedimentos superficiales no saturados de bajo espesor cubre un depósito sedimentario de grano grueso saturados de mayor espesor en la parte media del curso de río. El basamento se encuentra somero y, al ser un sector de gran densidad de estructuras mapeadas, se encuentra alterado o fracturado. Al encontrarse somero el sótano y, además fisurado, facilita posiblemente la conexión de esta zona con agua superficial, sin embargo, se requiere un mayor estudio en ese punto.

Interpretación general de cuenca Río Limarí

En zona baja de la cuenca, cercanía a desembocadura Río Limarí existe capa de relleno sedimentario con tamaño de grano medio a grueso, aumenta su consolidación en profundidad. En tramo medio de la cuenca, el relleno es de 60 m de espesor. El techo del basamento y en sectores de su interior presenta cambios laterales de resistividad que se debe a que se encuentra fracturada saturada o probablemente también existan zonas mineralizadas o alteradas, asociadas a líneas de fallas presentes en el dominio estructural central de la región que afectan a la roca y generan paleorelieves.

En zona alta el relleno sedimentario de grano grueso posee un espesor entre 30 y 80 m y se encuentra saturado con agua de muy baja salinidad. La roca mientras más cerca al conjunto de fallas mapeadas en la zona se encuentra más alterada y fisurada saturada por lo visto con las anomalías de resistividad.

4.2. Estimación e Interpretación de Parámetros elásticos

Los parámetros elásticos de un acuífero se obtienen mediante un ensayo de bombeo, que corresponde a un método de análisis de pozos de captación de aguas subterráneas del acuífero en el que se encuentran. Para la obtención de valores de los citados parámetros, se realizó un catastro de los ensayos de bombeo presentes en los expedientes de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas (DGA), además de la información generada del sondaje realizado dentro de la campaña de terreno del proyecto en Quebrada Arrayán en la cuenca Río Elqui (Figura 4.32).

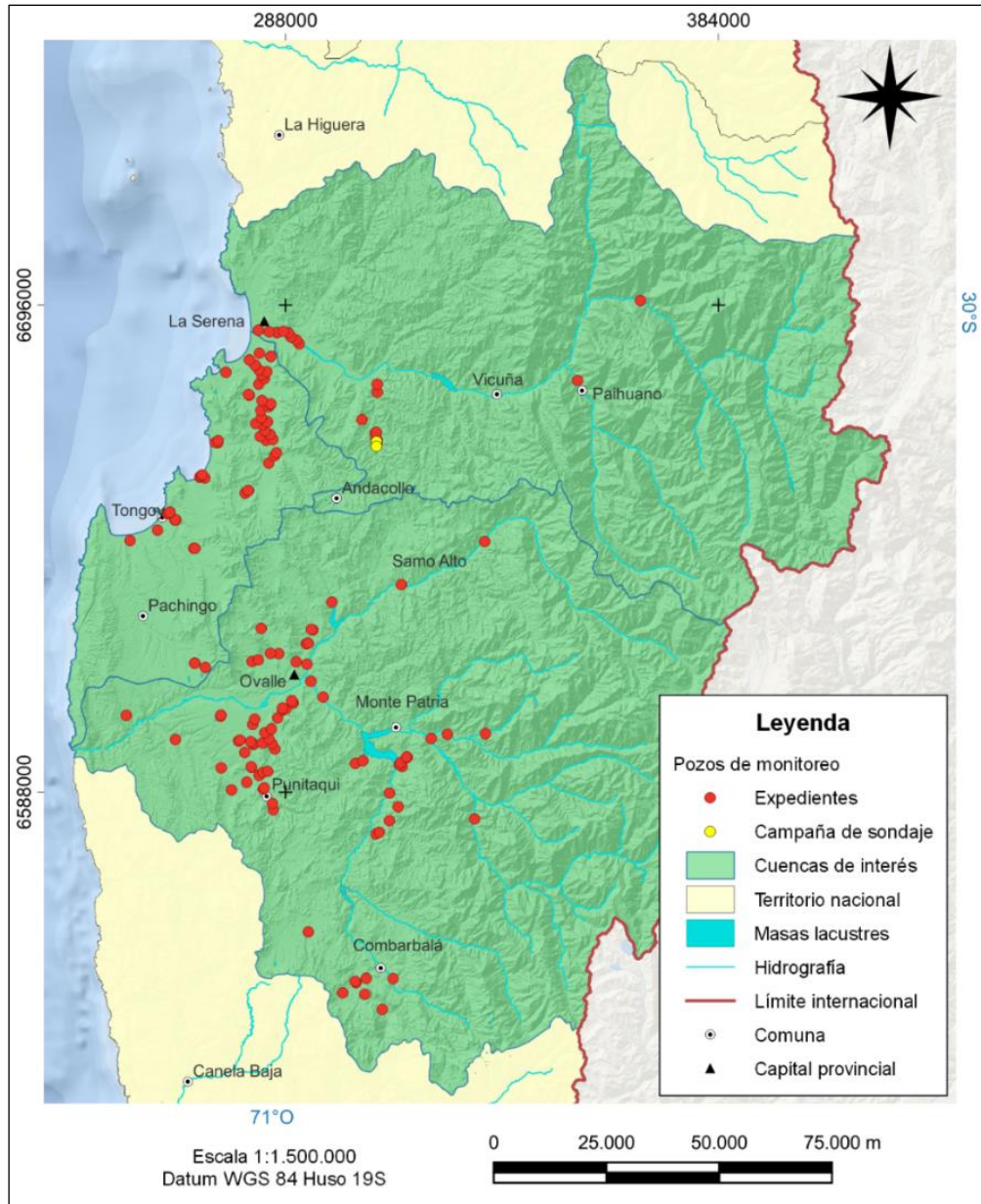


Figura 4.32: Mapa distribución pozos de monitoreo de expedientes DGA y campaña de sondaje realizada en campaña de terreno de proyecto (DGA, 2022) en cuencas de interés.

El movimiento del agua subterránea está influenciado y determinado por ciertas características hidráulicas propias del acuífero tales como: conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y transmisividad.

Por medio de la información recopilada por las pruebas de bombeo es posible calcular estas características. Es necesario mencionar que, sólo existe información de los descensos del nivel de agua únicamente de pozos de bombeo y no en pozos de observación y el espesor de capas es entregado por sólo un porcentaje de estos. De los informes técnicos, no existen expedientes que adjunten resultados de todas las características hidráulicas mencionadas, por lo tanto, para términos de este trabajo se obtienen los valores de Transmisividad.

La transmisividad representa la capacidad que tiene el acuífero de ceder agua, y depende de su espesor, de las propiedades del agua y el medio poroso. El software utilizado para estimar estos valores es AquiferTest Pro, en el cual se utiliza el método de Theis (Theis, 1935) para acuíferos libres, haciendo un buen ajuste con la curva logarítmica (Anexo A). Los resultados se desprenden por cuenca de interés analizada y, posteriormente comparadas con la clasificación estimativa definida por Villanueva e Iglesias (1984).

Transmisividad (m ² /s)	Clasificación Estimativa
$T < 1,2 \cdot 10^{-4}$	Muy baja
$1,2 \cdot 10^{-4} < T < 1,2 \cdot 10^{-3}$	Baja
$1,2 \cdot 10^{-3} < T < 6 \cdot 10^{-3}$	Media a alta
$6 \cdot 10^{-3} < T < 1,2 \cdot 10^{-2}$	Alta
$T > 1,2 \cdot 10^{-2}$	Muy alta

Tabla 6: Clasificación del acuífero según transmisividad (Villanueva e Iglesias, 1984).

A partir de la información de pruebas de bombeo obtenidas de expediente de DAA, es decir, los caudales de los ensayos de gasto constante y las depresiones en estos bombeos con niveles dinámicos estabilizados, se calculan los caudales específicos en el sistema de estudio y se analizan por cuenca.

El caudal específico corresponde a una herramienta para comprender la eficiencia de pozos, un indicativo del rendimiento característico que presenta la matriz sólida del acuífero en cuestión. Este valor resulta del cociente del caudal por el descenso; las unidades son normalmente litro/segundo y por metro (Montepeque, 2018).

4.2.1. Cuenca Río Elqui

La Tabla 7 presenta las transmisividades obtenidas en cuenca Río Elqui y, en Figura 4.33, se visualiza su distribución espacial y la profundidad de los pozos en los que se midió. Estos datos se concentran en mayor medida en su tramo bajo.

ID	Este (m)	Norte (m)	Profundidad (m)	T m ² /s
52	352784	6679309	50	2,00E-03
53	291048	6687456	80	8,00E-04
58	287137	6689766	62	4,00E-04
66	289074	6689059	150	1,00E-03
75	308221	6666074	60	5,00E-06
84	308339	6678488	31	3,00E-04
235	307900	6667600	91	8,00E-04
236	308200	6665800	91	2,00E-03

Tabla 7: Transmisividades calculadas en cuenca Río Elqui mediante software AquiferTest Pro.

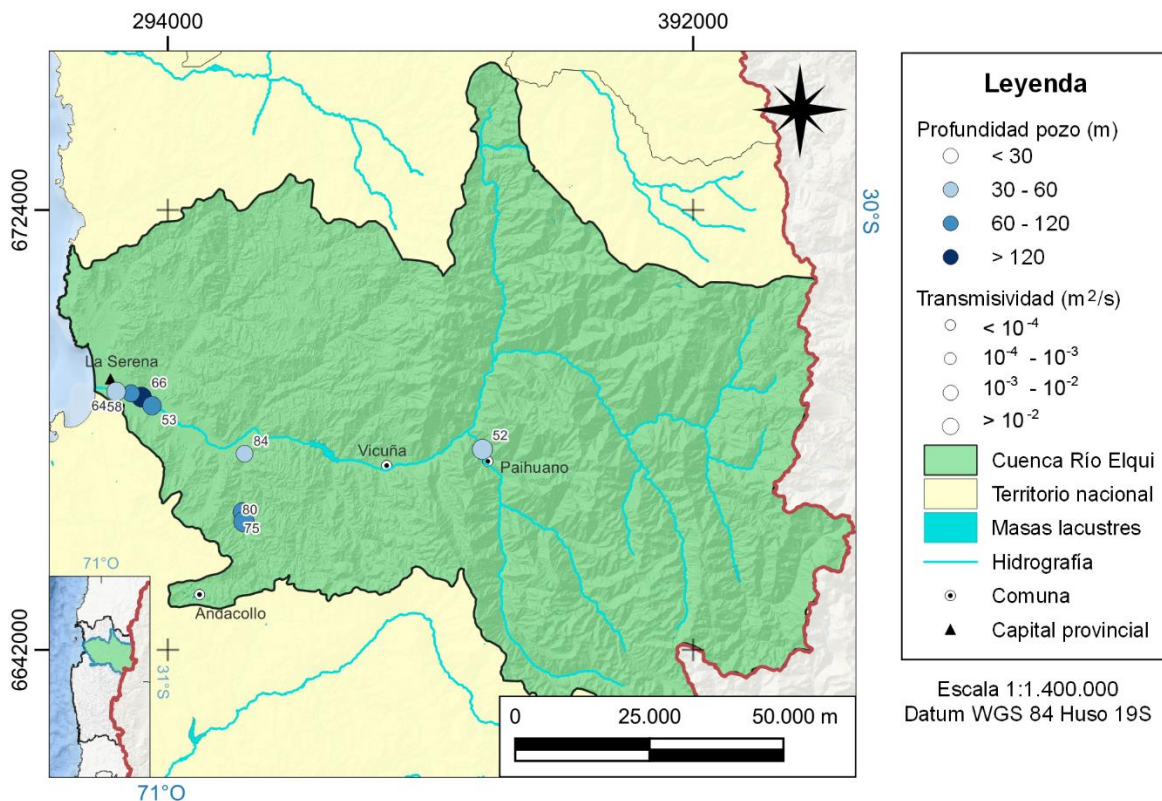


Figura 4.33: Transmisividades calculada y profundidad de pozos de bombeo a lo largo de cuenca Río Elqui.

Se aprecian transmisividades entre 10^{-3} y 10^{-2} m²/s (Tabla 7), sin una distribución espacial característica. Según la clasificación de Villanueva e Iglesias (1986), se infiere que la capacidad de transmitir agua es media a alta, donde el nivel freático se encuentra, principalmente, en depósitos aluviales a profundidades inferiores a 20 m en zona alta y 40 m en zona baja, donde los pozos analizados alcanzan también mayores profundidades.

Los pozos con una menor capacidad de transmitir agua, al encontrarse en valles fluviales como en cercanía a la costa, se atribuye a que los depósitos alcanzan mayores profundidades y con una granulometría más fina. La transmisividad en zona de Quebrada Arrayán alcanza capacidad media a alta según la clasificación detallada, teniendo en cuenta que es sector de roca alterada/fracturada posiblemente permite almacenamiento del recurso.

En Figura 4.34 se visualiza distribución de los caudales específicos de los pozos de muestreo.

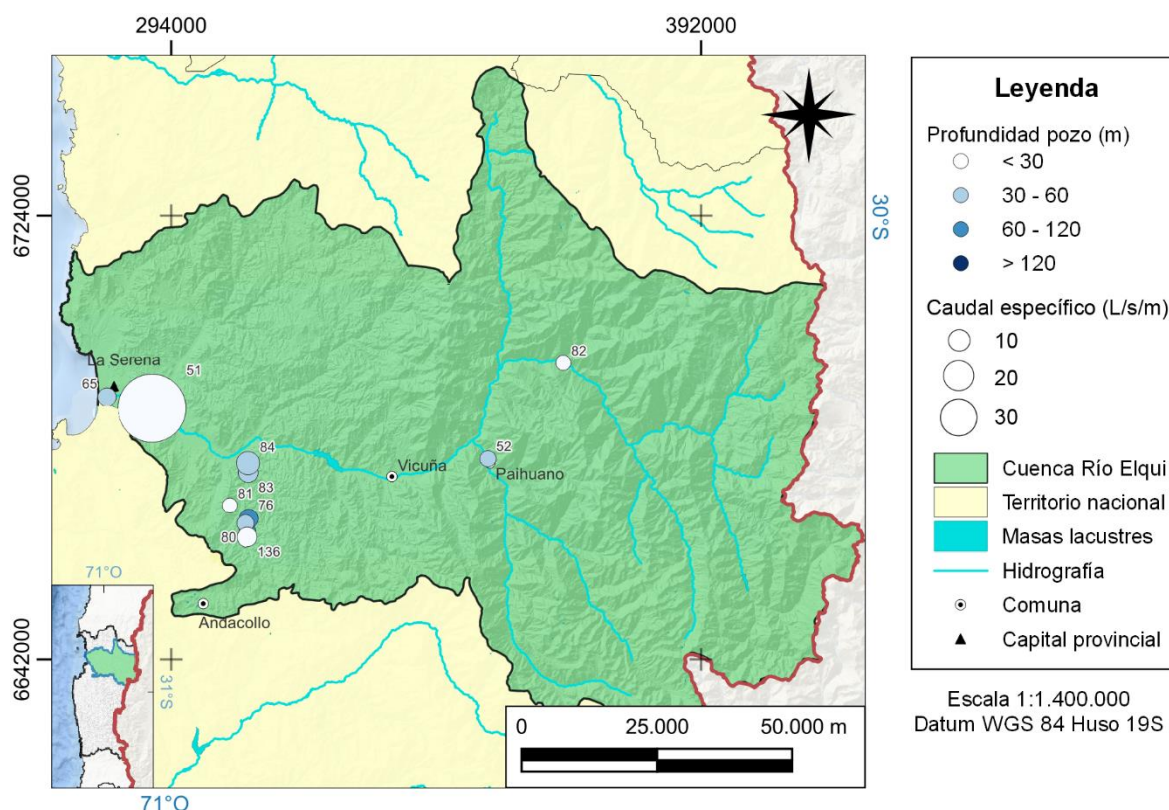


Figura 4.34: Caudales específicos calculados y profundidad de pozos de bombeo a lo largo de cuenca Río Elqui.

En parte baja de la cuenca los pozos, que se encuentran en rellenos sedimentarios de mayor potencia, alcanzan profundidades de hasta 200 m y son desde los que se obtiene un mayor caudal específico, es decir, valores de productividad mayores, superior a 80 (L/s/m) en sector La Serena Norte (Anexo A). Tramo alto no posee mayor cantidad de información, sin embargo, la profundidad de pozos es inferior a 50 m. En quebrada Arrayán se tiene pozos entre 5 y 100 m, sin embargo, no hay un gran caudal extraído a través de estos.

4.2.2. Cuenca Costera Río Elqui – Río Limarí

La Tabla 8 presenta las transmisividades obtenidas en cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí y, en Figura 4.35 se visualiza su distribución espacial y la profundidad de los pozos en los que se midió.

ID	Este (m)	Norte (m)	Profundidad (m)	T m ² /s
13	267866	6616607	130	8,00E-04
19	283684	6666498	120	2,00E-03
26	253529	6643796	21	4,00E-03
31	282869	6671875	150	4,00E-02
36	282542	6672675	80	1,00E-02
90	261917	6650449	60	3,00E-04
92	279044	6654333	60	2,00E-05
111	285774	6663858	81	2,00E-02
113	281401	6669769	100	3,00E-03
114	282075	6681668	40	1,00E-03
116	281243	6682755	116	2,00E-03
119	267901	6642069	78	8,00E-05

Tabla 8: Transmisividades calculadas en cuenca costera mediante software AquiferTest Pro.

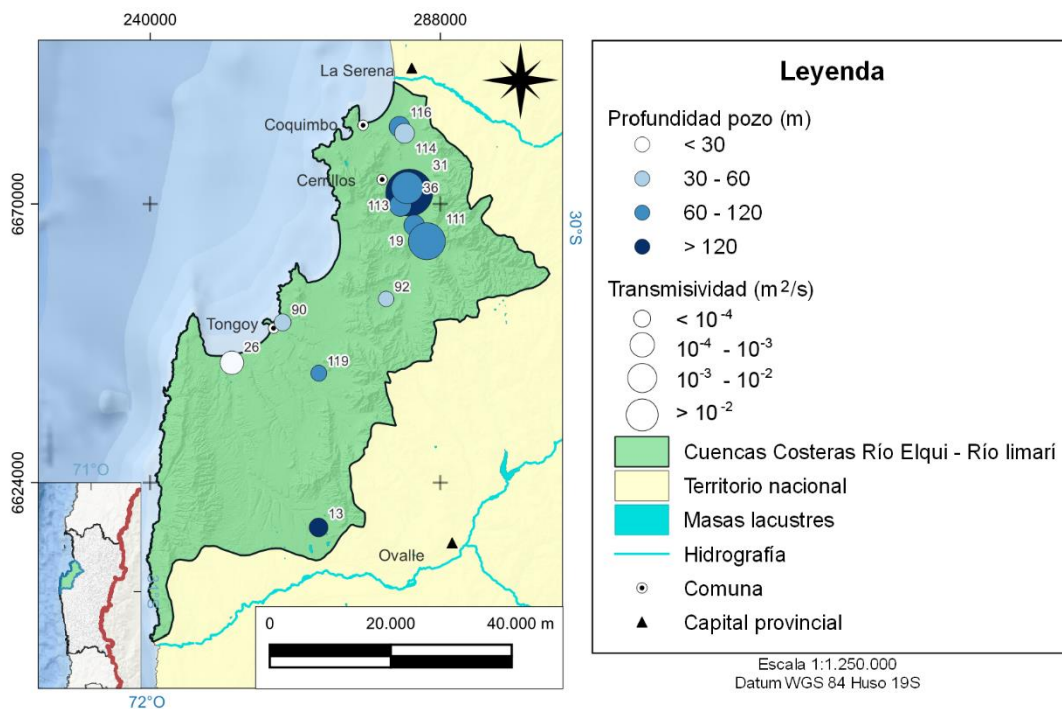


Figura 4.35: Transmisividades calculada y profundidad de pozos de bombeo a lo largo de cuenca costera Río Elqui - Río Limarí.

Se aprecian transmisividades que varían entre $8,3 \cdot 10^{-5}$ y $4 \cdot 10^{-2}$ m²/s (Tabla 8), siendo menores en aquellos pozos ubicados en la parte central de la cuenca y al límite sur del área de

estudio. En el valle norte de la región, sectores aledaños a localidad de Cerrillos, las transmisividades corresponden a valores mayores a 10^{-3} m²/s. Los pozos en zona oeste de la región poseen una menor profundidad, la cual va en aumento hacia el este, donde en el valle norte alcanzan profundidades de hasta 150 m y 140 m en límite al sur.

De acuerdo con estas observaciones, la influencia de material más fino proveniente de la erosión de geformas tanto en cercanías a Coquimbo como zona sur de la región (sectores a menor distancia de línea de costa) afecta a la capacidad de transmitir agua.

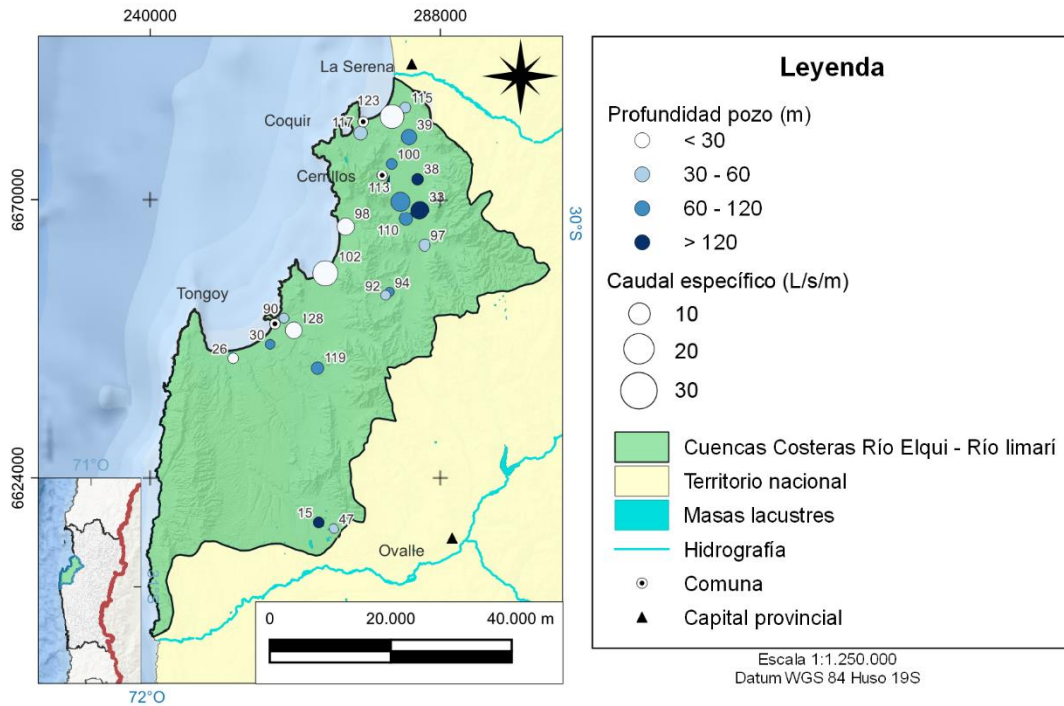


Figura 4.36: Caudales específicos calculados y profundidad de pozos de bombeo a lo largo de cuenca costera Río Elqui - Río Limarí.

En general caudales específicos no superan 1 L/s/m, sin embargo, en valle norte como en cercanía a línea de costa en zona norte de la cuenca logran superar los 10 L/s/m (Anexo A). Esta cuenca posee pozos de profundidades hasta los 180 m y es donde se obtiene mayor extracción de agua en valle norte. Se aprecia que en aquellos con profundidades menores a 30 m son los de mayor productividad.

4.2.3. Cuenca Río Limarí

La Tabla 9 presenta las transmisividades obtenidas en cuenca Río Limarí y, en Figura 4.37, se visualiza su distribución espacial y la profundidad de los pozos en los que se midió.

ID	Este (m)	Norte (m)	Profundidad (m)	T m ² /s
147	282549	6592909	60	1,00E-03
150	252691	6604994	63	2,00E-05
153	289376	6608269	60	3,00E-04
161	332360	6600961	75	7,00E-04
164	308820	6579069	85	2,00E-05
166	295663	6609476	8	6,00E-03
171	282609	6624324	63	2,00E-05
173	293070	6621017	5	7,00E-03
175	263595	6599648	5	1,00E-03
182	311867	6546608	100	5,00E-05
192	313293	6594083	92	1,00E-03
193	305597	6543137	8	2,00E-04
194	303430	6546022	11	9,00E-05
197	279399	6590182	90	8,00E-04
216	288169	6607933	28	2,00E-04
233	311102	6587767	5	2,00E-03

Tabla 9: Transmisividades calculadas en cuenca Río Limarí mediante software AquiferTest Pro.

Se aprecian transmisividades inferiores a 10^{-2} m²/s (Tabla 9), en donde los valores menores se encuentran en pozos del sector sur de la localidad de Combarbalá como al noroeste del tramo bajo del curso de río Limarí. Es limitada la información en zona alta de la cuenca, pero en tramo medio se encuentran alrededor de 10^{-2} m²/s, disminuyendo en un orden en pozos al suroeste de Ovalle.

Los pozos de mayor profundidad, alcanzando los 100 m se encuentran en los altos topográficos mientras que los pozos ubicados en sectores de valles es menor a 30 m. En estos pozos profundos las transmisividades son menores a las mediciones en pozos someros, principalmente en bordes de ríos.

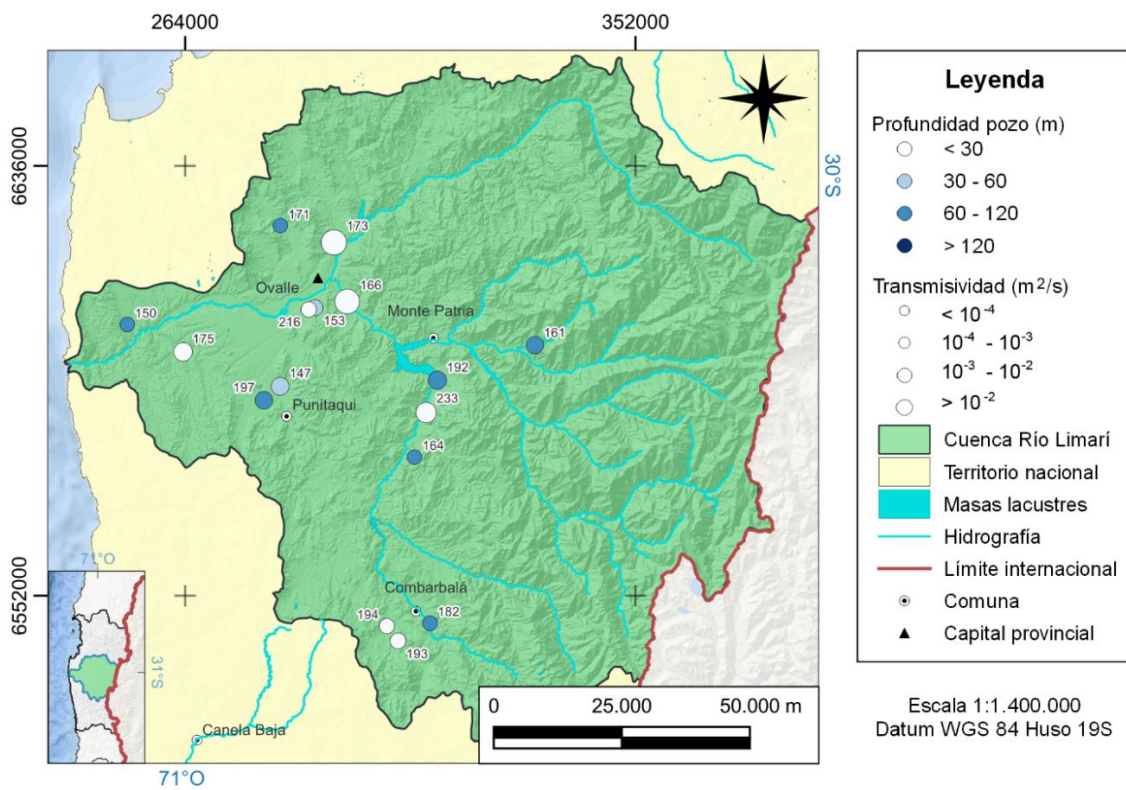


Figura 4.37: Transmisividades calculada y profundidad de pozos de bombeo a lo largo de cuenca costera Río Elqui - Río Limarí.

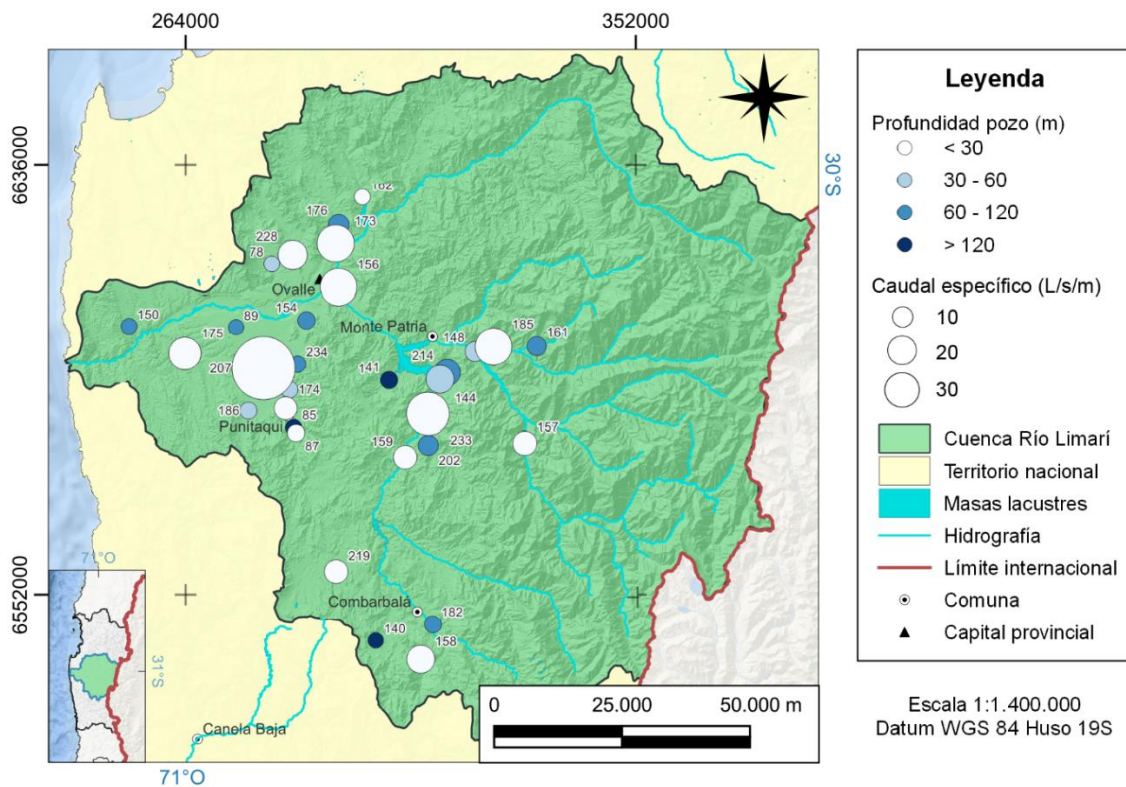


Figura 4.38: Caudales específicos calculados y profundidad de pozos de bombeo a lo largo de cuenca Río Limarí.

Los valores de caudal específico superan los 10 L/s/m en pozos someros (Anexo A) y, principalmente en cercanías a Río Limarí y aguas arriba de Ovalle, como también en los valles entre esta localidad y Socos. Estos caudales dan información sobre la productividad de los pozos analizados, por lo que se aprecia que aquellos con menor rendimiento son mayormente profundos y ubicados en Combarbalá y Punitaqui.

Interpretación general parámetros hidráulicos

A partir de los parámetros calculados, se observa que las zonas de menor transmisividad se sitúan en los bordes de los valles fluviales, en acuíferos profundos con predominio de sedimentos finos y en medios someros conformados por rocas fracturadas y/o meteorizadas. Los valores de transmisividad más altos se encuentran ubicados en el sector del río Limarí, cerca de Ovalle.

Este parámetro indica generalmente la facilidad del agua para circular de manera horizontal por una formación geológica. De acuerdo con esto, los terrenos antes detallados de menor y mayor transmisividad pueden clasificarse según Custodio y Llamas (1983) como acuíferos permeables al constituirse por material de granulometría media a gruesa, teniendo en cuenta que sectores de roca fracturada es algo permeable y se componen también con material fino. Finalmente, los sectores de transmisividades menores están relacionados con una composición de material muy fino como se presenta a las cercanías de la línea de costa, clasificándose como acuíferos poco permeables.

Los caudales específicos permiten identificar la ubicación de pozos más eficientes. Estos valores calculados son mayores en cuenca Río Limarí y valles cordilleranos alcanzando valores de 95 L/s/m, mientras que en tramo bajo de río Elqui y sector costero de la región alcanza valores más bajos (~31 L/s/m). Estas máximas coinciden en zonas en las cuales hay un mayor número de pozos someros y los rellenos sedimentarios son de mayor potencia y de granulometría más gruesa.

4.3. Análisis de Disponibilidad de Recurso Subterráneo

4.3.1. Tendencia histórica de niveles estáticos

Se define como nivel estático a la profundidad a la que se encuentra el agua de un acuífero. Es necesario conocer dónde se encuentra este límite y ver cómo varía en el tiempo para analizar la disponibilidad de las aguas para diferentes usos, tales como riego, consumo humano, industrial, etc., o para bombeo de aguas subterráneas requerido en sistemas de intercambiadores abiertos.

Se obtuvo datos de la DGA correspondientes a 123 estaciones a lo largo de la región de Coquimbo que poseen información de niveles estáticos mensuales entre los años 1970 y 2022, y fue posible graficar la variación de las cotas hidráulicas en este periodo de 83 de estas estaciones (Anexo B).

En los gráficos de la Figura 4.39 se observan los niveles estáticos en estaciones al interior de cuenca Río Los Choros, Río Elqui y cuenca costera entre estos dos ríos. Se mantiene un nivel menor a 40 m desde enero de 1970 en todos los pozos, presentándose un cambio de estos valores a profundidades mayores desde 1995-2000, donde es posible ver una disminución del nivel de aproximadamente 20 m en el caso de los pozos con niveles más altos, ubicados principalmente en cuencas Río Los Choros y cuenca costera, y una disminución de hasta 40 m más en pozos de la cuenca Río Elqui.

Existen pozos con niveles bajos, los cuales se mantienen estables en torno a los 5 m desde 1970 hasta el 2000, observándose que alcanzan los 9 m aproximadamente hasta la actualidad. Se aprecia que el número de estaciones con información de variación de niveles en este periodo es superior en cuenca Río Elqui.

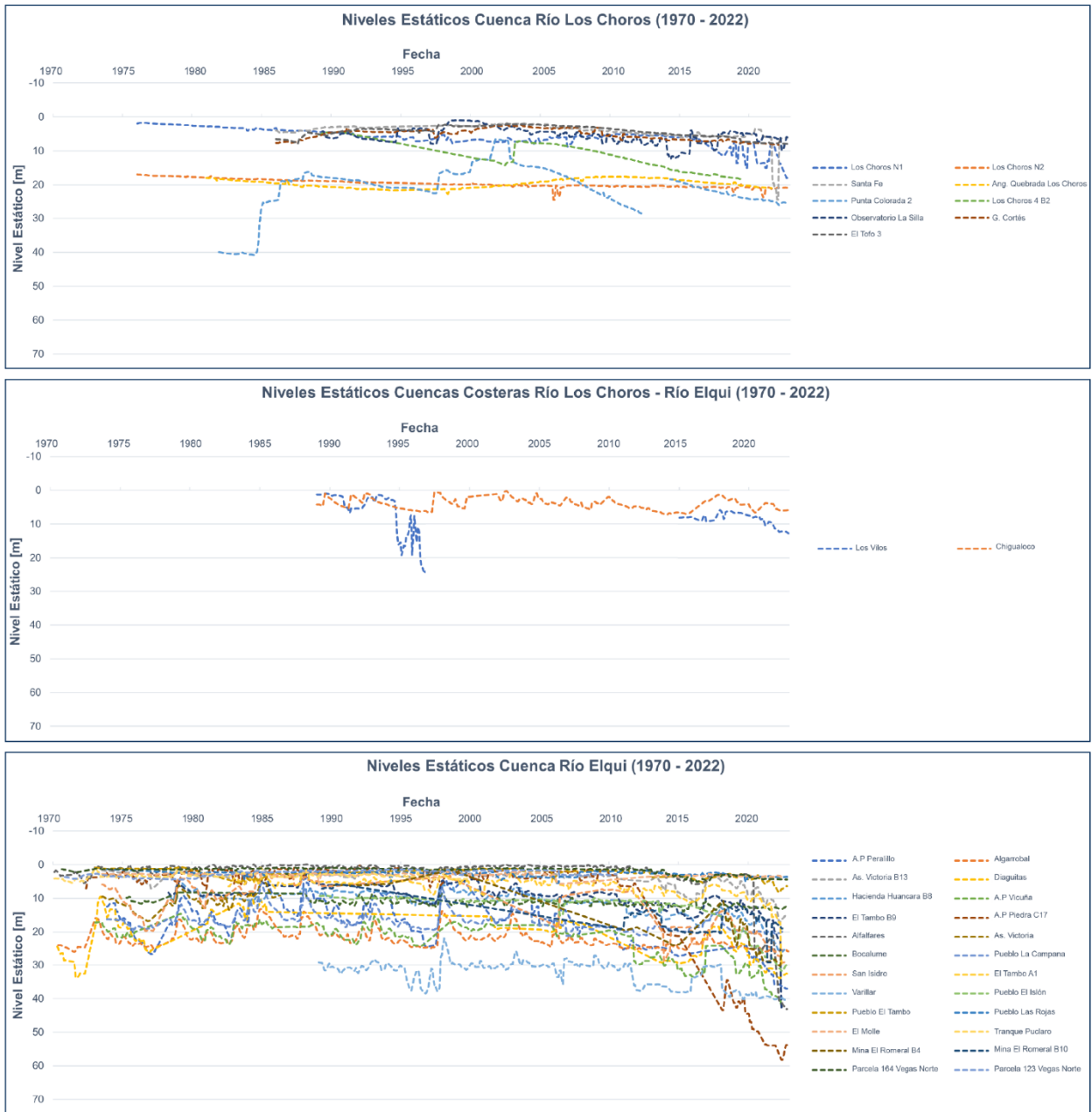


Figura 4.39: Niveles estáticos periodo 1970-2022 en cuencas Río Los Choros, Río Elqui y cuenca costera entre estos dos ríos.

En los gráficos de la Figura 4.40 se observan niveles estáticos en estaciones al interior de cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí, cuenca Río Limarí y cuenca Río Quilimarí. Las profundidades que alcanza el nivel de agua subterránea en estaciones de cuenca costera son variadas, entre 2 y 40 m. Desde 1985 hasta la actualidad, la disminución del nivel es progresivo y ha alcanzado los 50 m y en pozos que niveles inicialmente superaban los 30 m, logran una disminución hasta los 60-70 m de profundidad.

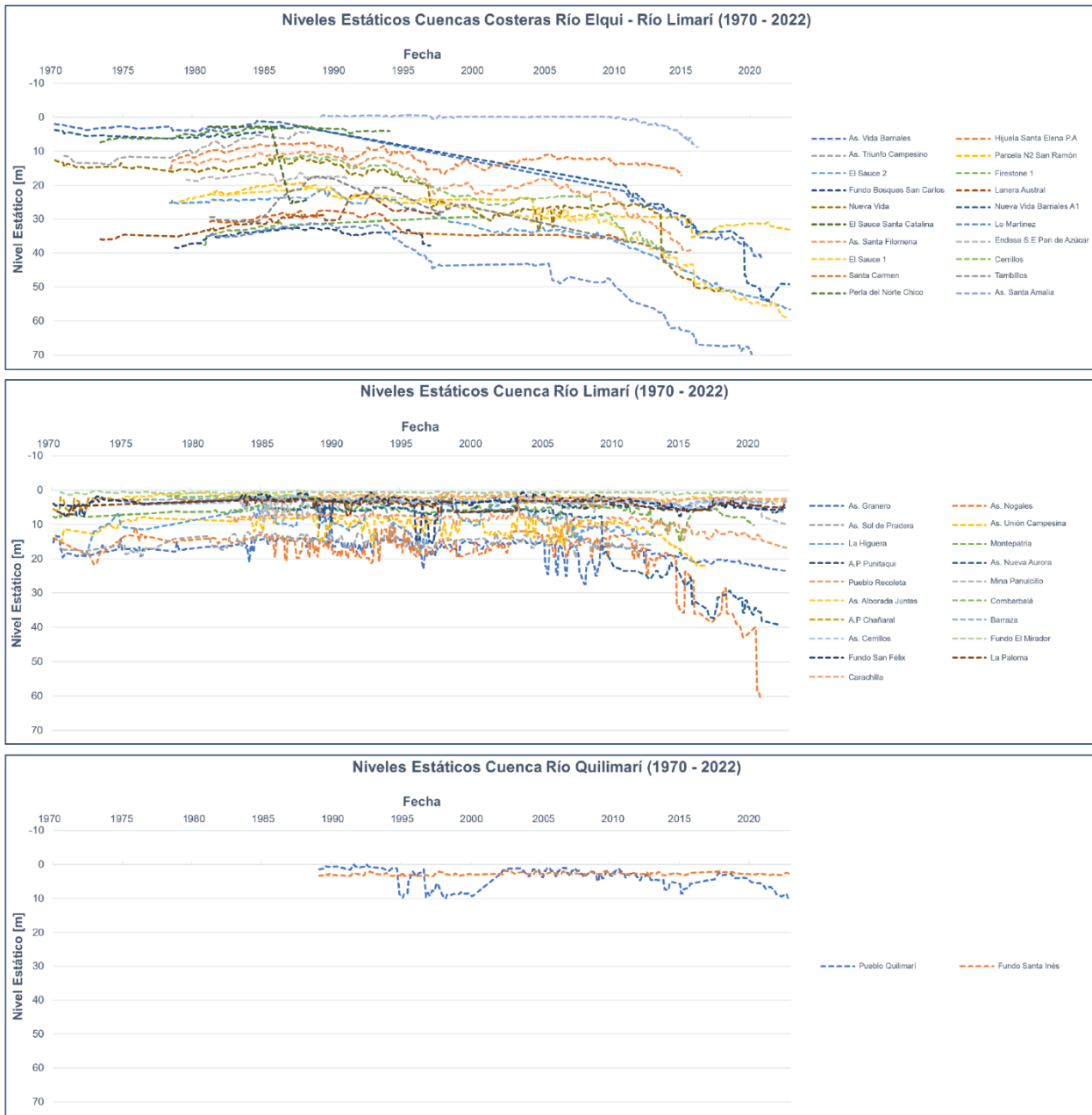


Figura 4.40: Niveles estáticos periodo 1970-2022 en cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí, cuenca Río Limarí y cuenca Río Quilimarí.

Las estaciones al interior de la cuenca Río Limarí presentan niveles estáticos entre, aproximadamente, 1 y 20 m. en las primeras décadas analizadas y, a partir de 1985 existe una fluctuación de los niveles de hasta 5 metros en el nivel, el cual en la actualidad alcanza los 60 m. Estos pozos de mayor disminución del nivel estático en el tiempo son aquellos ubicados en asentamientos agrícolas.

En el gráfico correspondiente a cuenca Río Quilimarí como en cuenca Río Choapa (Figura 4.41) se observa que poseen un máximo de dos y ocho estaciones, respectivamente. Todas estas mantienen un nivel de agua con profundidades inferiores a los 20 m y, en comparación a las otras

cuencas analizadas, el descenso más destacable es en estaciones al interior de pueblos que conforman la zona sur de la región.



Figura 4.41: Niveles estáticos periodo 1970-2022 en cuenca Río Choapa.

4.3.2. Caudales subterráneos otorgados

A partir de los derechos de aprovechamiento de aguas registrados en la DGA para la región estudiada, la elección de datos según título (consuntivo) y tipo de agua (subterránea) se unificaron según la cuenca respectiva con el fin de analizar el caudal acumulado en cada cuenca entre los años 1970 y 2022. Cabe destacar que en los gráficos, no se realiza diferenciación según el uso del recurso en los derechos incorporados en este análisis.

En Figura 4.42 se aprecian los gráficos correspondientes a cuenca Río Los Choros, Río Elqui y cuenca costera entre estos dos ríos. En cuenca Río Los Choros, se otorgan derechos de aguas subterráneas consuntivos desde 1980 y el caudal acumulado es inferior a $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ y aumenta a $1.52 \text{ m}^3/\text{s}$ a principio de siglo, manteniéndose constante en esta cifra hasta la actualidad.

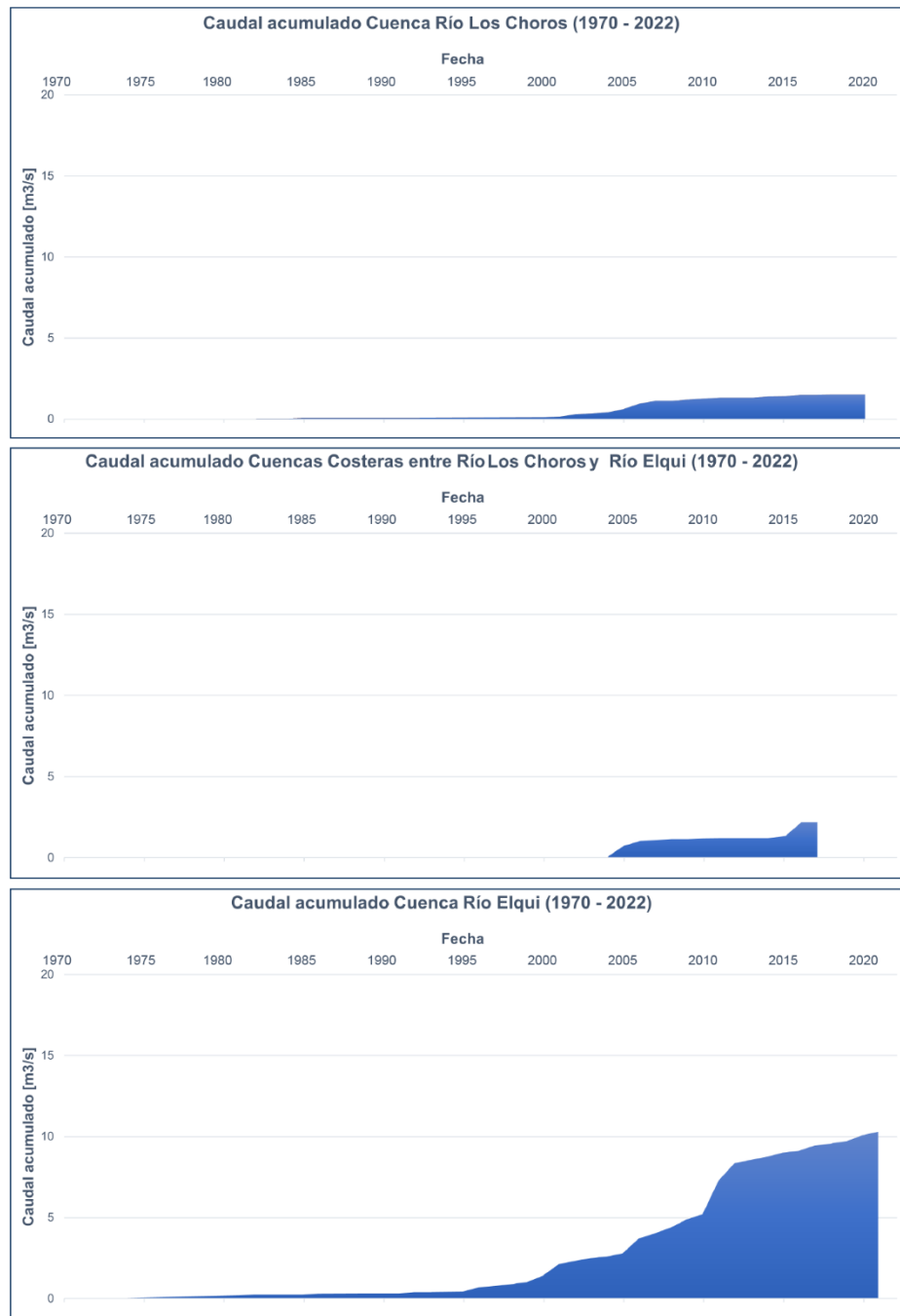


Figura 4.42: Caudal acumulado de derechos otorgados en cuenca Río Los Choros, Río Elqui y cuenca costera entre estos dos ríos.

Se aprecia que el punto de cambio en el caudal en cuenca costera es igualmente en el 2000 y que alcanza caudales acumulados de 2.1 m³/s que en 2015 sufrieron un leve incremento. Los registros de caudal extraídos en la cuenca tienen como última fecha 2017.

Debido a que se concentra en valles de Elqui la distribución de los derechos de otorgamiento del sector Norte de la región, se aprecian caudales acumulados de hasta 10 m³/s en 2020. Existe registro de este caudal extraído en la cuenca desde 1975, sin superar 0.5 m³/s y

manteniendo este valor hasta 1995. Luego de 15 años, el caudal acumulado alcanza los 5 m³/s y se duplica en menos de 10 años.

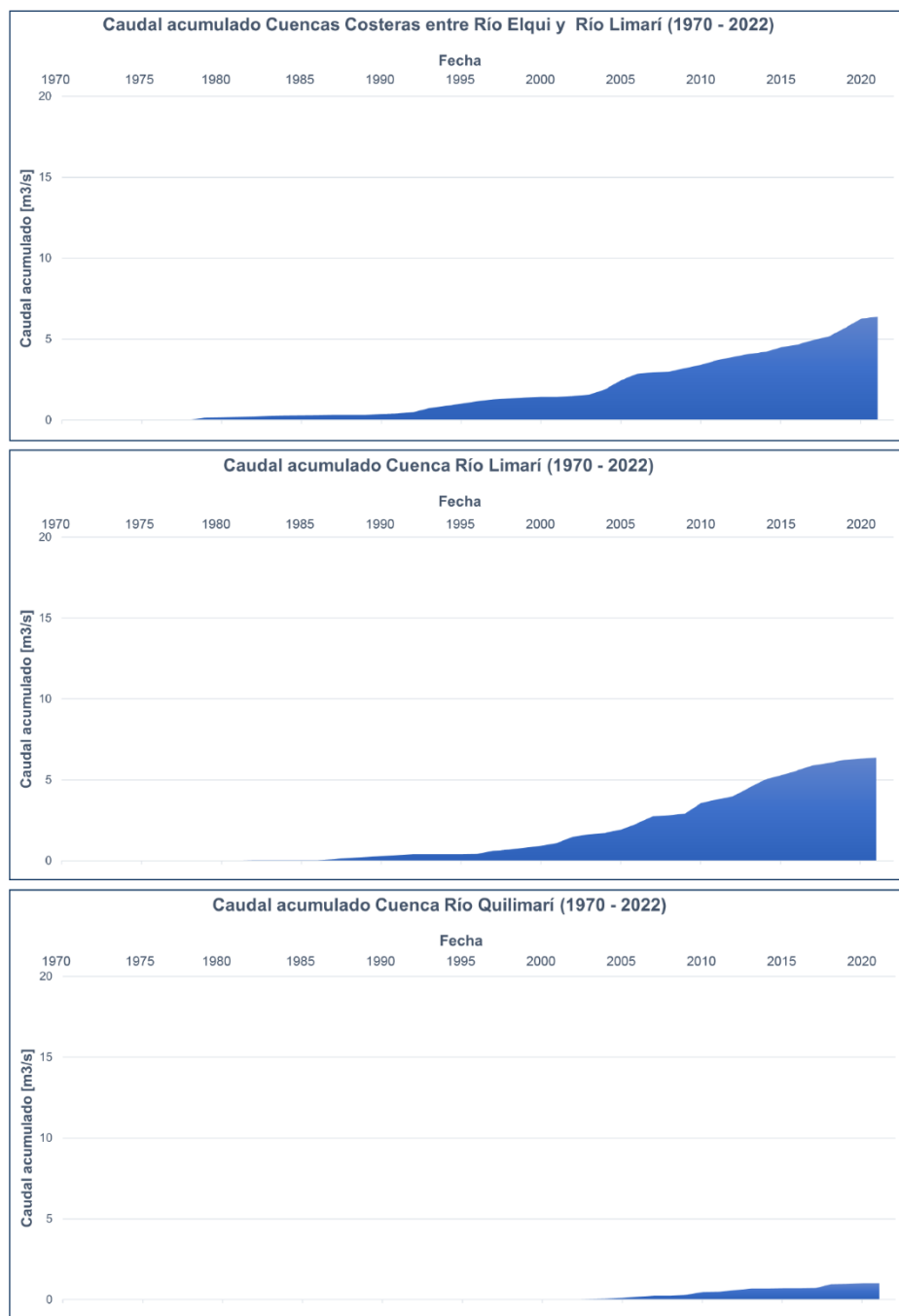


Figura 4.43: Caudal acumulado de derechos otorgados en cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí, cuenca Río Limarí y cuenca Río Quilimarí.

En los gráficos de la Figura 4.43 se observan los caudales acumulados de aguas subterráneas extraída en cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí, cuenca Río Limarí y cuenca Río Quilimarí. Desde 1980 comienza a extraerse este recurso, sin embargo, no supera 0.5 m³/s hasta 1990, época en que comienza a aumentar este valor progresivamente, alcanzando 3 m³/s

en 2005 y superando 6 m³/s en 2020. De la misma manera, en cuenca Río Limarí el caudal extraído aumentó rápidamente y en los últimos 15 años se duplicó alcanzando los 6.4 m³/s.

En la zona sur de la región, la cuenca Río Quilimarí presenta extracciones de agua subterránea desde 2005 y va aumentando gradualmente, alcanzando 1 m³/s en la actualidad. En el caso de la cuenca Río Choapa (Figura 4.44), se observa que las extracciones comenzaron en 1985 y, luego de 5 años, se observa un aumento gradual del caudal acumulado hasta 2.7 m³/s a la fecha de 2020.



Figura 4.44: Caudal acumulado de derechos otorgados en cuenca Río Choapa.

Con el fin de analizar y comparar gráficos de caudal acumulado y nivel estático en la región entre los años 1970 y 2022, son graficadas las cotas hidráulicas junto con el caudal acumulado recopilado en los derechos de agua consuntivos otorgados por la DGA en la Figura 4.45.

Condensando lo dicho hasta aquí, todas las observaciones del descenso de niveles estáticos se relacionan con el aumento de derechos de aguas subterráneas otorgados en las respectivas cuencas de la región. Por un lado, estos descensos se pueden atribuir a un origen antrópico, principalmente al aumento de extracciones para riego, uso doméstico y/o saneamiento, uso minero e industrial como se observa de los principales usos de los derechos concedidos de agua.

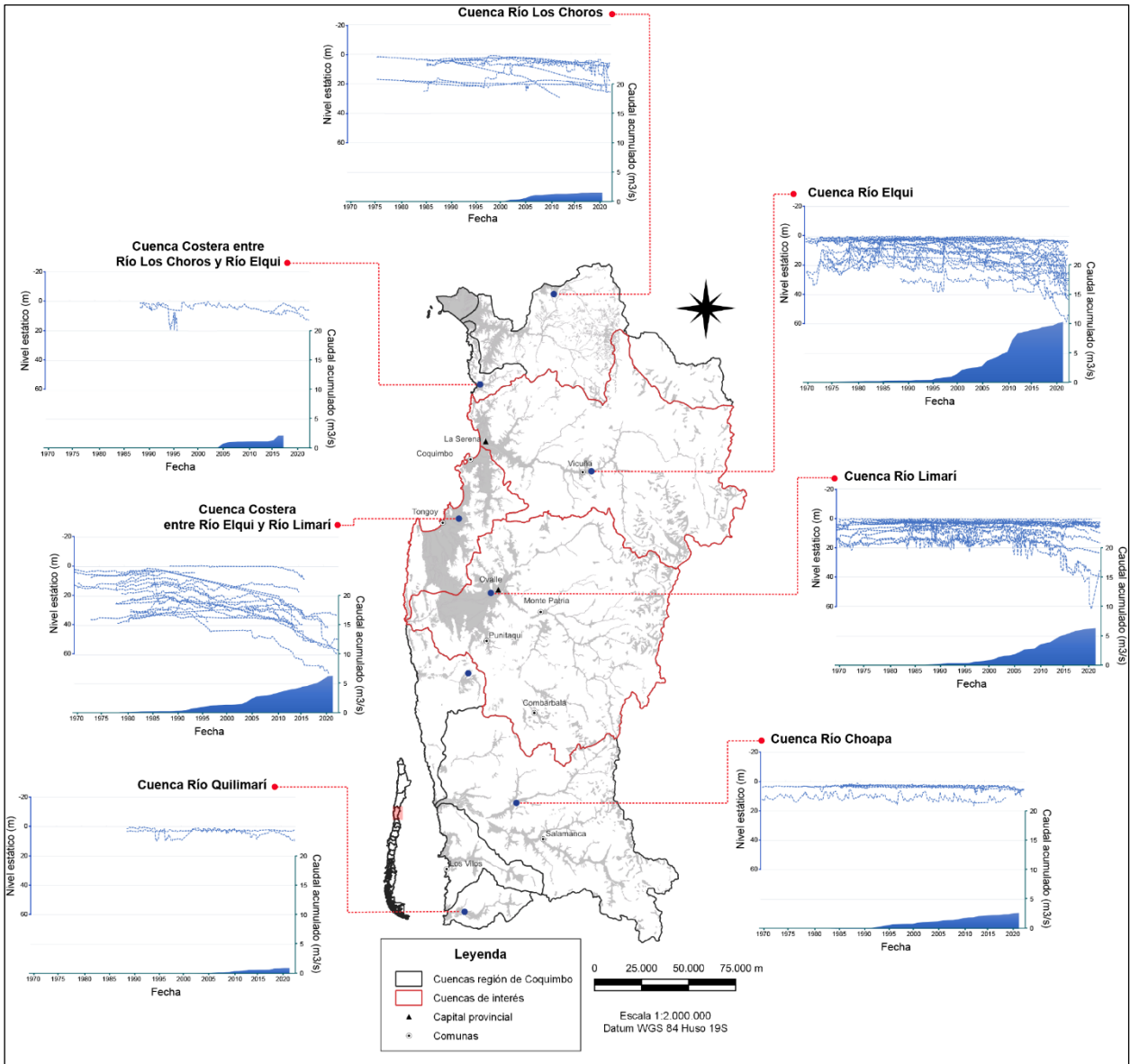


Figura 4.45: Variación niveles estáticos y derechos de aguas subterráneas otorgados en cuencas de Región de Coquimbo. Elaboración propia.

Con el fin de analizar y comparar gráficos de caudal acumulado y nivel estático en la región entre los años 1970 y 2022, son graficadas las cotas hidráulicas junto con el caudal acumulado recopilado en los derechos de agua consuntivos otorgados por la DGA en la Figura 4.45.

Se puede apreciar cómo se genera una tendencia a la baja de los niveles freáticos en las estaciones de monitoreo. Existe más de un patrón de comportamiento, pudiéndose considerar tres categorías: i) Pozos que mantienen un nivel constante o con una tasa de descenso muy baja, ii) Pozos donde el nivel desciende en forma marcada en el tiempo e iii) Pozos cuyo nivel fluctúa entre incrementos y descensos.

Las cuencas en sector norte de la región muestran una tasa de descenso baja. Los pozos en la cuenca Río Elqui, Río Limarí y entre estos 2 ríos. son los que cuentan con una mayor variación del nivel freático en los últimos 30 años, sin embargo, se encuentran cercanos a la desembocadura de los ríos principales, pudiendo deducirse que la variación generada en este tramo del acuífero se debe a algo adicional como la sobreexplotación del recurso hídrico en este sector. Los pozos ubicados principalmente en las cuencas en el sur de la región muestran una fluctuación histórica del nivel que puede relacionarse con los periodos de bajas y altas precipitaciones.

A partir del año 2000 se observa un descenso significativo. Esta tendencia es generalizada en la región y coincidente con una disminución en las precipitaciones de los últimos 20 años. Así es posible explicar en parte, que los descensos de los niveles piezométricos ocurren debido a una sequía de carácter decadal. Su origen se debe en parte a la mega sequía que está afectando la zona centro norte del país. A medida que avanzan los años, se ha visto como las precipitaciones han ido en disminución.

A modo de recapitulación, se puede señalar que todas las observaciones de descenso de niveles estáticos se relacionan con el aumento de derechos de aguas subterráneas otorgados en las respectivas cuencas de la región. Por un lado, estos descensos se pueden atribuir a un origen antrópico, principalmente al aumento de extracciones para riego, uso doméstico y/o saneamiento, uso minero e industrial como se observa de los principales usos de los derechos concedidos de agua. En los últimos 30 años se ha desarrollado una entrega de derechos de agua sin suficientes estudios de balance hídrico de los acuíferos en la región. Esto significa que la cantidad de agua proveniente de las precipitaciones no es suficiente para recargar los volúmenes que le son extraídos, por conceptos de derechos de aprovechamiento de agua, principalmente para fines de riego.

Por otro lado, esto traería consigo insuficiencia de las reservas de agua y resulta directamente proporcional a la situación de esta macrozona de Chile. Coincide con lo que ha señalado Aguilar et al. (2005) acerca de que este déficit se debe a la disminución de precipitaciones, la acumulación de nieve y por el aumento de la evaporación de agua debido a la variabilidad climática. Sin embargo, el Comité Científico COP25 señaló que los impactos de los cambios de evapotranspiración sobre la escorrentía son, en general, más débiles que los causados por los cambios en precipitación.

4.4. Hidrogeoquímica

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de análisis químicos. El objetivo es obtener antecedentes hidrogeoquímicos destinados a caracterizar las aguas subterráneas de las cuencas principales en la región. Junto con ello, se realiza un análisis de calidad de aguas, según las normas chilenas de agua potable N.Ch. 409 y de agua para riego N.Ch.1333.

Existen 175 datos de **parámetros fisicoquímicos** (Anexo C) correspondientes a pozos profundos, someros y/o norias, pozos de monitoreo de niveles de agua subterránea y provenientes de puntos de agua termal y no termal en cuencas Río Elqui, Río Limarí y cuenca costera entre estos ríos. Los puntos de muestreo se presentan en la Figura 4.47.

Se presentan aspectos de labores en terreno en la figura 4.46.



Figura 4.46: Registro de catastro hidrogeológico realizado en Abril 2022.

La distribución espacial de los pozos y afloramientos analizados se muestra en el mapa a continuación.

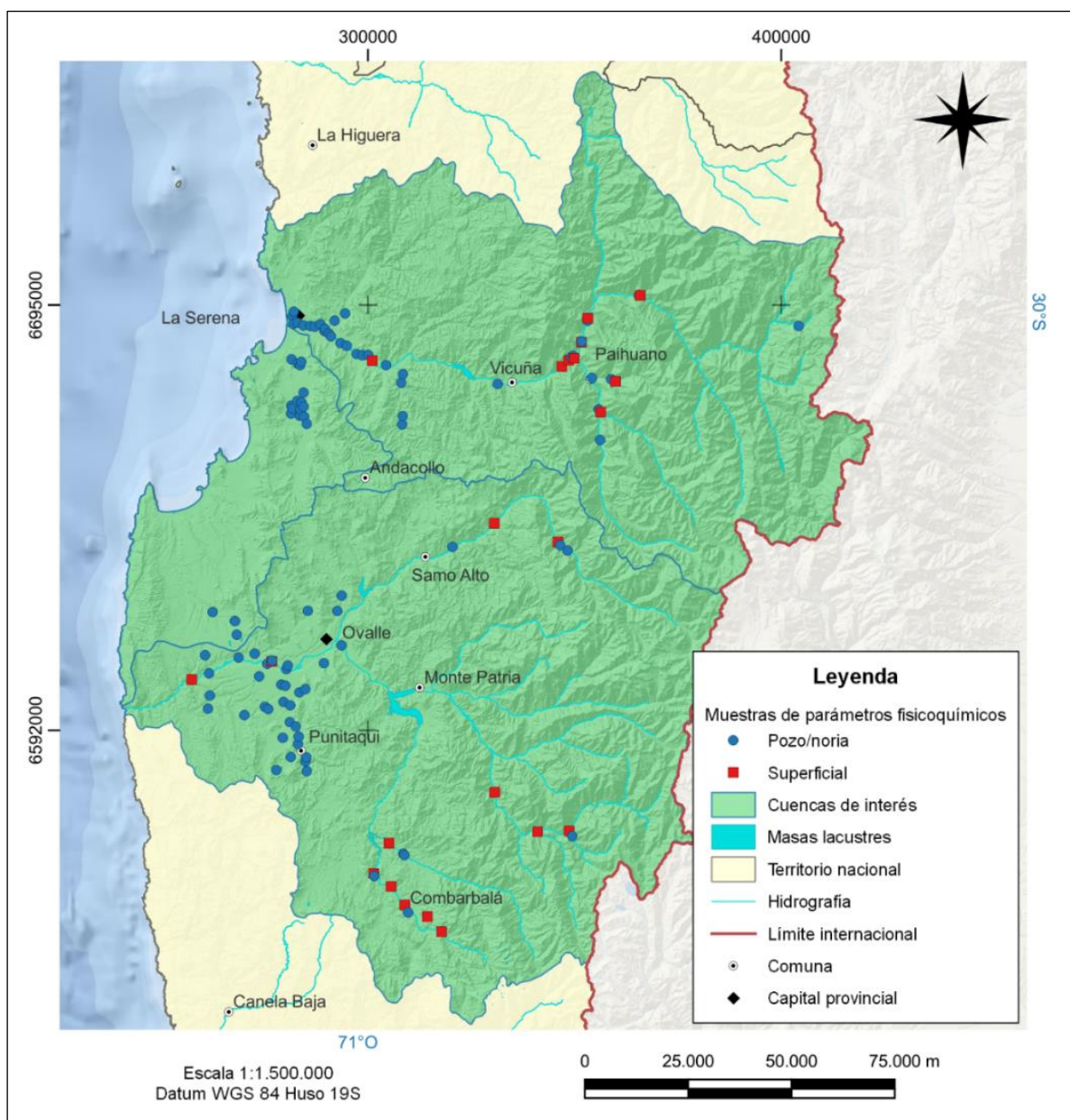


Figura 4.47: Mapa distribución puntos de información parámetros fisicoquímicos.

En la figura 4.48 se observa el diagrama de caja de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad eléctrica y temperatura de los datos recopilados.

En la Tabla 10 se presenta la distribución de valores de las muestras agrupadas de acuerdo con el tipo de fuente (superficial y subterránea), indicando las principales estadísticas. Cabe indicar que no se registraron datos de parámetros físicoquímicos para las aguas de lluvia y nieve.

Parámetros	pH	T (°C)	CE (μS/cm)
Mínimo	6,43	5,77	97,00
Cuartil 1	7,20	16,03	820,00
Cuartil 2	7,40	18,59	1342,00
Cuartil 3	7,67	20,02	2058,50
Máximo	9,30	32,50	8062,00
Media	7,45	17,65	1766,25

Tabla 10: Medidas de posición de parámetros fisicoquímicos.

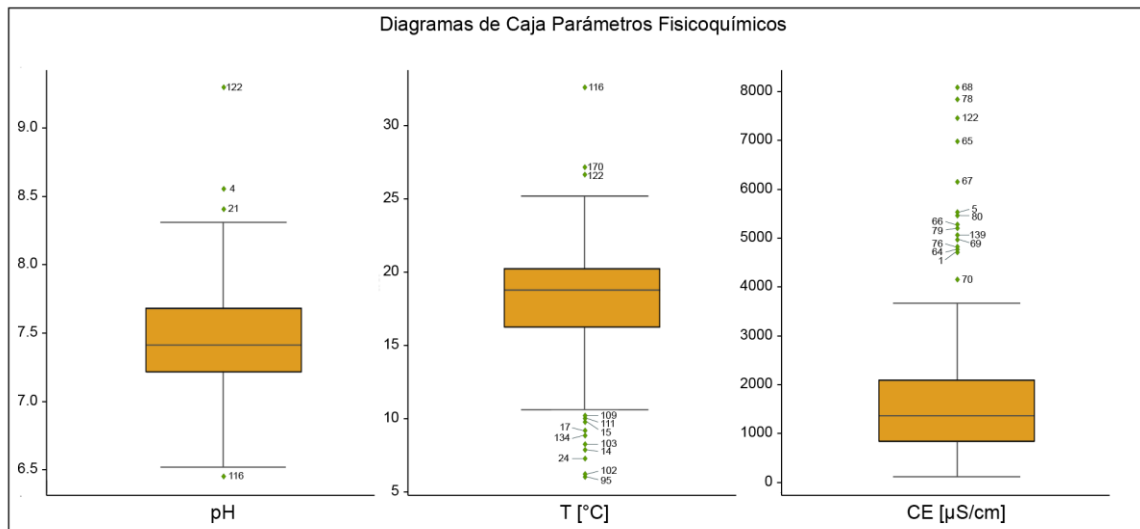


Figura 4.48: Diagramas de caja pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica.

En los diagramas de caja se observa que para los valores de pH, T y CE existe una asimetría positiva siendo la media mayor a la mediana. En el caso de la distribución de temperaturas, observamos que la media es levemente menor a la mediana.

El pH indica el grado de acidez o basicidad de una solución (según su valor sea menor o mayor a 7, respectivamente). Las aguas subterráneas del área de estudio están entre un rango de 6,4 y 9,3, y la media es 7.45, indicando un valor normal para aguas naturales subterráneas (Custodio y Llamas, 1996). No existe una clara relación de pH con la variación espacial, ya que está relacionado, en primera instancia, por la presencia de ácido carbónico (H_2CO_3) y sus varias formas disociadas, no obstante, se encuentran dentro del rango aceptable por Norma Chilena N°409 para agua potable.

Se aprecia que uno de los pozos muestreados presenta agua levemente más ácida (n°116), correspondiente a muestra de agua obtenida de termas Las Hediondas en zona alta de la cuenca Río Elqui, pudiendo ser consecuencia de los equilibrios que se establecen por la presencia del ácido sulfhídrico y sus derivados de oxidación como sulfatos y sulfitos (Moreno et al. 2007), a partir de la lixiviación de la pirita existente en los cuerpos mineralizados de la franja metalogénica. Las muestras con valores más básicos, alcanzando un pH de 9.3, corresponden a pozos en sector

costero de uso agrícola (n°4 y 21) y a una muestra de agua subterránea tomada desde las termas de Socos (n°122).

Los valores de conductividad eléctrica son relativamente altos en la región. Casi el 25% de las muestras analizadas corresponden a valores menores a 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo cual en la Norma N°1333 para agua de riego, estas aguas no presentarían efectos perjudiciales. Sin embargo, el resto de las muestras presentan un mayor valor de conductividad eléctrica, generando efectos perjudiciales en cultivos y requieren métodos de manejo cuidadoso. El máximo es 8062 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en muestra de pozo de monitoreo en cuenca costera y la conductividad eléctrica promedio en la región corresponde a 1766.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Temperatura de agua subterránea responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar, incrementado en el producto de la profundidad por el gradiente geotérmico. Los valores obtenidos de temperatura promedian los 17.7°C. Muestra de agua tomada desde río Hurtado en la localidad de Las Breas presenta la temperatura mínima de 5.8°C y muestra de agua obtenida de termas de Socos y de termas Las Hediondas presentan las temperaturas máximas de 26.5° C y 32.5°C, respectivamente. El rango de temperatura del agua subterránea varía entre 9.8 °C y 18.6 °C.

Existen 72 **muestras hidroquímicas** expuestas en Anexo D (elementos mayoritarios y traza) correspondientes a expedientes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la región de Coquimbo, red de monitoreo de aguas DGA de la región y plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Choapa, Limarí y Elqui (DGA, 2020). 27 de estos datos son obtenidos de muestras tomadas en labores de terreno. Los puntos de muestreo se presentan en la Figura 4.50.

Se presentan aspectos de labores en terreno en la figura 4.49.



Figura 4.49: Toma de muestras hidroquímicas campaña de terreno.

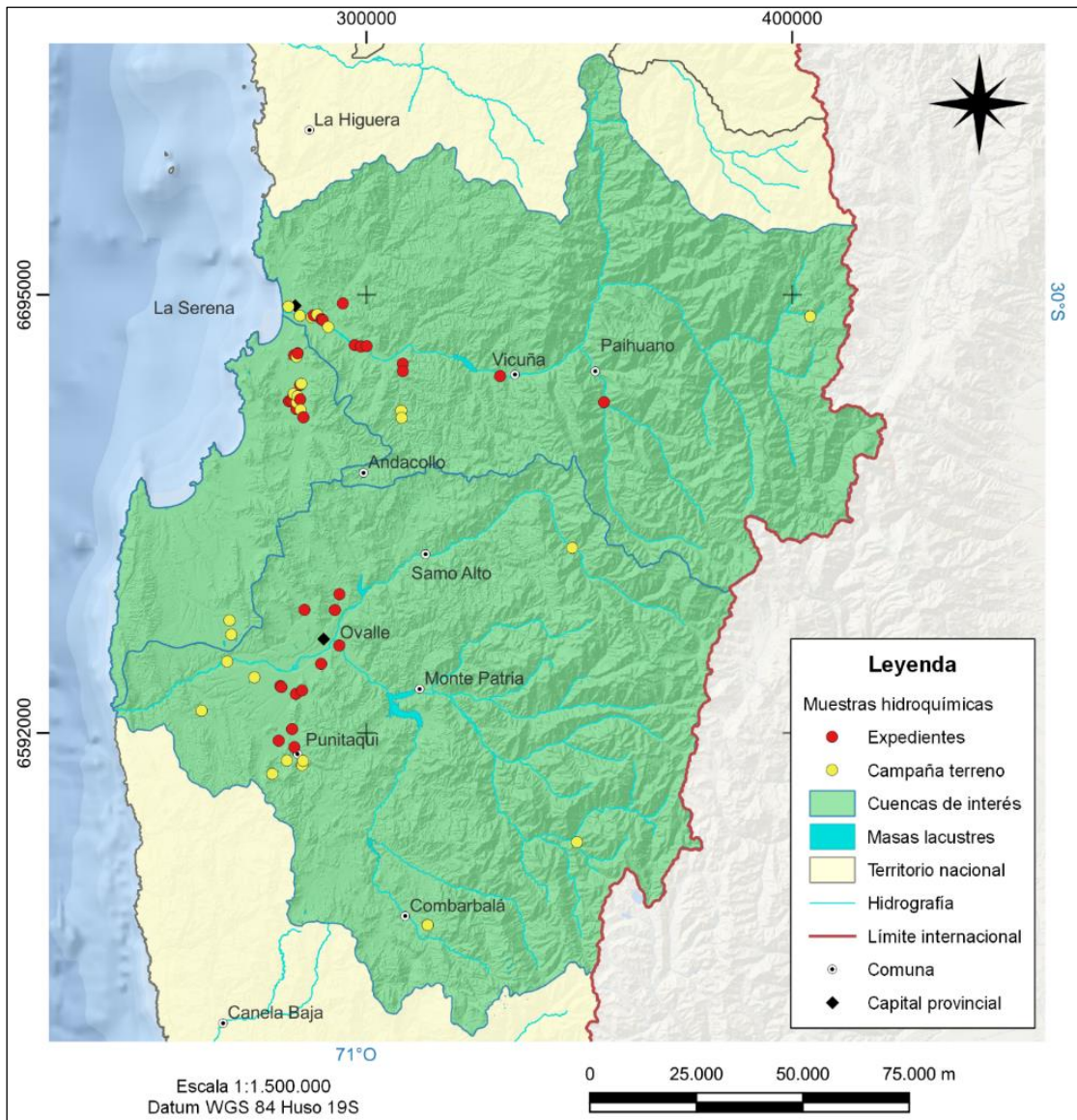


Figura 4.50: Mapa distribución muestras hidroquímicas expedientes DGA y obtenidas en campaña de terreno de proyecto (DGA, 2022) en cuencas de interés.

Para evaluar la confiabilidad de los análisis realizados de aguas se calcula el balance de cargas. La condición de electroneutralidad del agua indica que la suma de miliequivalentes de aniones es igual a la suma de miliequivalentes de cationes (Custodio y Llamas, 1976) y, para ello, se calcula el error de balance según la siguiente fórmula.

$$EB = \frac{\sum \text{aniones} - \text{cationes}}{\sum \text{aniones} + \text{cationes}} \cdot 100$$

El control de calidad se realizó a las concentraciones entregadas por SGS de los iones mayoritarios. El rango de error aceptable de un análisis químico depende del tipo de agua y su concentración o conductividad eléctrica, valor que, en este trabajo, se ha fijado en 10%.

ID	Muestra	Cl- (meq/L)	SO42- (meq/L)	HCO3- (meq/L)	NO3- (meq/L)	Na+ (meq/L)	K+ (meq/L)	Ca2+ (meq/L)	Mg2+ (meq/L)	Suma aniones (meq/L)	Suma cationes (meq/L)	Balance iónico (%)
1	APF2	10,03	9,44	5,07	0,17	9,37	0,43	9,11	4,46	24,54	23,36	2,47
2	APF4	8,98	9,69	5,62	0,17	6,18	0,15	14,12	4,97	24,29	25,42	2,28
3	APF7	1,58	5,86	4,80	0,30	2,99	0,09	7,59	2,18	12,24	12,85	2,45
4	APF10	3,15	4,89	5,74	0,26	8,91	0,07	4,70	2,35	13,79	16,03	7,53
5	APF13	1,19	4,75	4,40	0,55	6,12	0,09	3,76	1,58	10,34	11,56	5,55
6	APF31	4,60	15,52	3,96	0,00	4,70	0,05	13,30	5,98	24,09	24,04	0,10
7	APF33	7,18	18,13	3,11	0,17	4,89	0,05	15,30	7,72	28,42	27,96	0,81
8	APF49	2,39	4,47	4,32	0,60	7,97	0,11	3,58	2,15	11,17	13,81	10,57
9	APF50	12,89	2,70	4,59	0,50	4,46	0,07	11,29	6,94	20,18	22,76	6,02
10	APF52	6,40	4,82	5,80	0,64	4,02	0,06	9,11	6,24	17,01	19,42	6,61
11	APF54	16,83	8,40	5,73	0,30	7,63	0,07	15,44	10,36	30,96	33,51	3,95
12	APF56	2,06	5,18	7,63	0,32	5,91	0,06	6,50	3,84	14,87	16,30	4,61
13	APF61	5,43	2,51	4,83	0,12	3,53	0,05	6,43	4,25	12,78	14,26	5,49
14	APF71	4,27	3,83	4,35	0,27	7,06	0,06	3,53	2,47	12,46	13,12	2,59
15	APF78	60,41	16,47	2,82	0,40	40,88	0,03	36,64	4,26	79,70	81,82	1,31
16	APF84	19,62	10,12	5,22	0,02	13,36	0,08	14,46	7,36	34,96	35,26	0,42
17	APF89	2,18	2,34	3,48		3,14	0,07	3,13	1,70	8,01	8,04	0,22
18	APF90	1,07	3,30	3,82	0,08	2,76	0,13	3,77	2,04	8,19	8,70	3,01
19	APF91	1,86	3,00	3,91		1,70	0,01	3,40	3,78	8,77	8,88	0,65
20	APF92	2,41	1,16	8,23	0,01	3,18	0,02	4,58	4,68	11,80	12,46	2,73
21	APF105	1,71	1,48	2,96	0,20	2,64		2,30	1,64	6,15	6,58	3,39
22	APF117	0,34	34,00	3,69		5,27	0,27	24,59	4,91	38,03	35,03	4,10
23	APF119	9,36	3,20	7,78	0,13	17,45	0,08	2,51	2,03	20,33	22,07	4,09
24	APF120	7,85	1,93	5,06		5,13	0,03	4,47	5,95	14,84	15,58	2,44
25	APF123	12,23	1,91			10,13	0,03	3,25	0,02	14,14	13,42	2,60
26	APF135	0,33	2,66	0,88	0,01	0,52	0,03	2,58	0,56	3,86	3,69	2,28
27	APF136	0,10	0,70	3,46	0,18	0,41		3,55	0,50	4,25	4,47	2,47

Tabla 11: Balance iónico de resultados análisis muestras hidroquímicas.

En la Tabla 11 se presentan los balances iónicos resultantes. Del total de muestras analizadas, 21 presentan un $|EB| > 5\%$ y 6 presentan un $|EB|$ menor o cercano 10% como es el caso de muestra APF 49, por lo que todas las muestras se incluyen en el análisis de resultados, junto a los datos recopilados de los expedientes otorgados por la DGA (Anexo D). Estos últimos no se incluyen en el balance iónico al no presentar información de todos estos iones.

En la figura 4.51 se observa el diagrama de caja de los elementos mayoritarios de los datos recopilados en las cuencas principales.

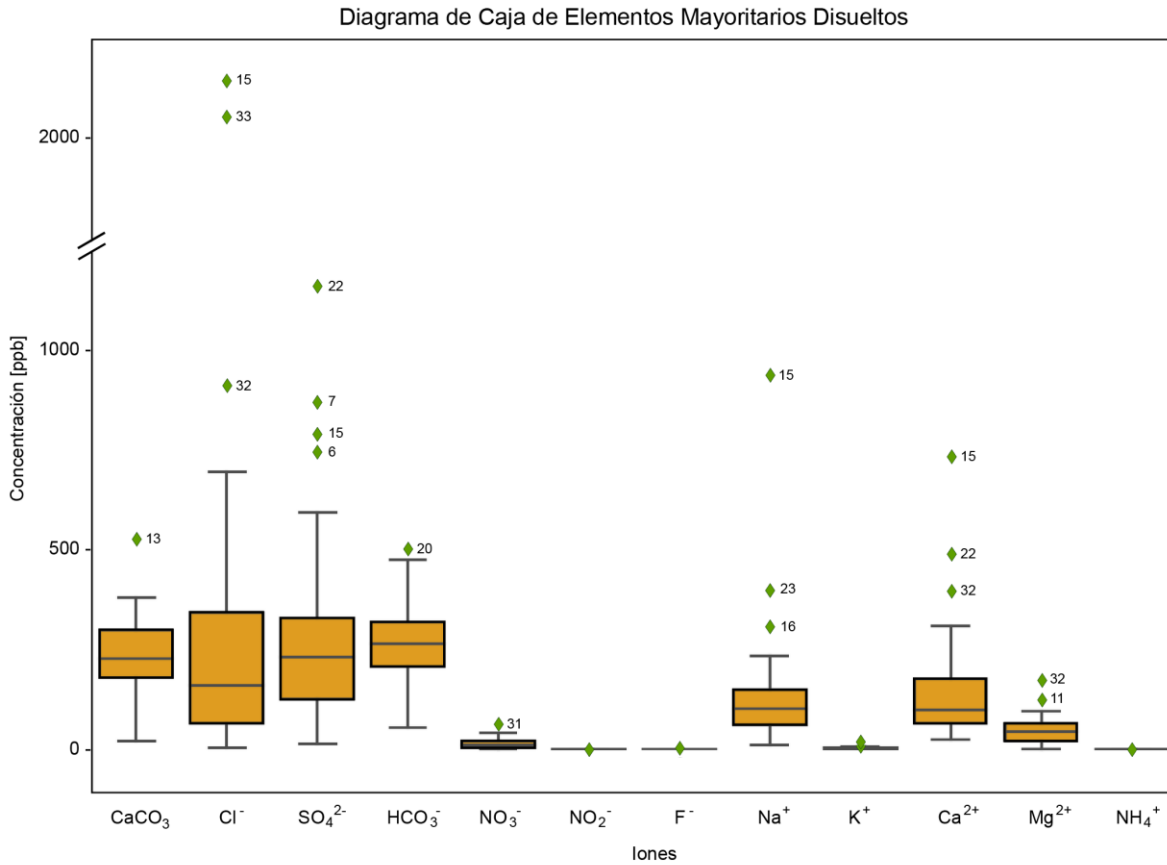


Figura 4.51: Diagrama de caja de elementos mayoritarios obtenidos de muestras hidroquímicas.

En el diagrama de caja anterior se observa que la concentración de los elementos posee en general una asimetría positiva. La mediana se encuentra desplazada con respecto al centro de la caja, presentando una cola de valores más altos que el propio valor medio. Iones cloruro, sulfatos, sodio y calcio son las variables con más valores atípicos.

En iones Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺ y Ca²⁺ se observa la presencia de 2 datos atípicos repetitivos en común, los cuales corresponden a pozo ubicado en comuna de Coquimbo, de Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios S.A. (n°15) y pozo en compañía Pisquera de Chile al suroeste de Ovalle (n°32).

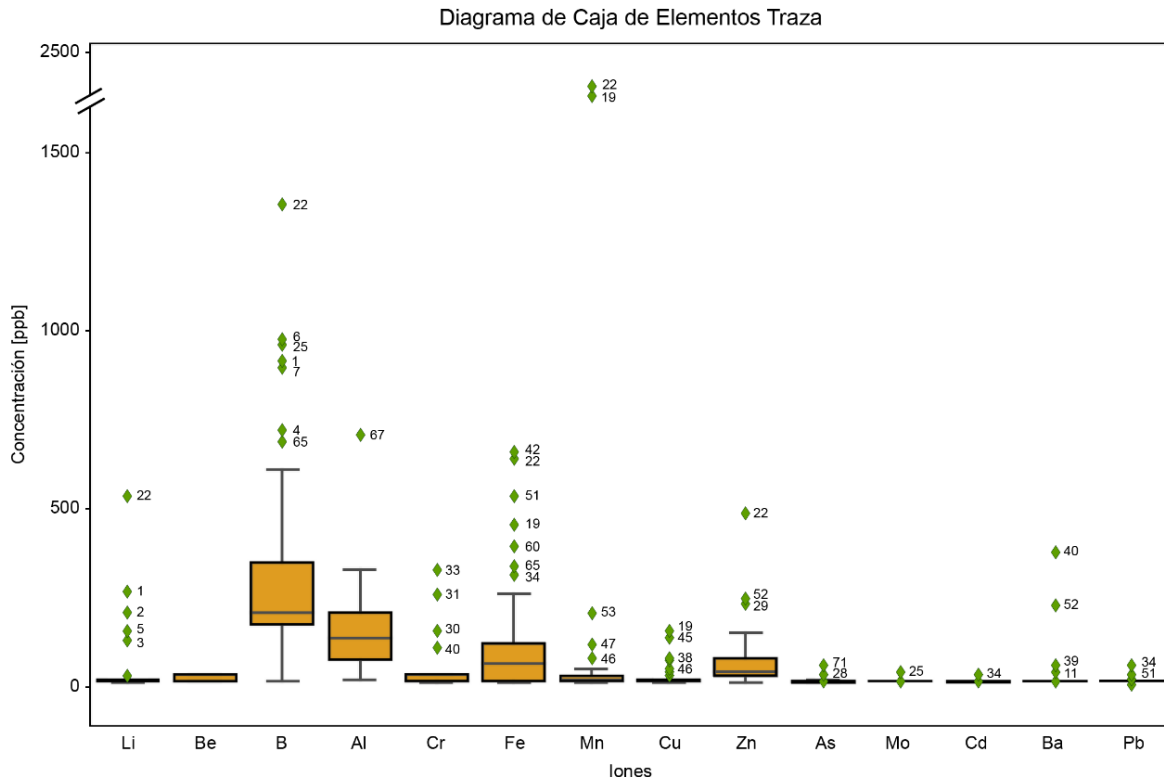


Figura 4.52: Diagrama de caja de elementos traza obtenidos de muestras hidroquímicas.

De acuerdo con los elementos traza analizados, las variables con mayor número de valores atípicos son litio, boro, cromo, hierro, manganeso, cobre, zinc y bario. Se observa la presencia de un dato atípico repetitivo en las diversas concentraciones, el cual corresponde a muestra de termas Las Hediondas en la zona alta de la cuenca Río Elqui (n° 22).

La clasificación química de las aguas subterráneas analizadas se realizó en cada cuenca de interés mediante el uso de diagramas Piper, que representa un número ilimitado de muestras en un mismo gráfico lo que, en una determinada área, proporciona una visión global de las distintas composiciones de agua existentes. Las proporciones relativas de cationes y aniones son representadas en dos diagramas triangulares, y son proyectadas en un diagrama en forma de rombo que muestra la relación entre los aniones y cationes en conjunto.

Cada muestra posee un mismo símbolo en cada uno de los diagramas. Así, los tres símbolos, uno en cada triángulo y otro en el rombo, indican la concentración relativa de los iones disueltos mayoritarios constituyentes del agua natural y esto determina la denominación de un agua en cuanto a su composición.

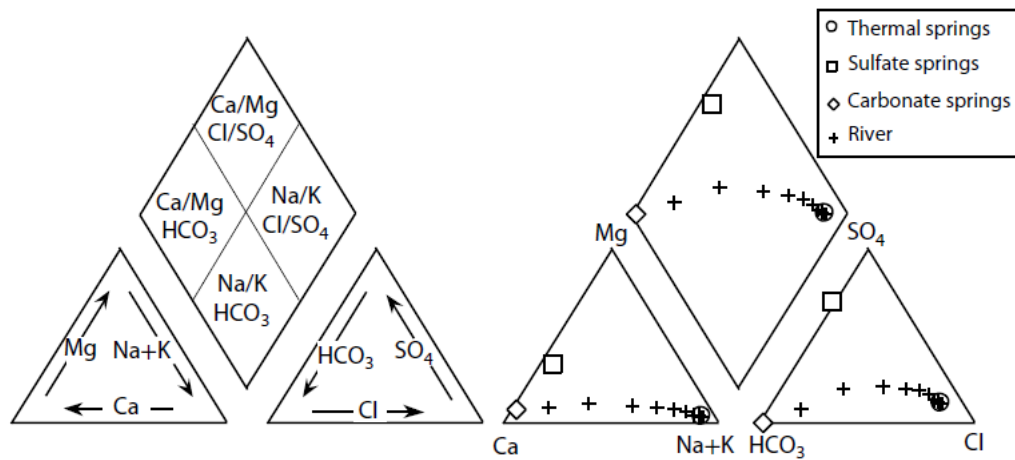


Figura 4.53: Diagrama trilineal de Piper que muestra facies geoquímicas. Diagrama a la derecha corresponde a datos de ejemplo (Clark, 2015).

Los diagramas de Stiff son otra herramienta para caracterizar aguas. Consisten en cuatro rectas paralelas igualmente espaciadas, cortadas por una normal central, que separa los campos de cationes y aniones. Sobre cada recta horizontal se toma un segmento proporcional a los meq/l del ión correspondiente y se unen los extremos, dando origen a un polígono.

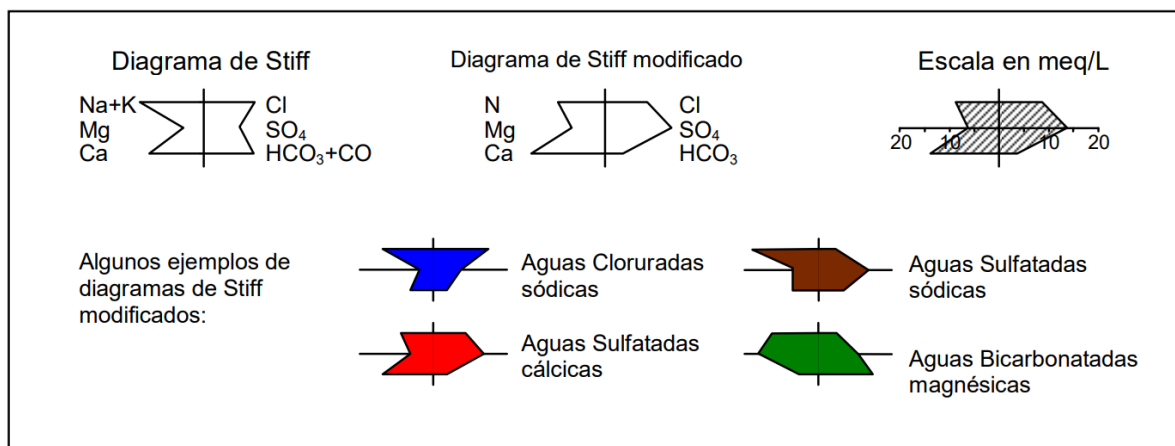


Figura 4.54: Diagramas Stiff.

Se presenta el análisis e interpretación de los datos con la utilización de las técnicas anteriores en la cuenca de Río Elqui, Río Limarí y en cuenca costera entre estos dos ríos.

4.4.1. Cuenca Río Elqui

Las variaciones en parámetros fisicoquímicos en la cuenca Río Elqui se pueden observar espacialmente en las figuras 4.55 - 4.57.

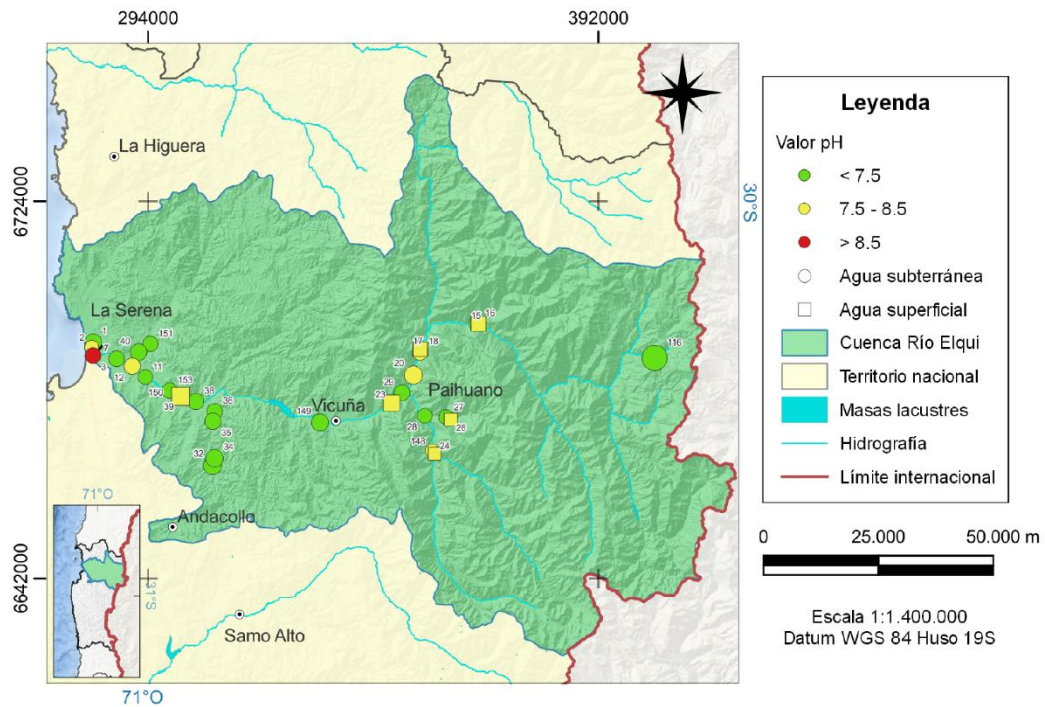


Figura 4.55: Distribución espacial pH dentro de la cuenca de Río Elqui.

Los valores obtenidos de pH se comparan con la Norma Chilena N°409 para agua potable. Se observa en la figura 4.55 su distribución espacial, donde los valores en datos de agua superficial en río Claro y río Turbio como en río Elqui se mantienen dentro del rango 7.5 y 8.5. Las muestras de agua subterránea se encuentran generalmente neutras a levemente básicas a lo largo de toda la cuenca. Un solo punto en el límite de la cuenca, tramo bajo de río Elqui, presenta un valor alcalino de 8.6, posiblemente como consecuencia de intrusión salina.

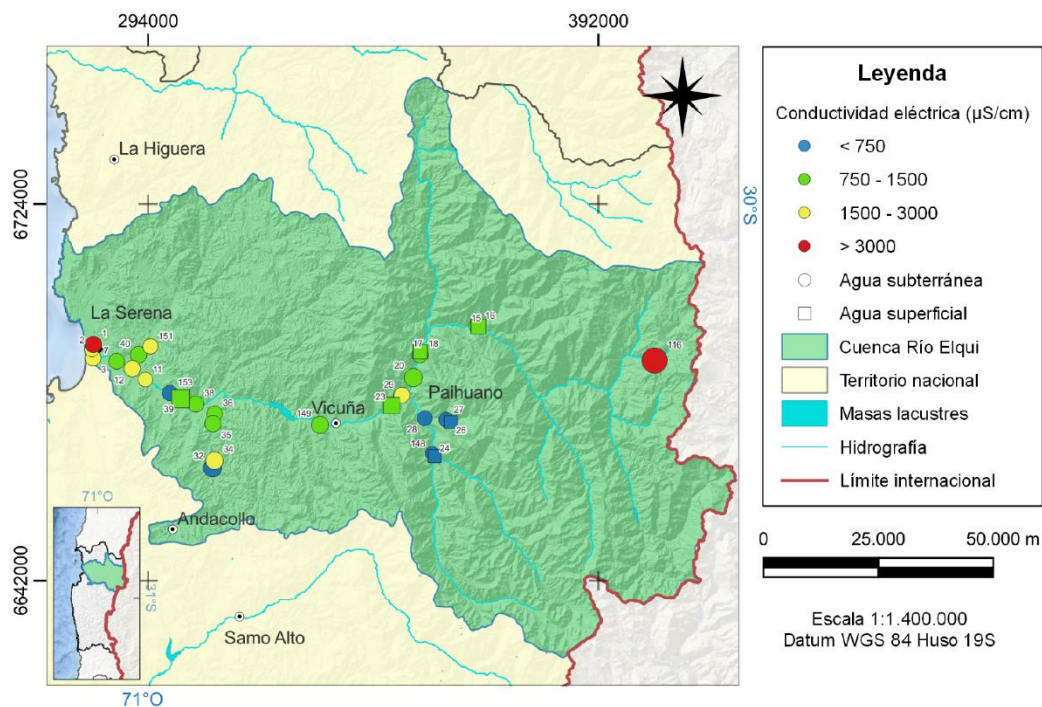


Figura 4.56: Distribución espacial Conductividad Eléctrica dentro de la cuenca de Río Elqui.

La conductividad eléctrica presenta gran variación en sus valores, ya que se encuentran entre 97 y 8062 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Al observar el mapa de distribución, se ve que los valores menores se encuentran en zona alta y quebradas en la sección sur de la cuenca, incrementándose hacia tramo bajo. Las mayores conductividades, superiores a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se encuentran puntualmente en los límites oeste y este de la zona. Estas estaciones corresponden a un pozo para el riego (n°1) y muestra de termas Las Hediondas (n°116), respectivamente.

Por lo tanto, la conductividad aumentaría en el sentido del movimiento de las aguas subterráneas, asociado a un aumento de la salinidad en su recorrido hacia las zonas de menor elevación, ya sea por tiempo de residencia y tránsito de aguas en el acuífero o percolación de sales en sectores agrícolas predominantes en esta parte de la región. En el caso de esta cuenca, estos valores comienzan a aumentar aguas abajo de la localidad de Vicuña.

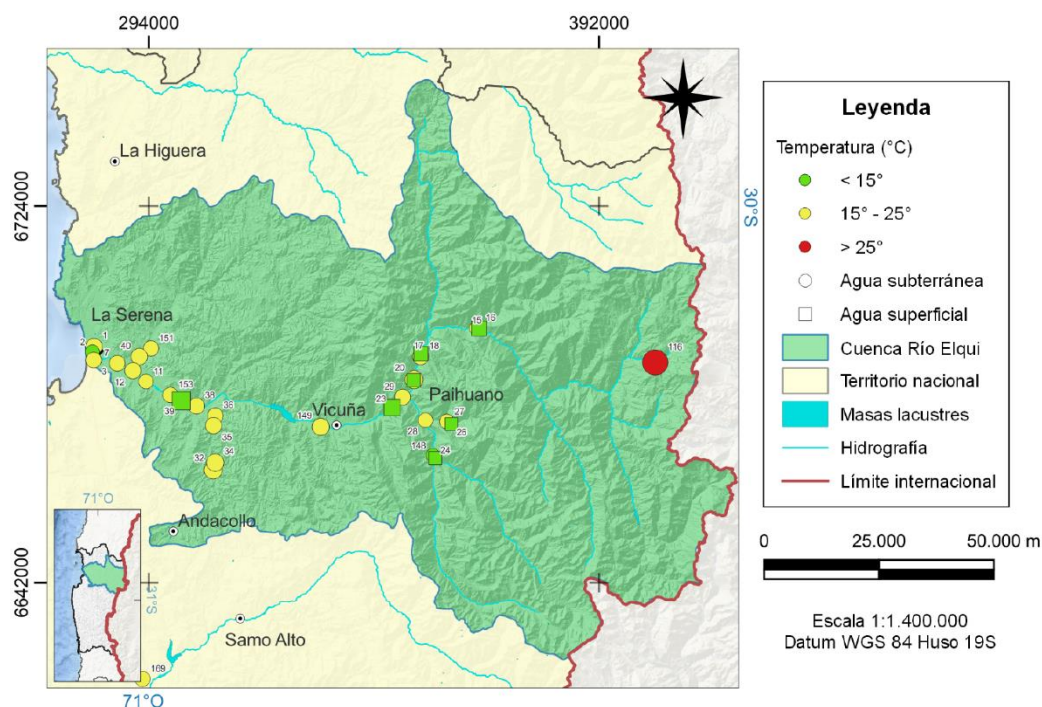


Figura 4.57: Distribución espacial Temperatura dentro de la cuenca de Río Elqui.

Para el caso de la temperatura se aprecia que su valor en aguas subterráneas va desde los 15°C a los 25°C principalmente, siendo una excepción la muestra n°116 en la zona este que alcanza los 32.5°C, correspondiente a agua termal. Esta última es lo esperado por la naturaleza de la muestra.

En aguas superficiales las temperaturas son menores a 15°C a lo largo de los cauces principales, influenciadas por la temperatura del aire y la radiación solar característica en la región y de acuerdo con la estación en la que se tomó la muestra (junio de 2022).

Las variaciones en elementos mayoritarios en la cuenca Río Elqui se pueden observar espacialmente en las figuras 4.58 - 4.60. A continuación, la distribución de aniones Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NH_3^- a lo largo de la cuenca.

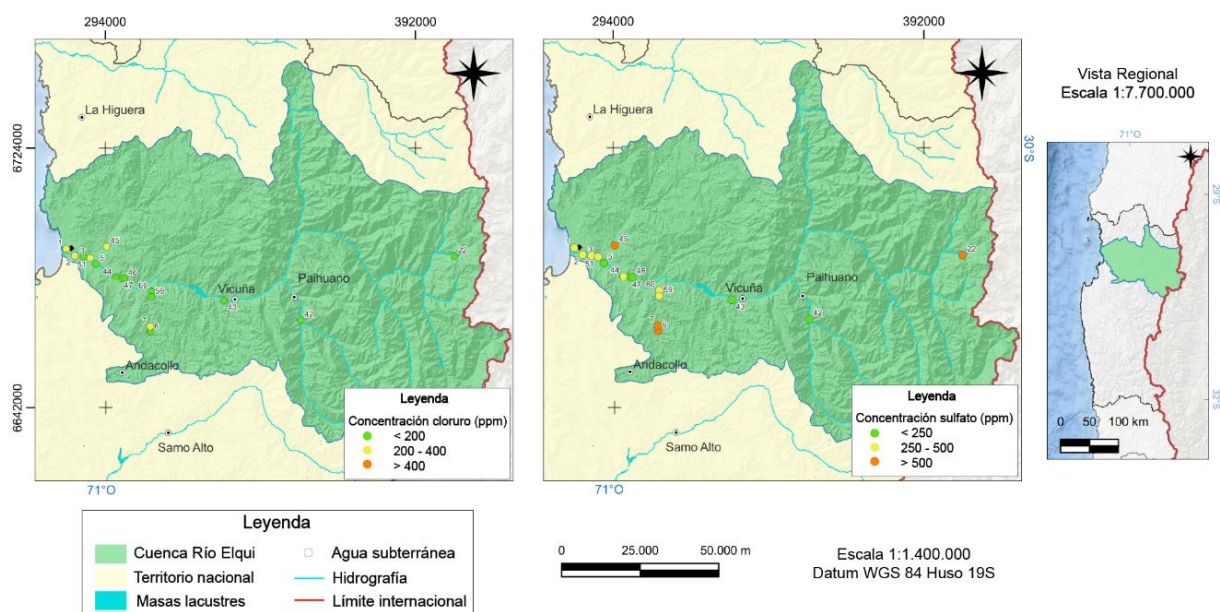


Figura 4.58: Distribución espacial Cloruro y Sulfato en cuenca Río Elqui.

Se observa que la distribución espacial de **cloruro** aumenta hacia las zonas más bajas de la cuenca. Los pozos ubicados aguas abajo en río Elqui se encuentran en el rango 200 y 400 ppm. La presencia de este elemento en zona alta se debe a la litología de la zona, compuesta principalmente por formaciones geológicas intrusivas del período Carbonífero-Pérmico, como también el aporte de aguas hidrotermales procedentes de Baños del Toro.

El aumento de su concentración hacia la parte baja de la cuenca responde a la distribución natural del ión cloruro por factores tales como las aguas de lluvia que en sectores costeros presentan valores más altos que en zonas continentales, la cual se concentra en el terreno y se infiltra llegando al acuífero aumentando el contenido de cloruro en las aguas más maduras.

La concentración de **sulfato** en los pozos en la parte central de la cuenca cerca de curso de río principal se encuentra dentro del rango aceptable para agua de riego y agua potable según normas NCH N°1.333 y NCH N°409, respectivamente. Estos valores van en aumento progresivo hacia el oeste. Las muestras n°6, 7, 22 y 45 superan los 500 ppm. Las tres primeras muestras corresponden a pozos utilizados para actividades agrícolas y muestra n°22 es agua termal.

Las altas concentraciones son atribuibles a contaminación por actividad antrópica principalmente y la alteración hidrotermal en secuencias de rocas volcano-sedimentarias continentales del Jurásico Medio Superior que afectó la química del agua. La presencia de la franja metalogénica es una fuente natural que entrega sulfatos y metales en solución a la cuenca, por las lixiviaciones superficiales y subterráneas de vetas mineralizadas.

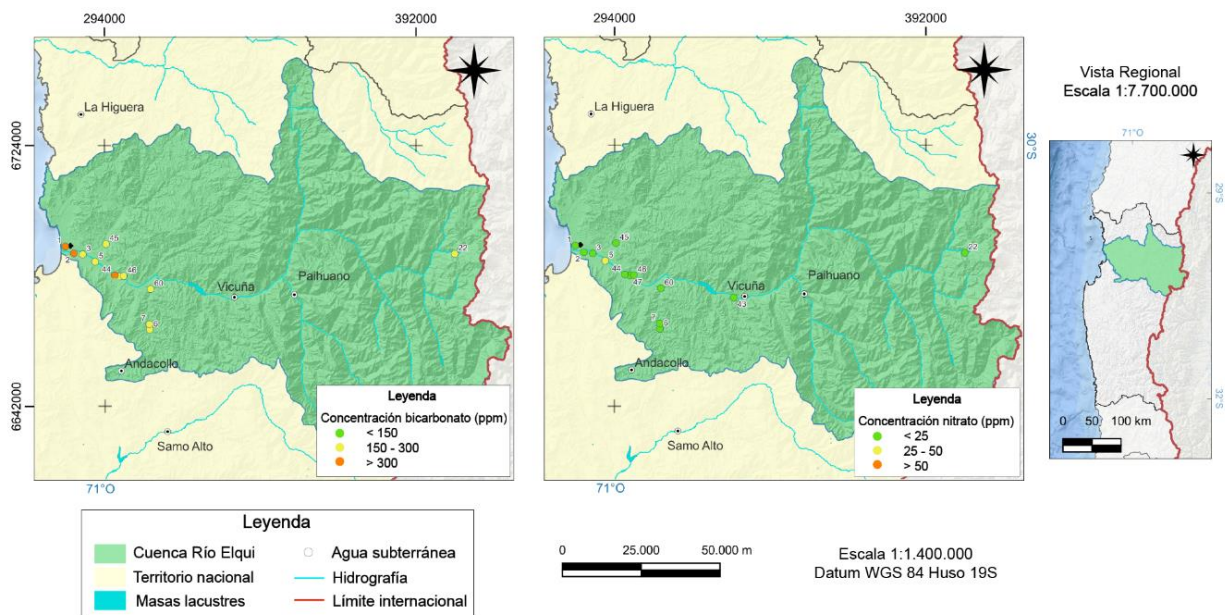


Figura 4.59: Distribución espacial Bicarbonato y Nitrato en cuenca Río Elqui.

En el caso de las aguas estudiadas, se observan mayores concentraciones de **bicarbonato** en muestras ubicadas en la parte baja de la cuenca, en sector de la ciudad de La Serena (300 ppm). Las partes más altas se encuentran entre el rango 150 y 300 ppm. Posiblemente, las fuentes de bicarbonato corresponden a hidrólisis de silicatos ayudada por el CO_2 y la disolución del CO_2 atmosférico y del suelo (Custodio y Llamas, 1983) debido a que la litología presente.

Las concentraciones de **nitrato** en la cuenca están en niveles bajo los 25 ppm a excepción de la muestra n°5 que alcanza 34 ppm. Están dentro del rango normativo en agua potable, sin embargo, los niveles naturales de nitratos en aguas subterráneas son generalmente muy bajas (típicamente menor a 10 mg/L NO_3), pero pueden crecer a causa de actividades humanas, como la agricultura, industria, efluentes domésticos, etc. La muestra mencionada corresponde a un pozo para uso industrial y, al superar los 30 ppm, compromete el uso potable del agua.

A continuación, se presentan la distribución de cationes a lo largo de la cuenca.

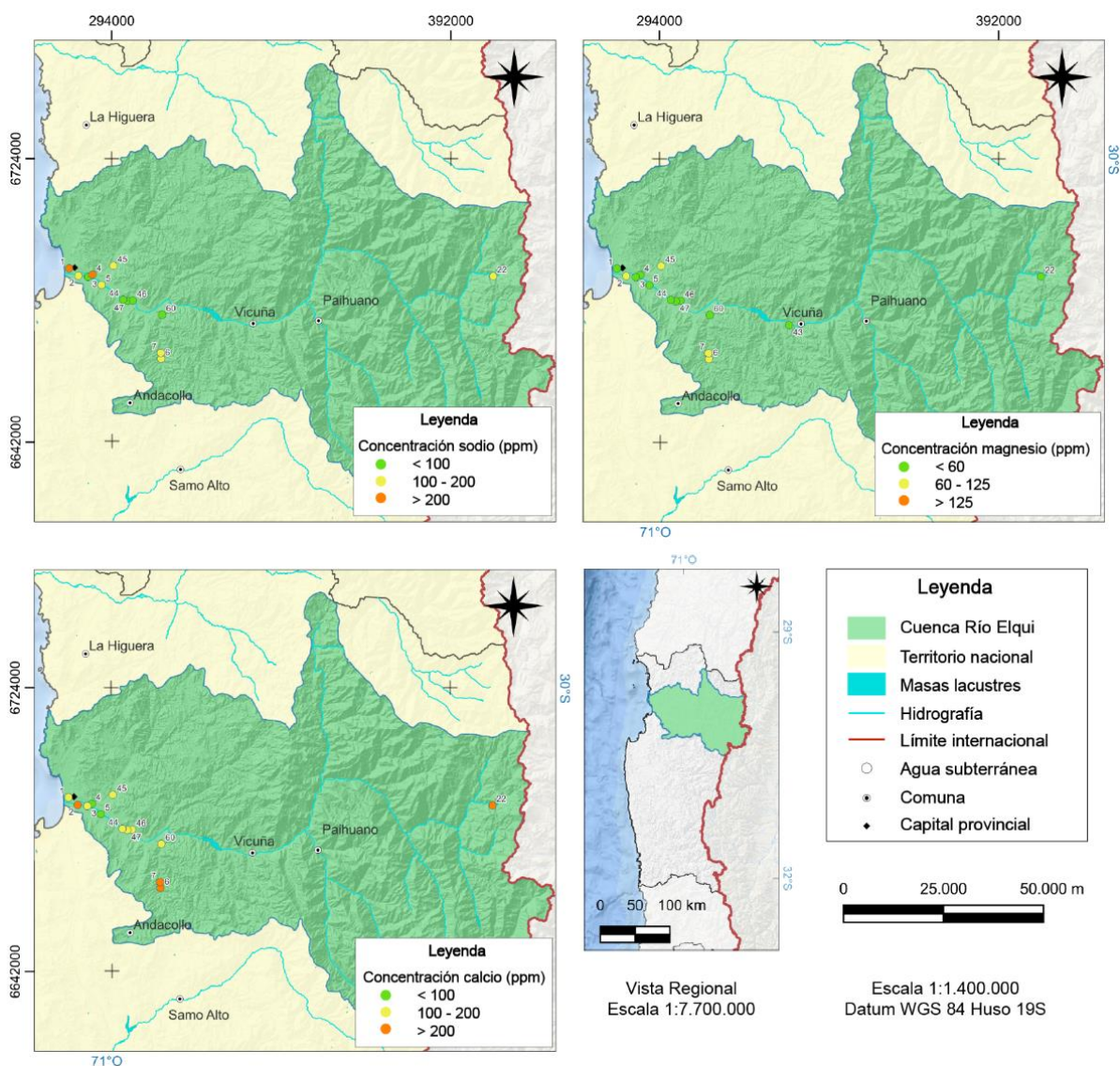


Figura 4.60: Distribución espacial Sodio, Magnesio y Calcio en cuenca Río Elqui.

Las concentraciones de **sodio** se encuentran en el rango 100 y 200 ppm, a excepción de dos muestras que alcanzan los 215 ppm en el tramo bajo de río Elqui, correspondientes a noria utilizada para riego agrícola y pozo APR El Islón. Este catión posiblemente proviene de ataque de feldespatos, feldespatoides y otros silicatos de las rocas ígneas intrusivas y disolución de rocas sedimentarias marinas que afloran en la zona (Custodio y Llamas, 1983). Una razón puede ser la mezcla con agua de mar tanto por fenómenos de intrusión en acuíferos costeros como por infiltración del agua de lluvia.

El **magnesio** se mantiene bajo 60 ppm a lo largo de la cuenca y alcanza 93 ppm en sector de Quebrada Arrayán y en sectores más bajos en el tramo bajo de río Elqui en pozos utilizados para actividades agrícolas. Su concentración en la cuenca posiblemente proviene de la disolución de la mayoría de los suelos y rocas (especialmente de las dolomías) y de la alteración de silicatos ferromagnesianos. Otra fuente de origen puede ser mezcla con agua de mar en sector costero.

La concentración de **calcio** generalmente se mantiene entre 100 y 200 ppm en el tramo bajo de la cuenca, pero en zona alta alcanza un valor de 490 ppm correspondiente a muestra de

agua termal. Hay excepciones también en pozos agrícolas en Quebrada El Arrayán. Las concentraciones de este ión en aguas subterráneas posiblemente tienen origen en rocas ígneas, principalmente basaltos y riolitas, por el ataque a los minerales del grupo de los feldspatos y plagioclasas (unidad PzsTrg en zona alta, por ejemplo) así como resultado de la disolución de rocas calcáreas (unidad Jskivsm en zona baja).

Las variaciones en elementos minoritarios en la cuenca Río Elqui se pueden observar espacialmente en Figura 4.61 - 4.64.

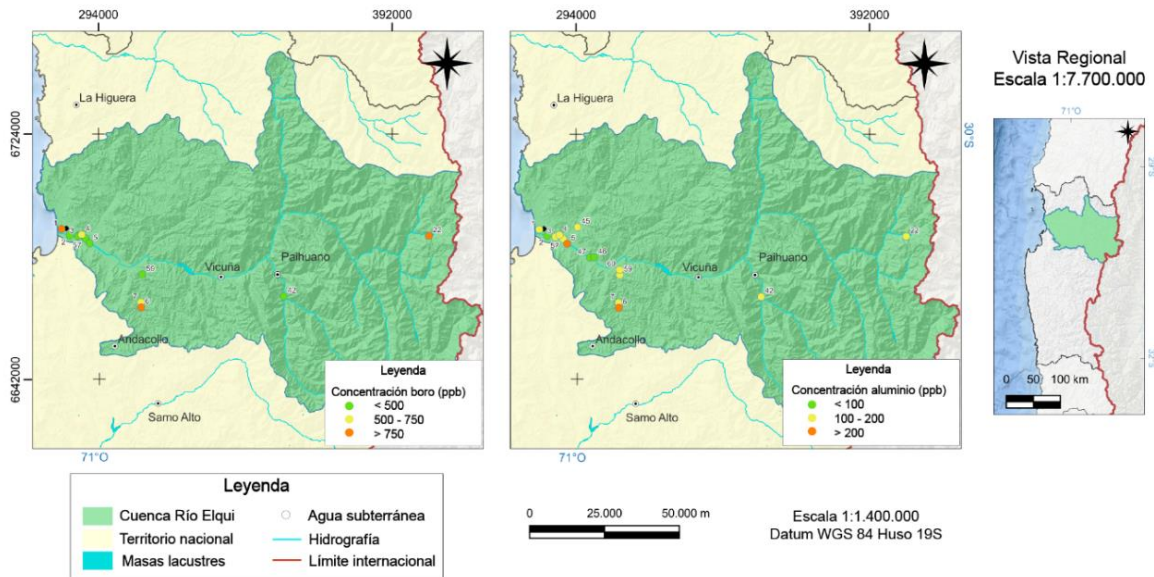


Figura 4.61: Distribución espacial concentración Boro y Aluminio en cuenca Río Elqui.

Las concentraciones de **boro** se encuentran bajo las 500 ppb, existiendo tres muestras que superan 750 ppb, y se encuentran alejadas espacialmente dentro de la cuenca. La muestra más al este, n°22, corresponde a agua proveniente de Termas Las Hediondas. Muestras n°1 y n°6 ubicadas en zonas más bajas de la cuenca, corresponden a pozos usados para actividades agrícolas. Proviene de la disolución de suelos y rocas volcánicas ya que pueden contener concentraciones de boro importantes.

Aluminio está presente entre 100 y 200 ppb a lo largo de la región. Las muestras n°5 y n°6, las mismas que presentan alta concentración de sodio, alcanzan 240 ppb de este elemento minoritario. Una alta concentración puede provenir de los minerales aluminio-silicatados e insolubles, abundantes en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias y como un resultado de procesos de desgaste natural, encontrándose como mineral secundario estable como arcillas o silicatos de aluminio impuros, hidróxido de aluminio, etc.

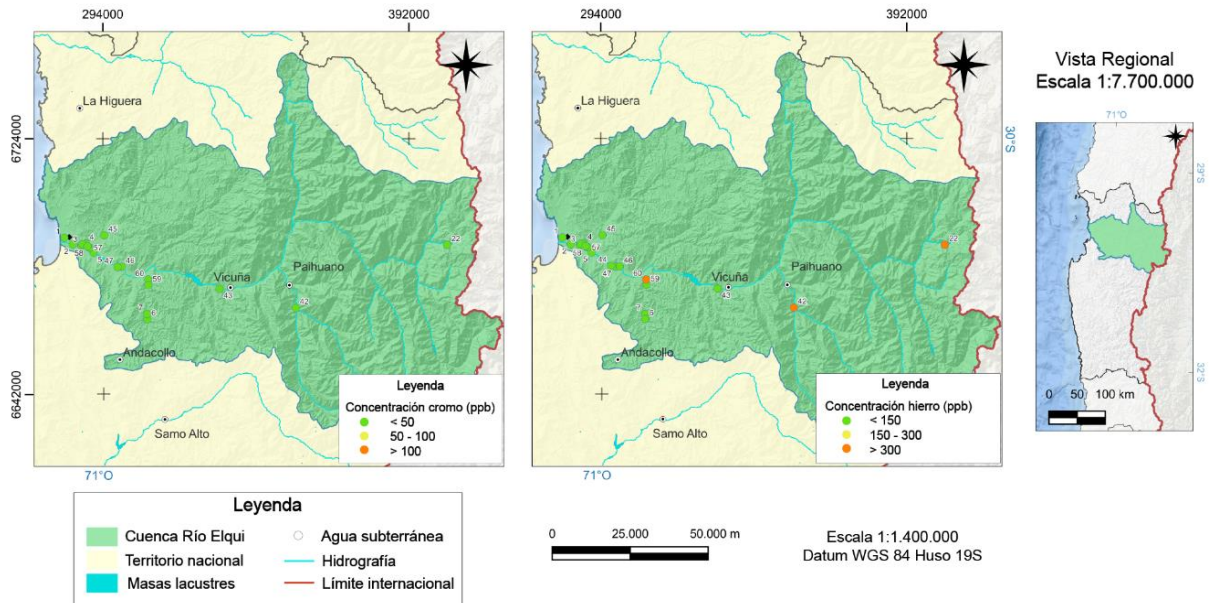


Figura 4.62: Distribución espacial concentración Cromo y Hierro en cuenca Río Elqui.

Las concentraciones de **cromo** se mantienen bajo las 50 ppb. Para la norma NCH 1333 estaría bajo el valor para considerarse contaminante.

La concentración de **hierro** supera las 300 ppb en zona alta y disminuye hacia el oeste, zona baja de la cuenca, en donde las concentraciones son menores a 150 ppb. Los altos valores medidos en la parte alta de la cuenca se deben a la actividad minera, específicamente al tranque de relave que ejerce una contribución difusa a los cuerpos de agua, además de la litología propia de la cuenca (existencia de franja metalogénica). La presencia de hierro se debe a los sulfuros como la pirita que se encuentran incluidos en las rocas volcánicas, asociados a los depósitos porfíricos de cobre.

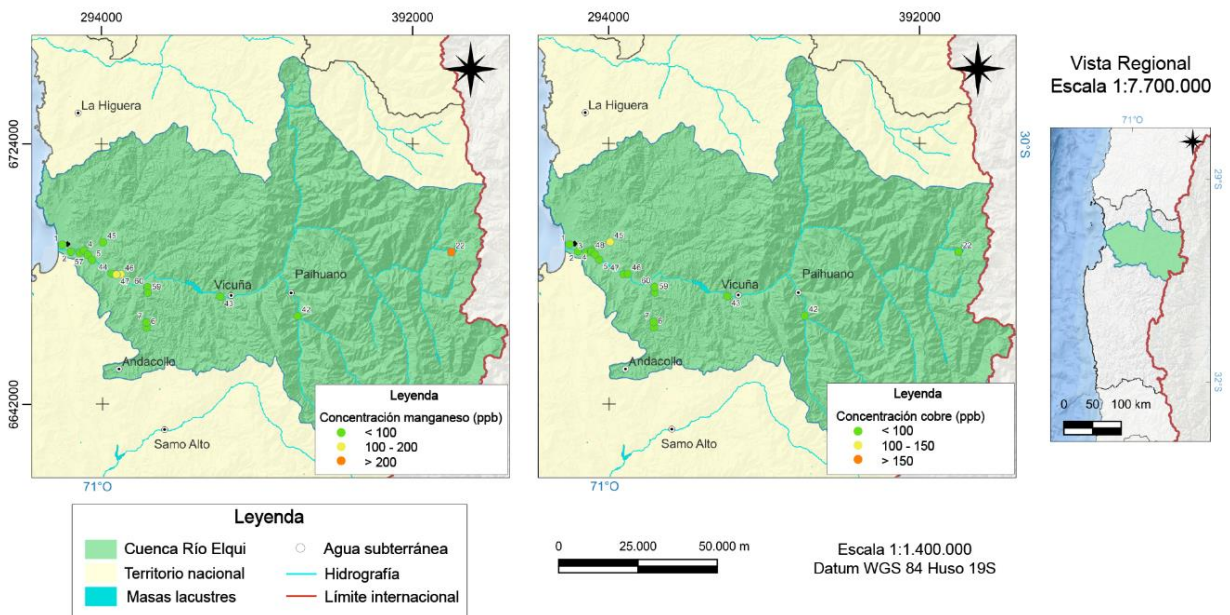


Figura 4.63: Distribución espacial concentración Manganeso y Cobre en cuenca Río Elqui.

Las muestras a lo largo de la cuenca presentan concentraciones de **manganeso** inferiores y cercanas a 100 ppb, a excepción de muestra n°22, correspondiente a agua termal, que supera las 200 ppb de este elemento minoritario. Este ión, se encuentra de forma natural disuelta en agua subterránea, mediante procesos de lixiviación. Se presenta por la litología propia de la cuenca rica en sales y metales por la existencia de franja metalogénica.

La concentración de **cobre** se mantiene bajo las 100 ppb dentro de la cuenca, sin embargo, la muestra n°45 logra un valor de 140 ppb en la parte oeste de la cuenca, el cual es un pozo utilizado para actividades agrícolas. Su concentración dentro de los rangos normales tiene una proveniencia similar a manganeso, origen de la lixiviación de vetas mineralizadas y litología en zona alta.

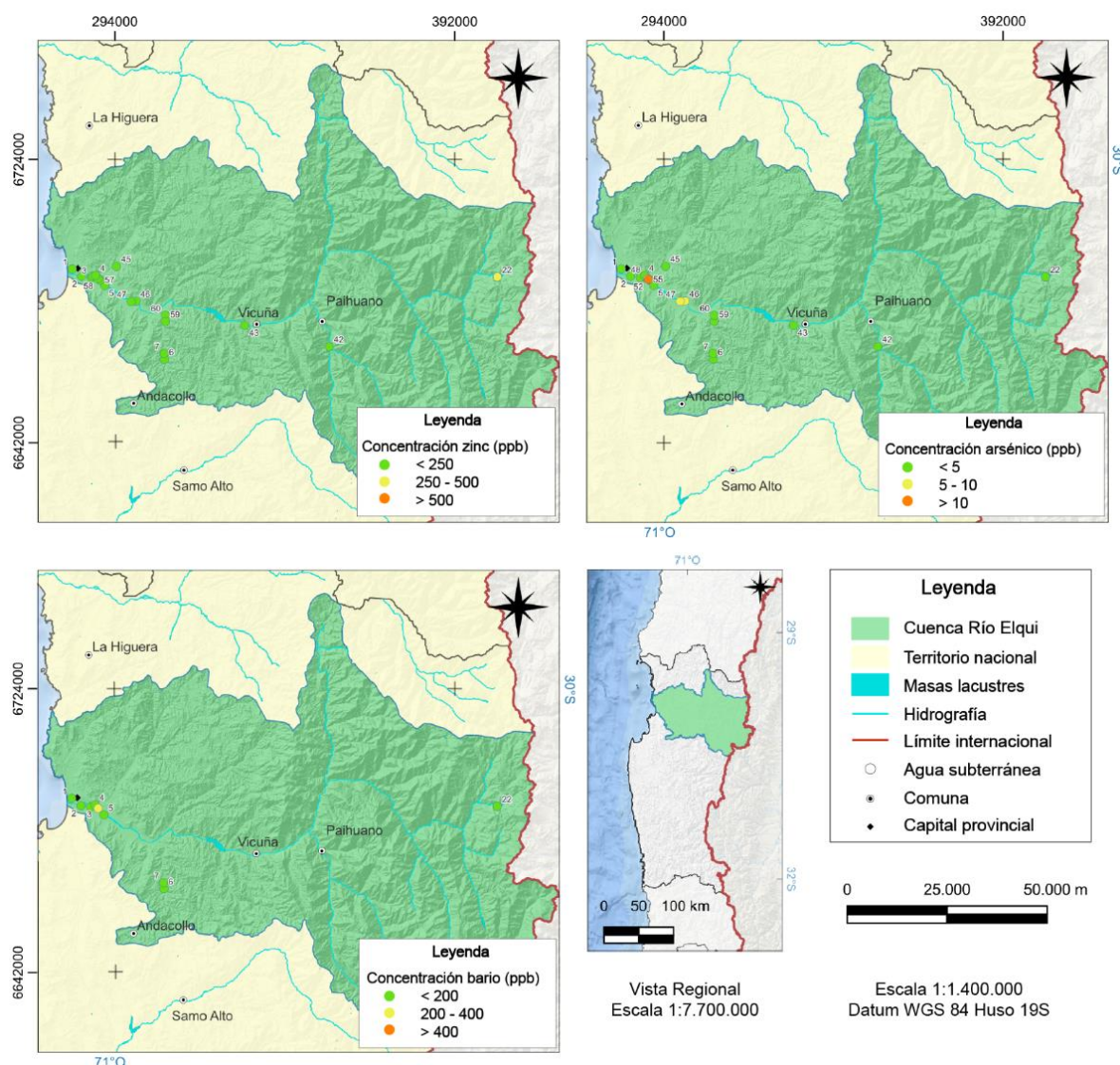


Figura 4.64: Distribución espacial concentración Zinc, Arsénico y Bario en cuenca Río Elqui.

Los valores de **zinc** se mantienen bajo 250 ppb, sin embargo, la muestra n°22 alcanza la una concentración de 480 ppb. El zinc se encuentra generalmente asociado a otros metales como el cobre y el plomo. Por lo tanto, aparece en la parte alta posiblemente se debe al lixiviado de

pórfidos cupríferos o infiltración a partir de tranques de relaves inactivos existentes alrededor del cauce en cabecera de la cuenca.

Arsénico se mantiene en una concentración baja, inferior a 5 ppb, sin embargo, la muestra n°52 alcanza las 11 ppb. Al ser en tramo bajo de río Elqui y existiendo aguas arriba niveles bajos, es posible asociarlo a contaminación antropogénica por el carácter agrícola e industrial de la zona. Esta muestra también presenta una concentración muy por sobre los valores normales (< 5 ppb) del elemento **bario**, alcanzando 220 ppb, por infiltración a partir de algunos procesos industriales en superficie.

Para distinguir el proceso de evolución del agua de manera más local en la cuenca de Río Elqui, se realizaron diagramas de Piper (Figura 4.65) y diagramas de Stiff georreferenciados (Figura 4.66).

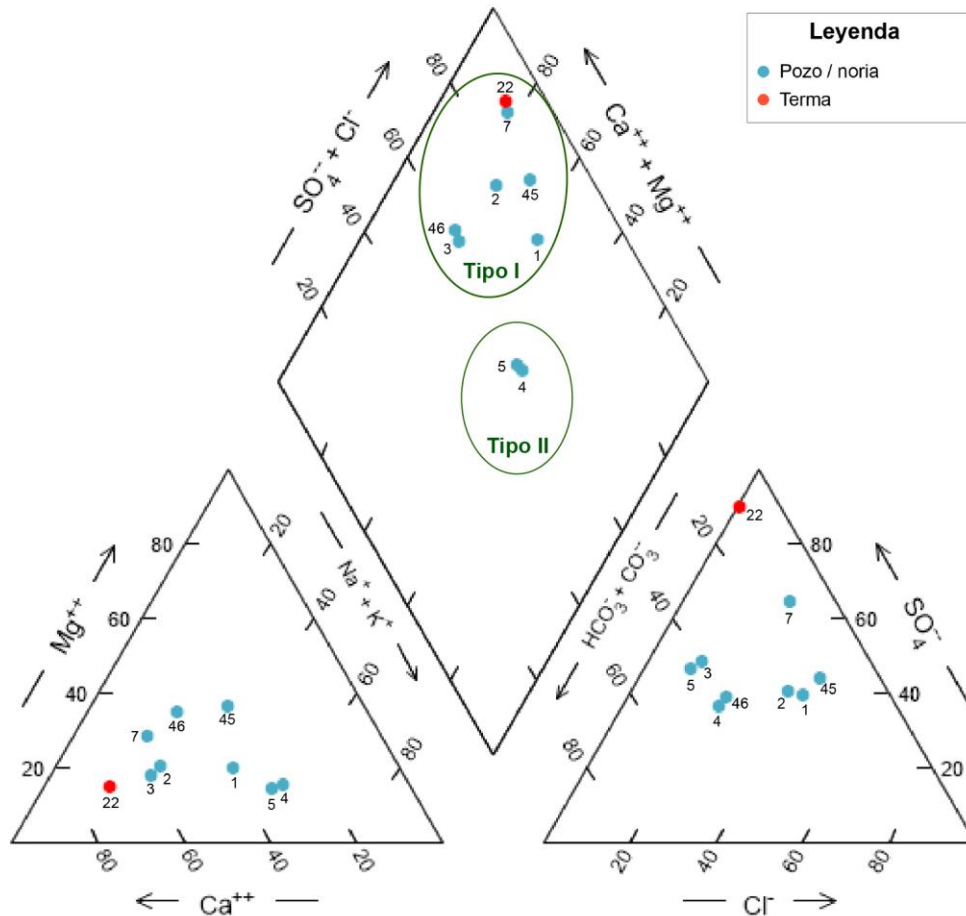


Figura 4.65: Diagramas Piper para muestras hidroquímicas en cuenca Río Elqui.

En el diagrama de Piper de la figura anterior se muestran 9 composiciones químicas recopiladas, 7 corresponden a muestras tomadas en junio de 2022 y 2 provienen de análisis de expedientes (muestra n°45, realizada en junio 1994 y muestra n°46, realizado en agosto 1996). Las muestras son aguas subterráneas tomadas desde pozos y una de ellas es agua termal.

En los cationes predomina Ca^{2+} y Mg^{2+} en estos pozos y en caso de los aniones, se observa que predomina SO_4^{2-} . No se observa si su aumento es proporcional al sentido del flujo principal del agua subterránea.

Se logran identificar dos familias. En primer lugar, agua subterránea de tipo sulfatada-clorurada cálcica-magnésica (Tipo I), en la cual muestras n° 1, 45 y 46 son de mayor proporción magnésica que el resto de la familia. En segundo lugar, las muestras n° 4 y 5 en tramo bajo de río Elqui se encuentran en el campo de aguas cloruradas-sulfatadas sódicas (Tipo II).

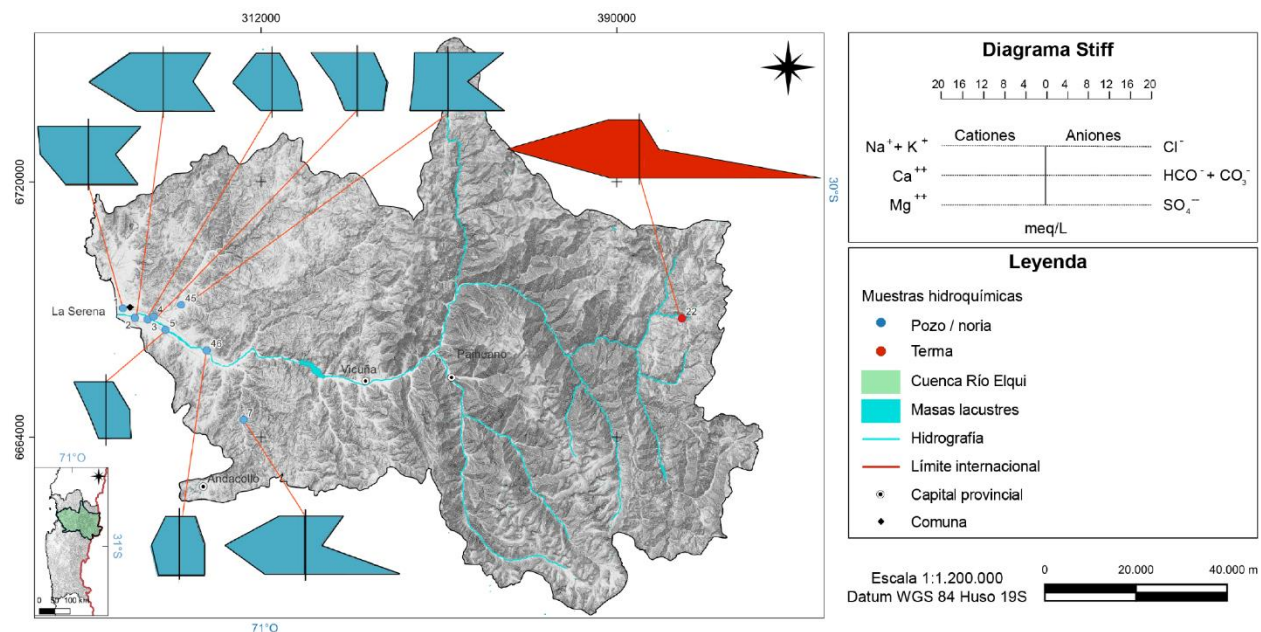


Figura 4.66: Diagramas Stiff georreferenciados de muestras hidroquímicas en cuenca Río Elqui.

Para estudiar su distribución espacial se elaboraron diagramas de Stiff en cada estación de toma de muestras, tal como lo ilustra la Figura 4.66. Se aprecia una constancia de las concentraciones de los elementos en general a lo largo de la dirección del flujo de aguas subterráneas, sin embargo, las aguas son mayormente sulfatadas cálcicas en zonas de mayor altitud. Hacia la parte baja va disminuyendo la proporción de sulfato en el agua y existe un aumento de las concentraciones cloruradas sódicas sobre todo en las muestras cercanas a la desembocadura de río Elqui. La muestra n°22 en parte alta de la cuenca, al ser agua termal es muy concentrada de iones disueltos a diferencia de aguas que se transportan por la cuenca.

No hay muestras en sector medio de la cuenca y en zona alta corresponde a agua termal por lo que no se identifica de mejor manera el tipo de agua de la cuenca en su totalidad, sin embargo, aguas abajo de Vicuña y tramo medio y bajo de río Elqui son de composiciones sulfatadas, cloruradas, cálcicas, y sódicas, donde los pozos se posicionan en sedimentos del valle principal del Río Elqui con una importante actividad agrícola e industrial asociada. Se puede corroborar con diagnósticos de calidad de agua subterránea en la región que en muestras de aguas arriba de Panguano, las composiciones son bicarbonatadas cálcicas, sin concentraciones elevadas de iones, lo que constata que aguas siguen un enriquecimiento en sales hacia la

desembocadura de la cuenca que condice con los tiempos de residencia en el acuífero de las aguas en este sentido (DGA, 2017).

Los dos tipos de familias de agua descritas mediante los diagramas anteriores se encuentran en muestras próximas entre sí lo que puede deberse a diversas rutas por donde están circulando estas aguas considerando que en esta área se identificó una zona de roca fracturada y la presencia de una falla transversal al valle, por lo que el agua tendría un mayor espacio para circular y entrar en contacto con mineralogía que altera su química.

4.4.2. Cuencas Costera Río Elqui - Río Limarí

Las variaciones en parámetros fisicoquímicos en la cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí se pueden observar espacialmente en las siguientes figuras.

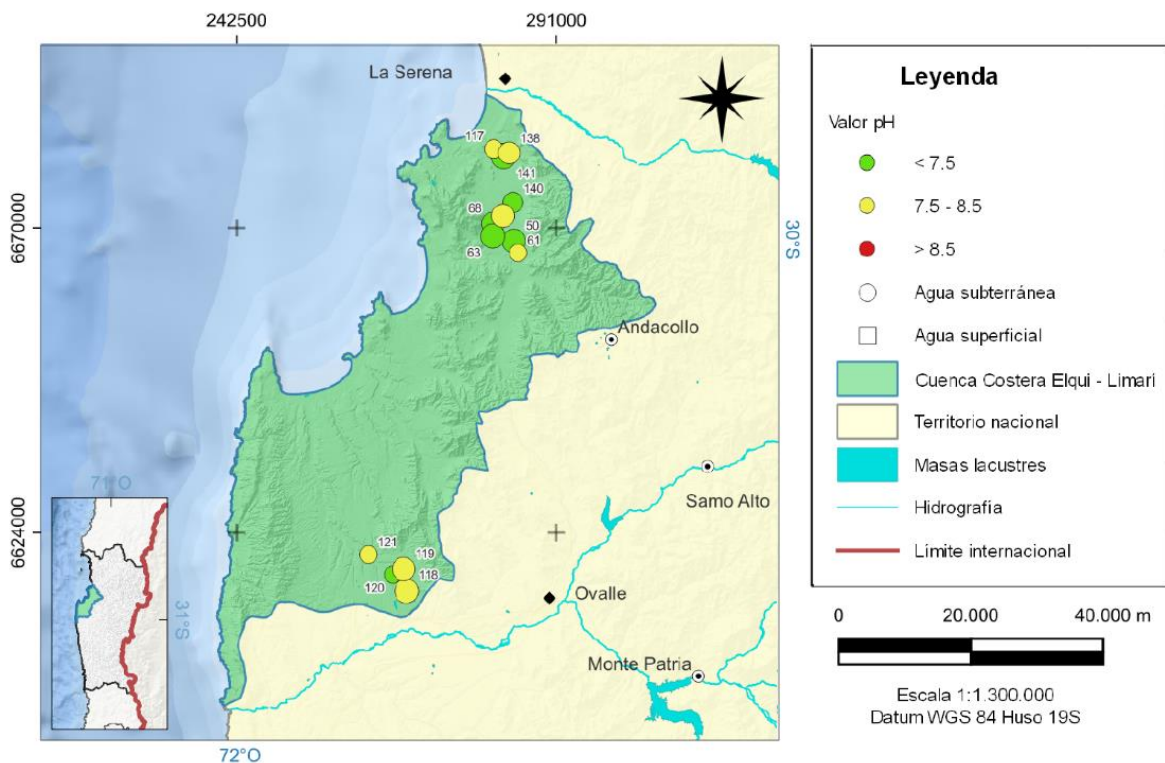


Figura 4.67: Distribución espacial pH dentro de cuenca costera.

Se observa en la figura 4.67 la distribución espacial de pH, donde los valores en datos de agua subterránea se encuentran generalmente neutras a levemente alcalinas a lo largo de toda la cuenca y no presentan variaciones entre sector norte y sur.

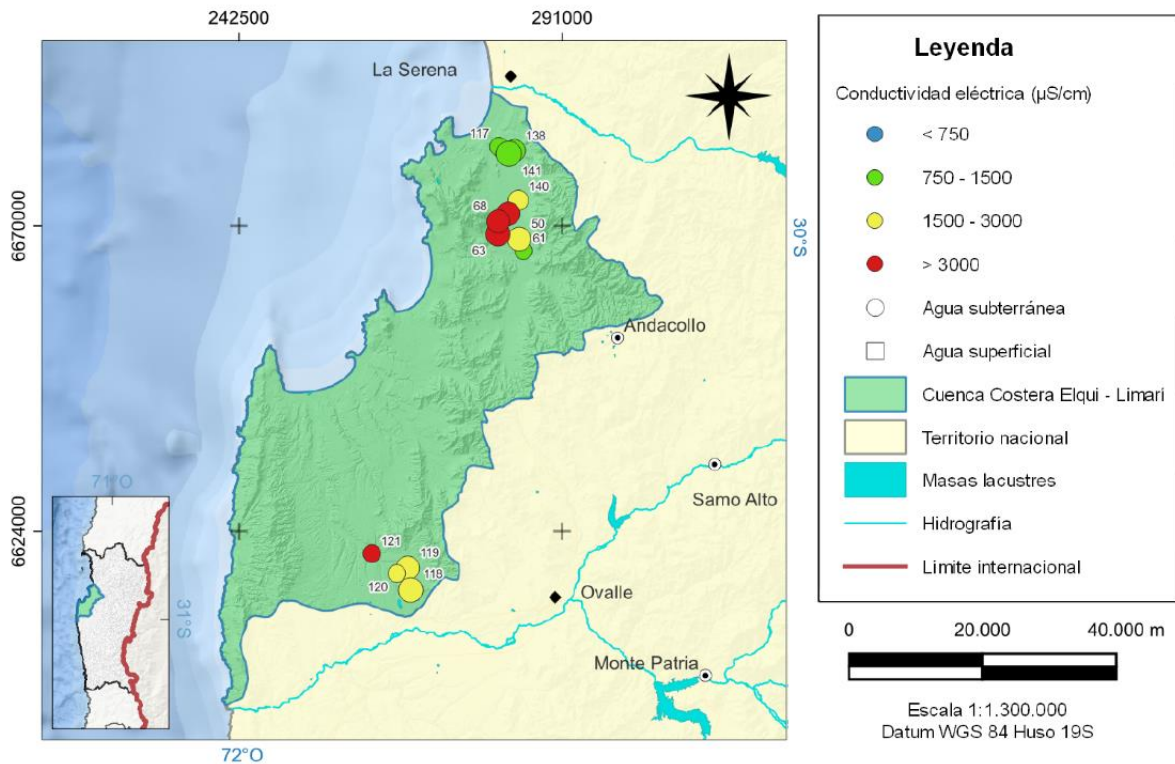


Figura 4.68: Distribución espacial Conductividad Eléctrica dentro de cuenca costera.

La distribución espacial muestra que la conductividad de las muestras es variable, aunque todas superiores a 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tiende a aumentar su valor en los valles de la cuenca, logrando hasta 7000 - 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De acuerdo con la clasificación del agua según su conductividad eléctrica (APHA, 1992), se aprecia una salinidad variable pudiendo identificarlas en su mayoría como agua dulce, exceptuando aquellos sectores ya señalados que contienen agua salobre como efecto de la salinización en la zona costera.

Calidad de agua	Dulce	Salobre	Mar	Salmuera
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	100 - 2000	2000 - 5000	5000 - 45000	45000 - 100000

Tabla 12: Clasificación del agua según su conductividad eléctrica (APHA, 1992).

El ciclo de la salinidad dentro de las aguas continentales se puede dividir en dos grandes dominios, el dominio marino, directa o indirectamente a partir del agua de mar; y el dominio continental/interacciones agua-rocas. En este caso podría dominar la disolución de formaciones evaporíticas, provenientes de antiguas salmueras debido a las transgresiones y regresiones marinas. Adicionalmente, la heterogeneidad del acuífero con una alternancia de arena arcillosa da como resultado un débil intercambio vertical y las aguas profundas suelen ser más salinas que las más próximas a la superficie.

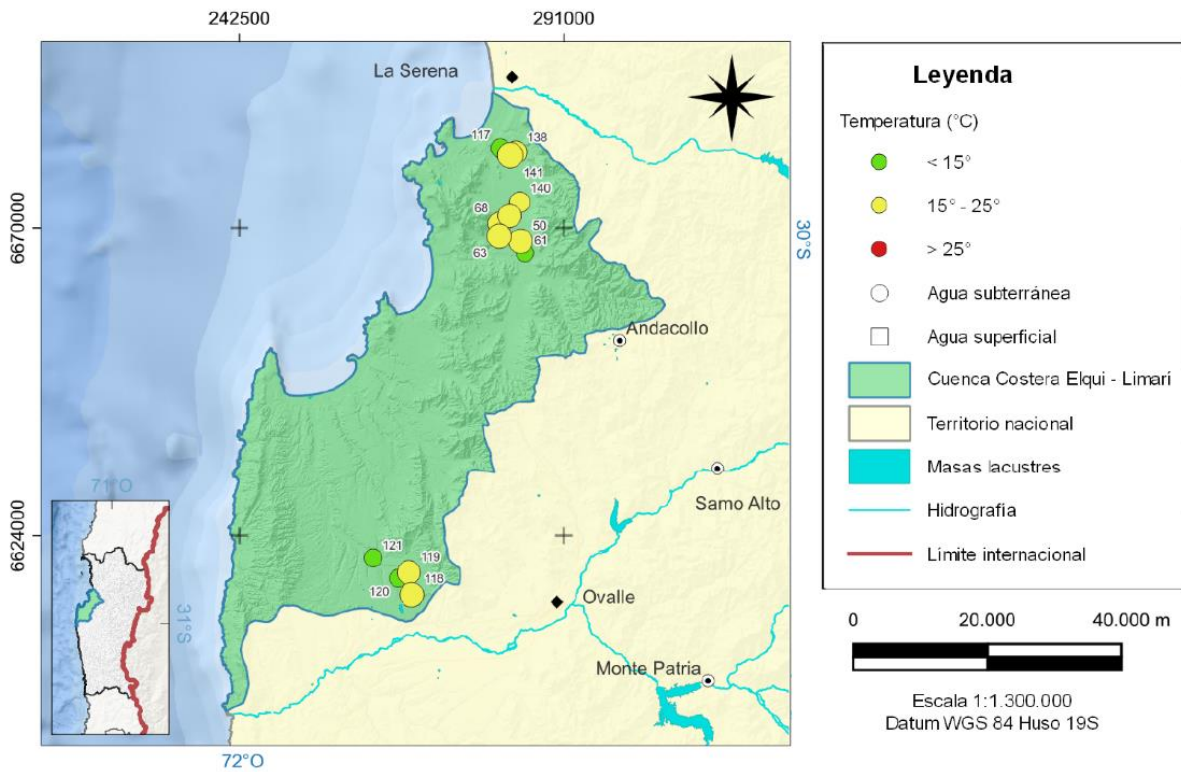


Figura 4.69: Distribución espacial Temperatura dentro de cuenca costera.

Para el caso de la temperatura, se aprecia que los valores de aguas subterráneas van desde los 15°C a los 25°C principalmente, existiendo algunas mínimas de 13°C. Este rango predominante de temperatura puede deberse a la aridización del territorio como una consecuencia conjunta de la disminución de las precipitaciones, la cual es más notable en zonas costeras, regulando las temperaturas del agua subterránea al momento de la infiltración.

Las variaciones en elementos mayoritarios en la cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí se pueden observar espacialmente en las figuras 4.70 - 4.72. A continuación, la distribución de aniones a lo largo de la cuenca.

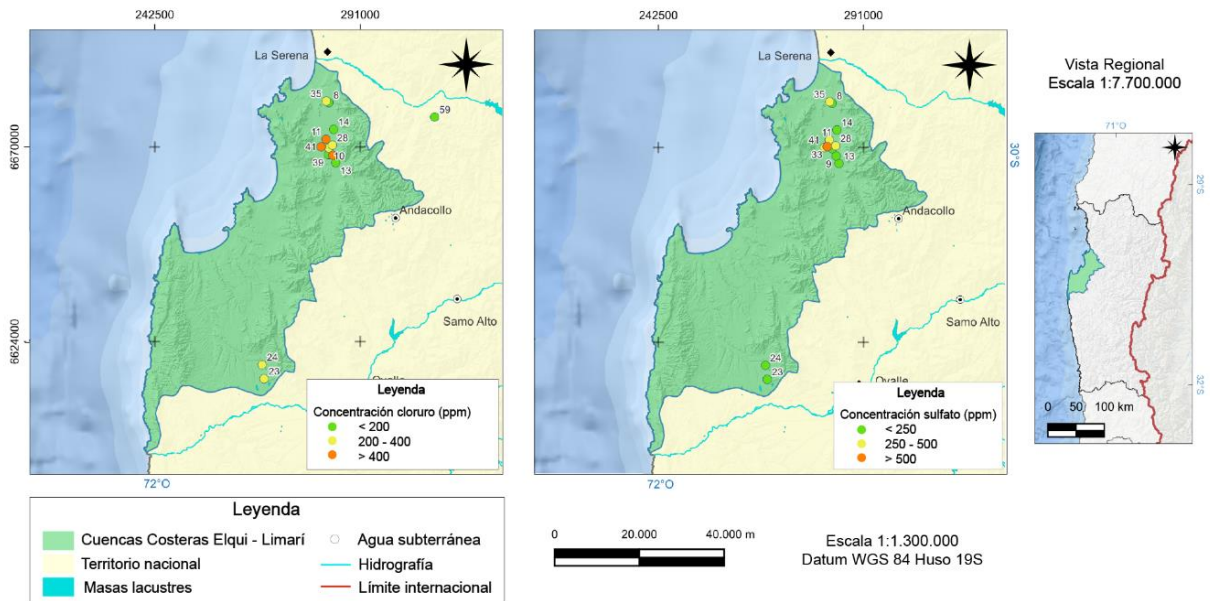


Figura 4.70: Distribución espacial concentración Cloruro y Sulfato en cuenca costera.

La distribución espacial de **cloruro** aumenta en los valles en el norte de la cuenca, superando en algunas muestras las 400 ppm. Los pozos ubicados hacia el sur se encuentran dentro del rango 200 y 400 ppm. Estas mayores concentraciones provienen, muy probablemente, por redisolución de evaporitas asociadas a las formaciones sedimentarias.

La concentración de **sulfato** es inferior a 500 ppm, por lo que se encuentra dentro del rango aceptable para agua de riego y agua potable según las normas respectivas. Sólo una muestra ubicada en el valle al norte de la cuenca alcanza un valor de 592 ppm (muestra n°33), concentración atribuible a contaminación por actividad antrópica principalmente.

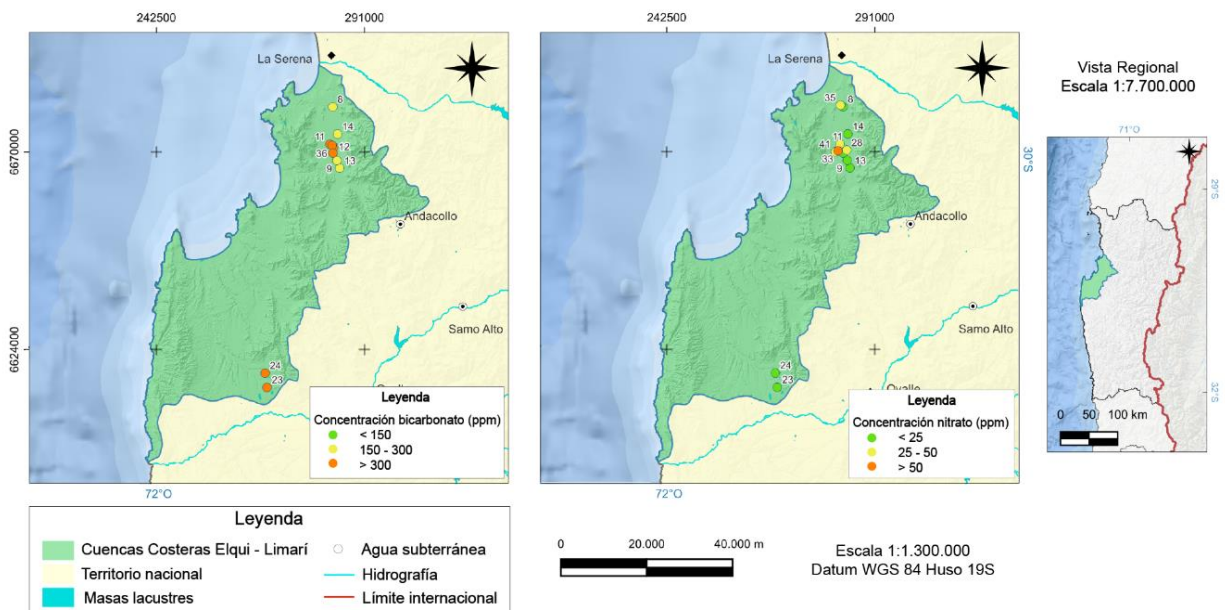


Figura 4.71: Distribución espacial concentración Bicarbonato y Nitrato en cuenca costera.

En el caso de las aguas estudiadas, se observan mayores concentraciones de **bicarbonato** en muestras ubicadas en la parte sur de la cuenca, en sector de Quebrada Seca y en el valle de la parte norte cerca de la localidad de Cerrillos (mayor a 300 ppm). Se aprecian valores en el rango 150 y 300 ppm. Posiblemente, las fuentes de bicarbonato corresponden a agua de lluvia que, al entrar en contacto con el suelo (que a su vez contiene abundante CO_2), genera la reacción que acidificará el agua: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$. Esta relación se favorece a medida que el suelo contenga más CO_2 , como sucede en terrenos cultivados y con abundante vegetación (Custodio y Llamas, 1976).

Las concentraciones de **nitrito** aumentan al norte y en cercanía a localidades. En la parte sur están en niveles bajo las 25 ppm y, hacia valle en norte de la cuenca las concentraciones son menores a 50 ppm a excepción de la muestra n°31 que alcanza las 65 ppm, correspondiente a un pozo para uso industrial (empresa de servicios sanitarios). Están dentro del rango normativo en agua potable, sin embargo, los niveles naturales de nitratos en aguas subterráneas son típicamente menor a 10 mg/L, pero pudieron incrementarse debido a actividades como la agricultura e industria, específicamente, a prácticas de siembra y donde se aplican compuestos nitrogenados. Las muestras se encuentran espacialmente cercanas y al encontrarse la muestra señalada sobre la norma, podría comprometer el uso potable del agua en pozos aledaños.

A continuación, se presenta la distribución de cationes a lo largo de la cuenca.

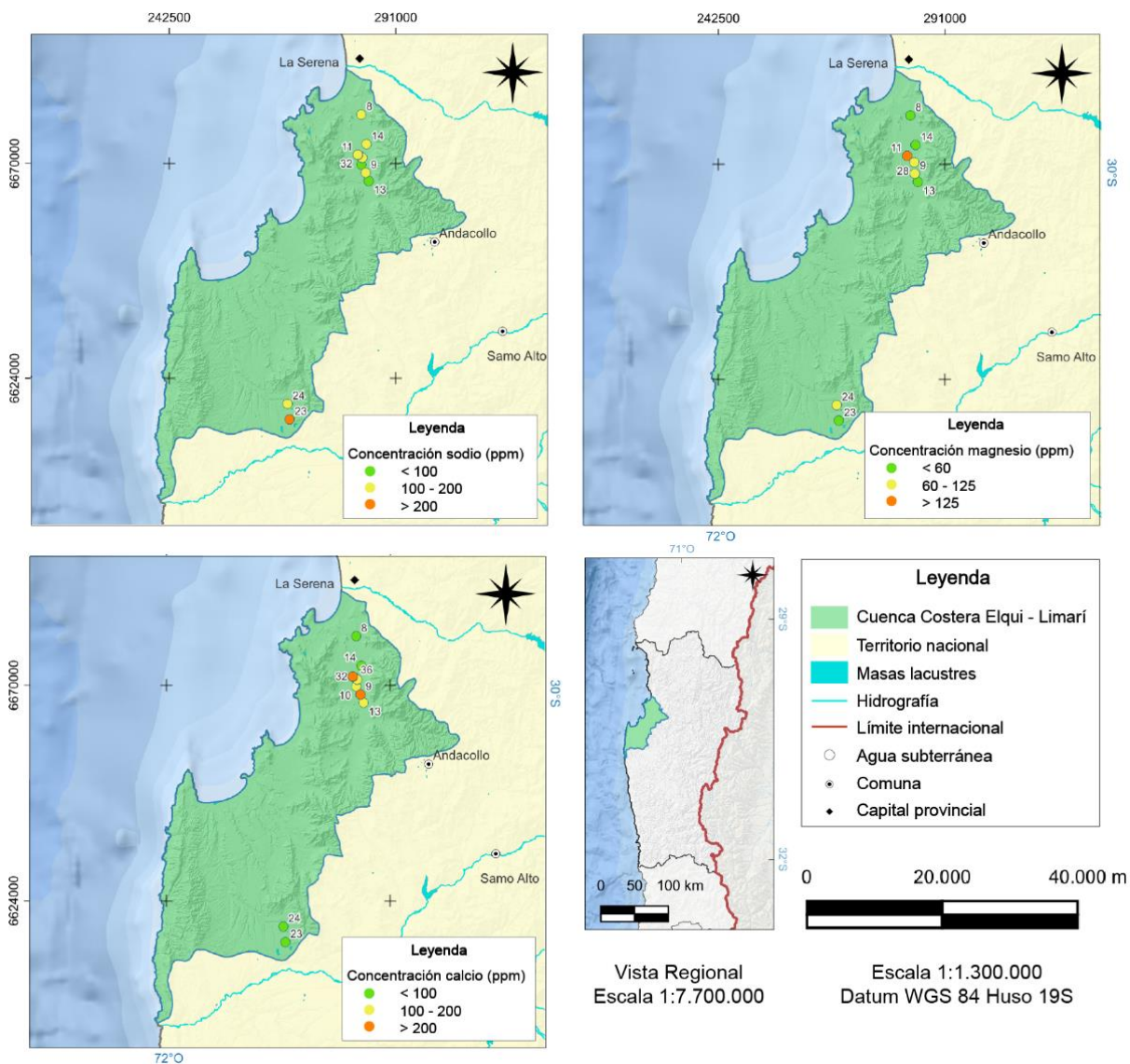


Figura 4.72: Distribución espacial concentración Sodio, Magnesio y Calcio en cuenca costera.

La concentración de **sodio** es variable encontrándose en un rango de 100 a 200 ppm tanto en la parte norte como sur de la cuenca. La muestra n°23, cercana al límite sur de la cuenca, alcanza una concentración de 400 ppm, correspondiente a un pozo para uso en actividades agrícolas. Su origen probablemente es del lavado de los depósitos marinos actuales (Custodio y Llamas, 1983) o por mezcla con agua de mar.

La concentración de **magnesio** se mantiene bajo las 125 ppm a lo largo de la cuenca. Sólo una muestra proveniente de pozo de agua potable en valle norte de la cuenca supera levemente este valor.

La concentración de **calcio** es menor a 100 ppm en parte interna de la cuenca, pero va en aumento en zonas de relleno aluvial donde pozos n°9, 11 y 32, los cuales son tanto para uso

agrícola como de agua potable, alcanzan las 398 ppm. Su concentración en las diferentes muestras tiene posible proveniencia de aguas lluvias (Pearson y Fisher, 1971) y, principalmente, por su amplia difusión en rocas ígneas, como constituyente esencial de los silicatos, y en rocas sedimentarias en forma de carbonato.

Las variaciones en concentración de elementos traza se pueden observar espacialmente en Figuras 4.73 - 4.76.

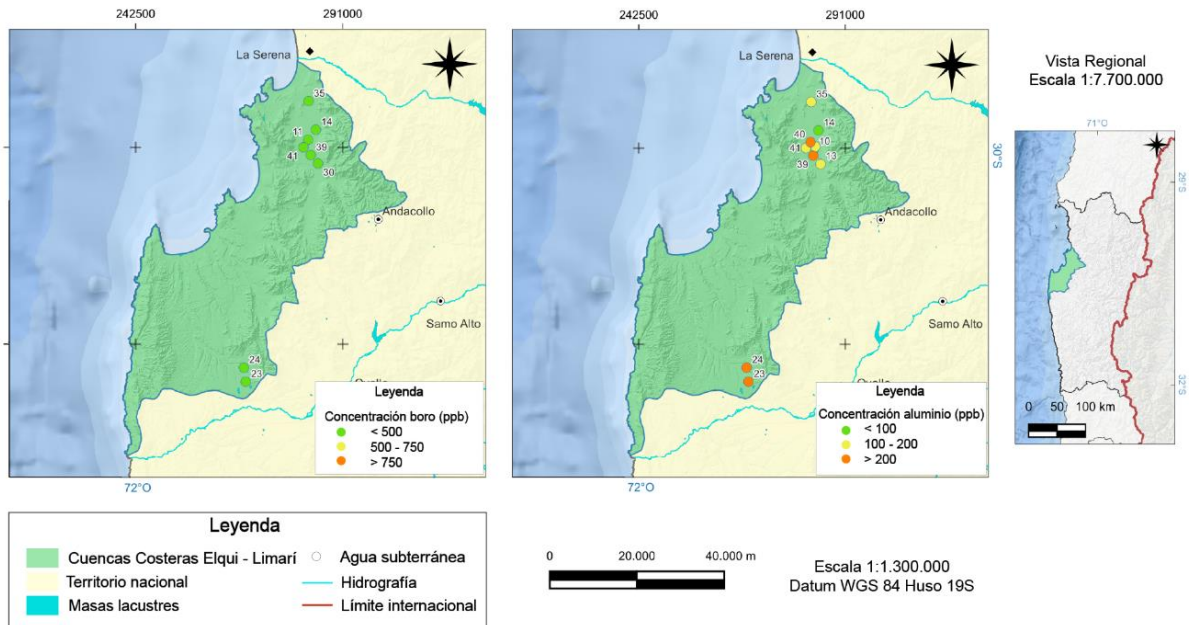


Figura 4.73: Distribución espacial concentración Boro y Aluminio en cuenca costera.

Las concentraciones de **boro** se encuentran bajo los 500 ppb a lo largo de toda la cuenca. Procede posiblemente de la alteración de rocas ígneas y rocas volcánicas presentes.

Aluminio está presente entre 100 y 200 ppb en la parte norte, sin embargo, hacia el valle y la parte sur de la cuenca se presentan concentraciones superiores a 220 ppb correspondientes a pozos de uso de regadío. Su concentración proviene posiblemente de los minerales aluminosilicatados en rocas ígneas y sedimentarias en la zona. Estos valores no alcanzan a ser dañinos para regadío.

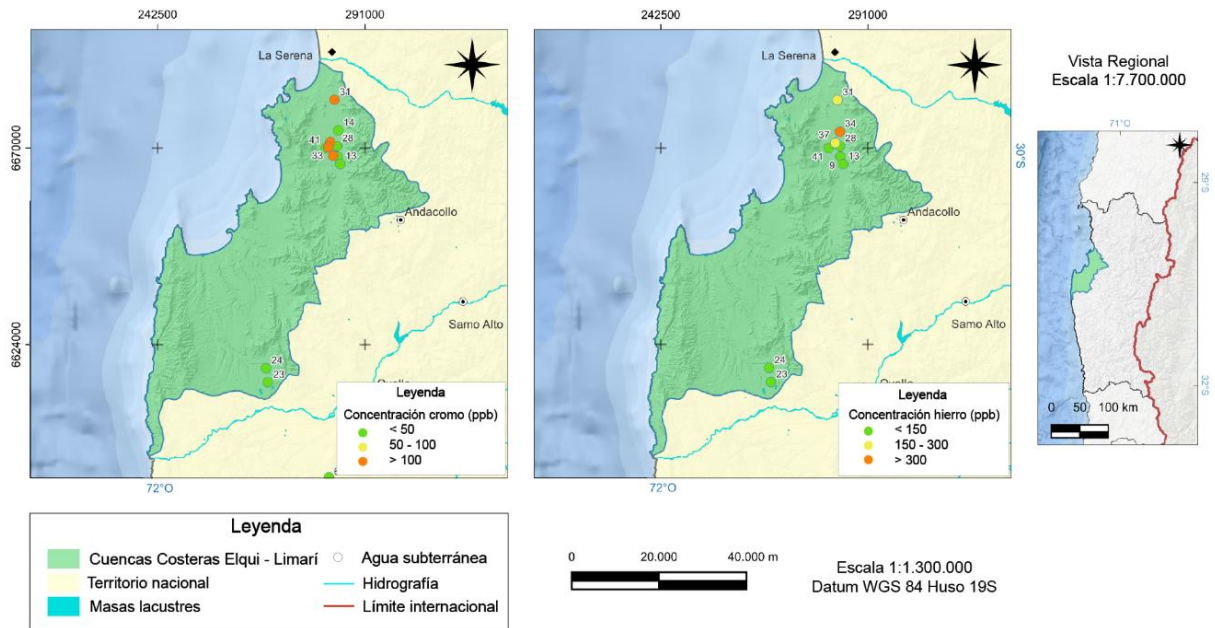


Figura 4.74: Distribución espacial concentración Cromo y Hierro en cuenca costera.

Las concentraciones de **cromo** se mantienen bajo las 50 ppb en zona este de la cuenca, sin embargo, en valle de zona norte existen muestras con más de 100 ppb de este elemento. Está distribuido ampliamente en la naturaleza y si bien en aguas naturales está presente en concentraciones muy bajas, su presencia, bajo los estados de oxidación +3 y +6, puede aumentar como consecuencia de aportes antropogénicos derivados de la utilización de compuestos de cromo (uso de abonos fosfatados, fertilizantes, excremento de ganado, entre otros).

En el caso del **hierro**, las concentraciones alcanzan valores superiores a 300 ppb en valle norte de la cuenca y disminuye hacia el sur en donde las concentraciones son menores a 150 ppb. Ocurre de manera natural en acuíferos, pero pueden aumentar por disolución de rocas ferrosas y ataque de silicatos ferromagnesianos en depósitos marinos antiguos y actuales.

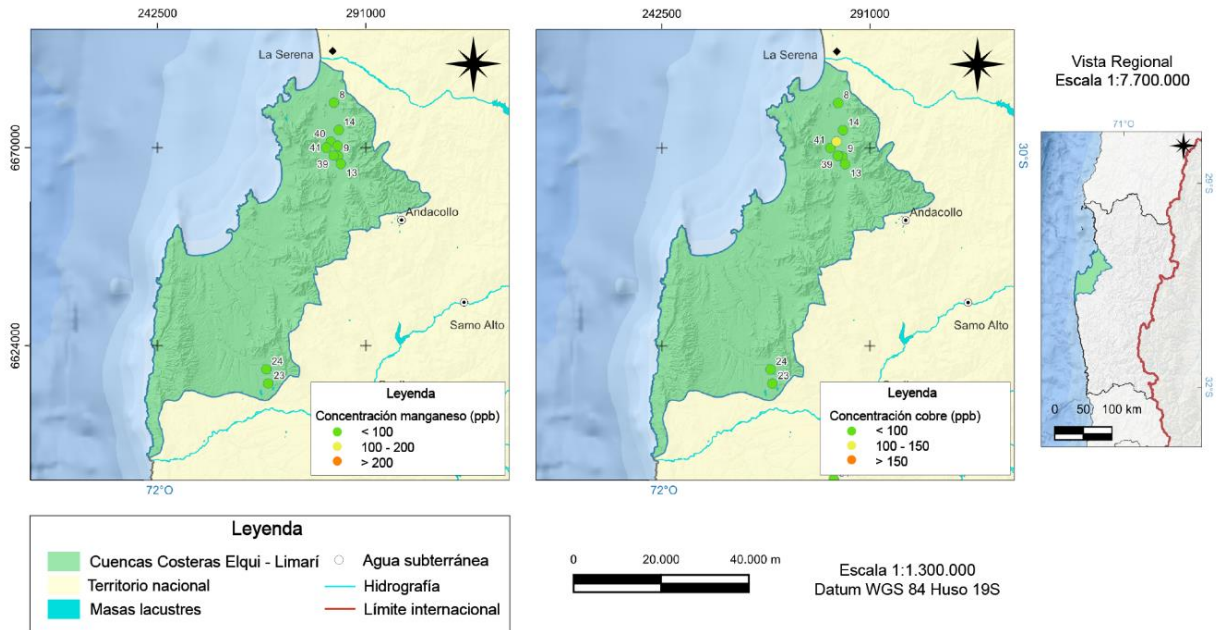


Figura 4.75: Distribución espacial concentración Manganeso y Cobre en cuenca costera.

Por otra parte, la concentración de **manganeso** no supera las 100 ppb a lo largo de la cuenca. En un elemento disuelto de forma natural en el agua subterránea por procesos de lixiviación de la roca.

La concentración de **cobre** se mantiene bajo las 100 ppb dentro de la cuenca, sin embargo, la muestra n°38 logra un valor de 130 ppb en la parte oeste de la cuenca, el cual es un pozo utilizado para actividades agrícolas.

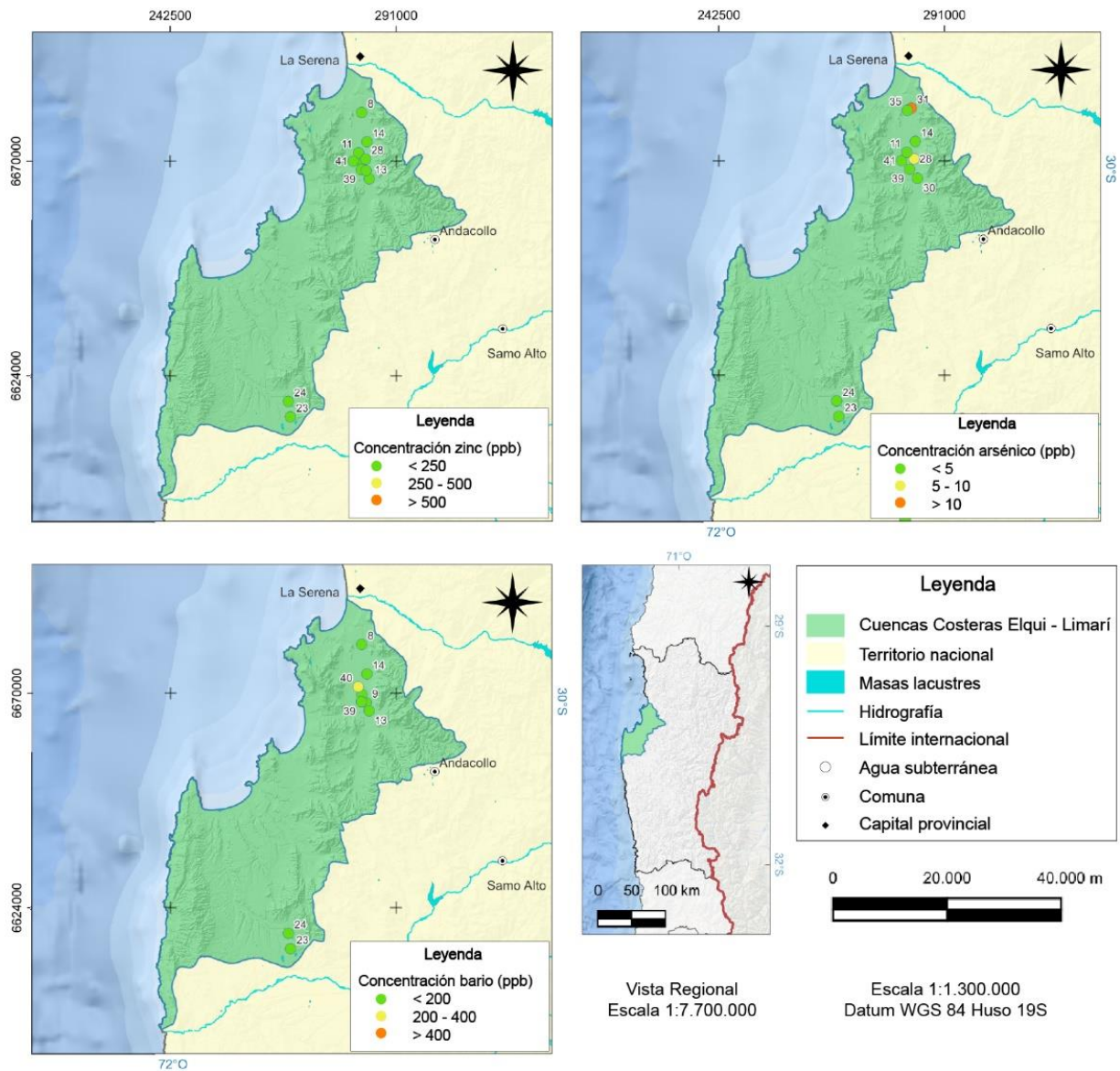


Figura 4.76: Distribución espacial concentración Zinc, Arsénico y Bario en cuenca costera.

Tanto las concentraciones de **zinc** como de **arsénico** se mantienen bajas a lo largo de la cuenca, inferior a 250 ppb y a 5 ppb, respectivamente. En el caso de arsénico, la muestra 31 alcanza las 25 ppb, sin embargo, como la afección es de carácter más local en esta ocasión y, dado el carácter agrícola e industrial de la zona, el acuífero puede encontrarse contaminado de forma antropogénica.

Esta cuenca también presenta una concentración baja y dentro de los valores normales del elemento **bario** de 5 ppb en promedio. Los procesos industriales lo disuelven fácilmente en agua.

Para distinguir el proceso de evolución del agua de manera más local en cuenca costera entre Río Elqui y Río Limarí, se realizaron diagramas de Piper (Figura 4.77) y diagramas de Stiff georreferenciados (Figura 4.78).

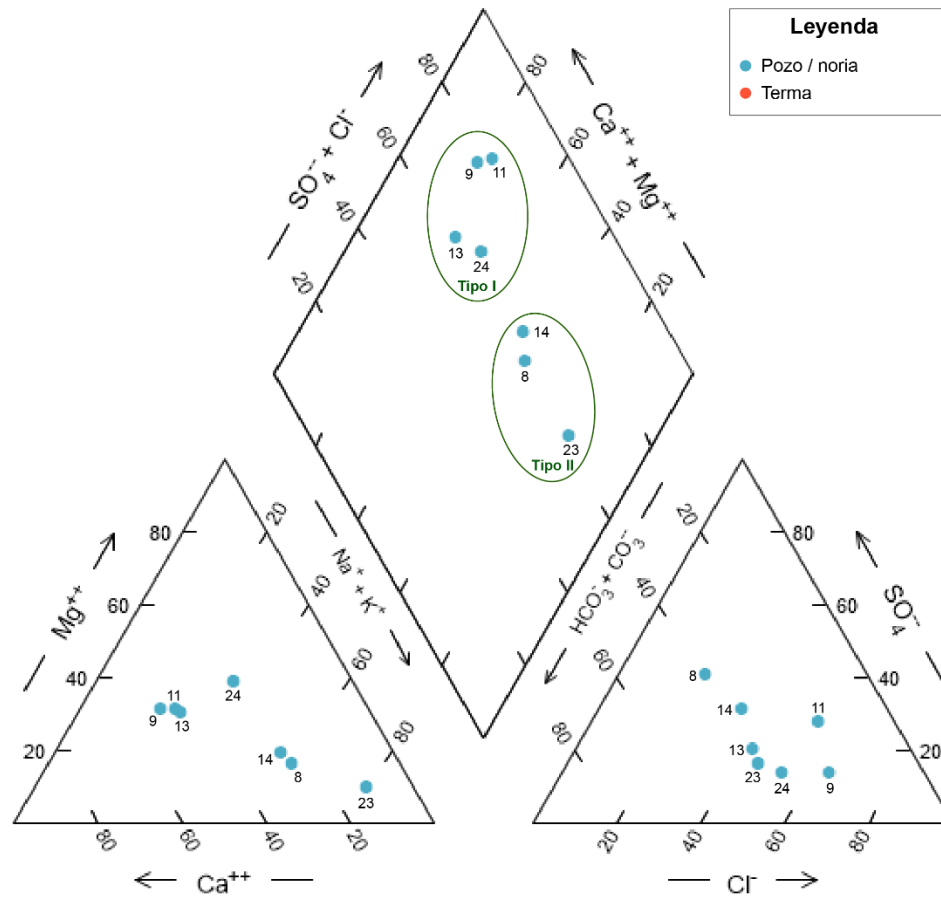


Figura 4.77: Diagramas Piper para muestras hidroquímicas en cuenca costera.

En el diagrama de Piper de la Figura 4.77 se muestran 7 composiciones químicas recopiladas de en campaña de terreno en abril de 2022. Se logran identificar 2 familias, agua subterránea de tipo sulfatada-clorurada cálcica-magnésica (Tipo I) y de tipo clorurada-sulfatada sódica (Tipo II).

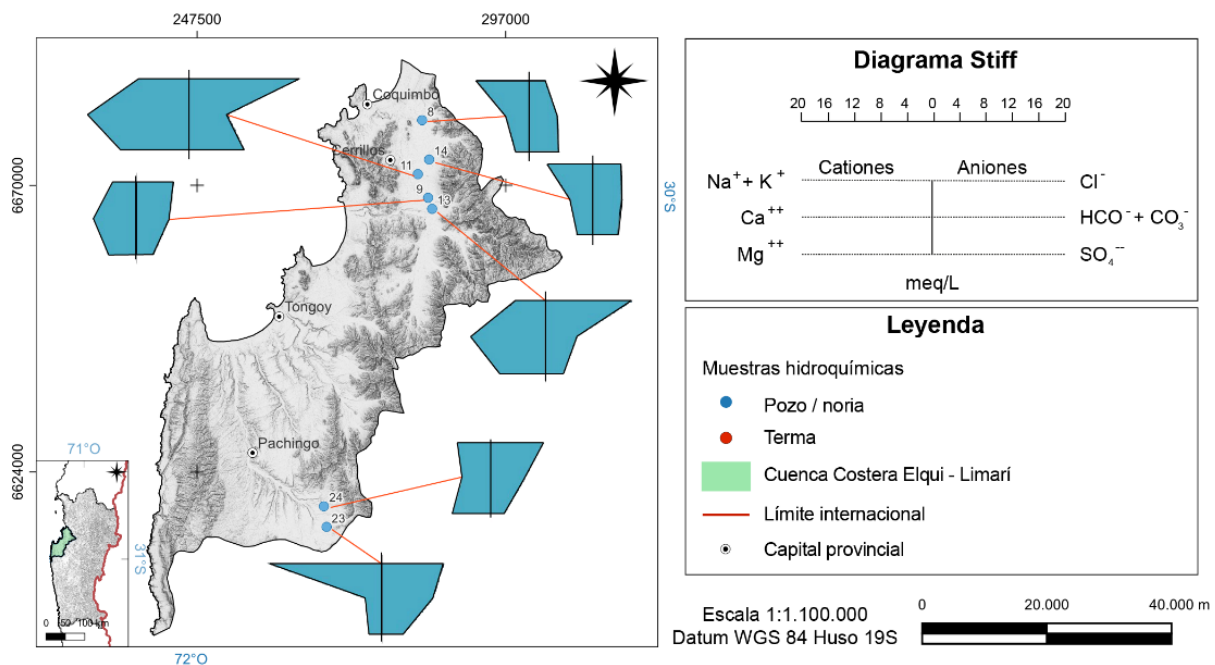


Figura 4.78: Diagramas Stiff georreferenciados de muestras hidroquímicas en cuenca costera.

En la figura 4.78 se aprecia que en zona norte de la cuenca existe una mayor concentración de Ca²⁺ y hacia el interior, límite este de la cuenca, va disminuyendo este catión pero aumentando la proporción de Na⁺. En término de aniones, hacia el sur aumenta el cloruro, es cual tiene los mayores valores en muestras en valle donde se encuentra la localidad de Cerrillos, específicamente en muestras n°9 y 11 que están más cercanas a la costa.

En quebrada Seca, límite sur de la cuenca, presenta variaciones importantes en muestras n°23 y 24, las cuales se encuentran cercanas espacialmente pero el contenido de Na⁺ es casi tres veces mayor en la primera muestra. Muestra n°23 está dentro de la familia de aguas cloruradas-sulfatadas sódicas como las muestras en extremo opuesto de la cuenca.

De acuerdo con esto, se considera también que pozos en el valle son poco profundos y los niveles piezométricos son bajos, lo que da cuenta de aguas de poco tiempo de residencia y con más oportunidades de ser afectada por actividad antrópica en superficie (agricultura e industria). En cambio, los pozos en límite norte como límite sur son profundos, al igual que sus niveles de agua (> 50 m), por ende, la captación de agua es desde un nivel acuífero inferior que albergaría aguas con un mayor tiempo de residencia y, por lo tanto, más salinas.

4.4.3. Cuenca Río Limarí

Las variaciones en parámetros fisicoquímicos en la cuenca Río Limarí se pueden observar espacialmente en las siguientes figuras.

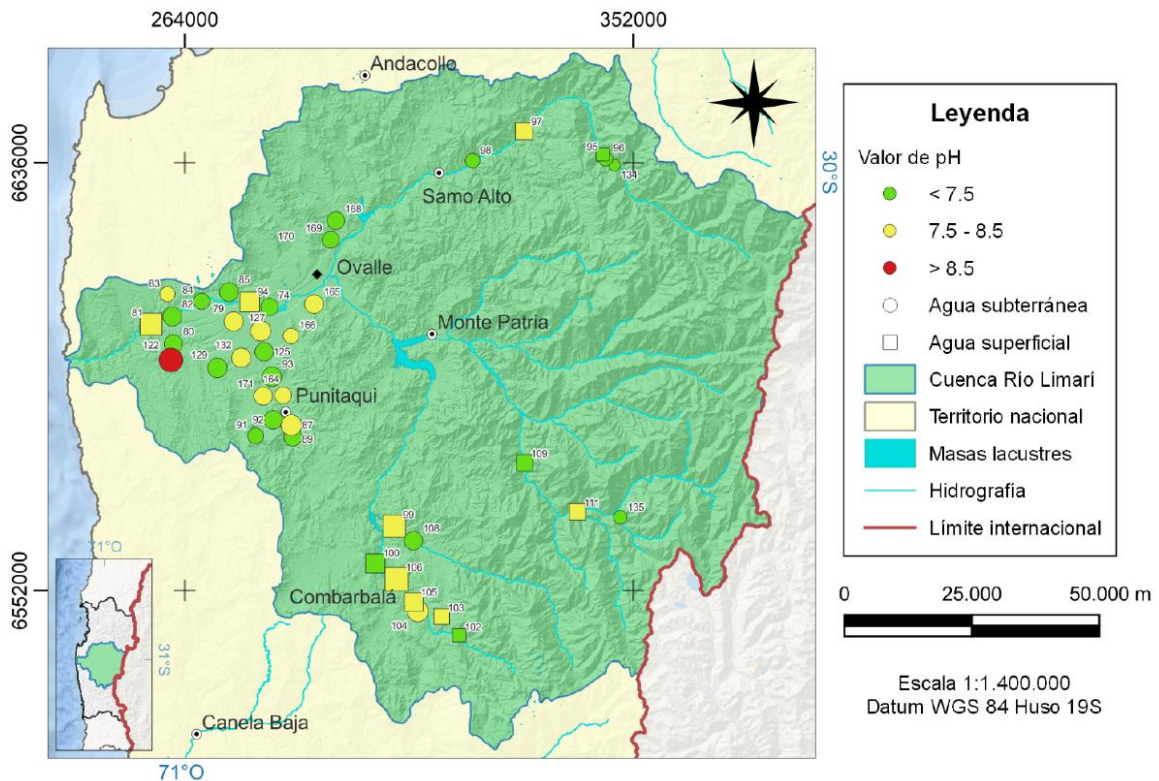


Figura 4.79: Distribución espacial pH dentro de la cuenca Río Limarí.

Los valores de pH de agua superficial como de agua subterránea de la cuenca río Limarí están por debajo de 8.5, a excepción de muestra de Termas de Socos (pH 9.3). En términos de agua subterránea, se aprecia que los valores de pH levemente más alcalinos son observables en la localidad de Punitaqui.

Algunos procesos antrópicos que además de generar una gran cantidad de sulfatos por oxidación de sulfuros, pueden alcalinizar las aguas. De acuerdo con la actividad minera presente, una posible respuesta a estos valores son los procesos de flotación, para los cuales se requiere agua muy alcalina (pH sobre 10; Taggart, 1945). Si estas aguas son infiltradas sin un tratamiento previo podrían alcalinizar las aguas del acuífero.

El agua superficial es levemente alcalina a lo largo de toda la cuenca de acuerdo con las muestras analizadas.

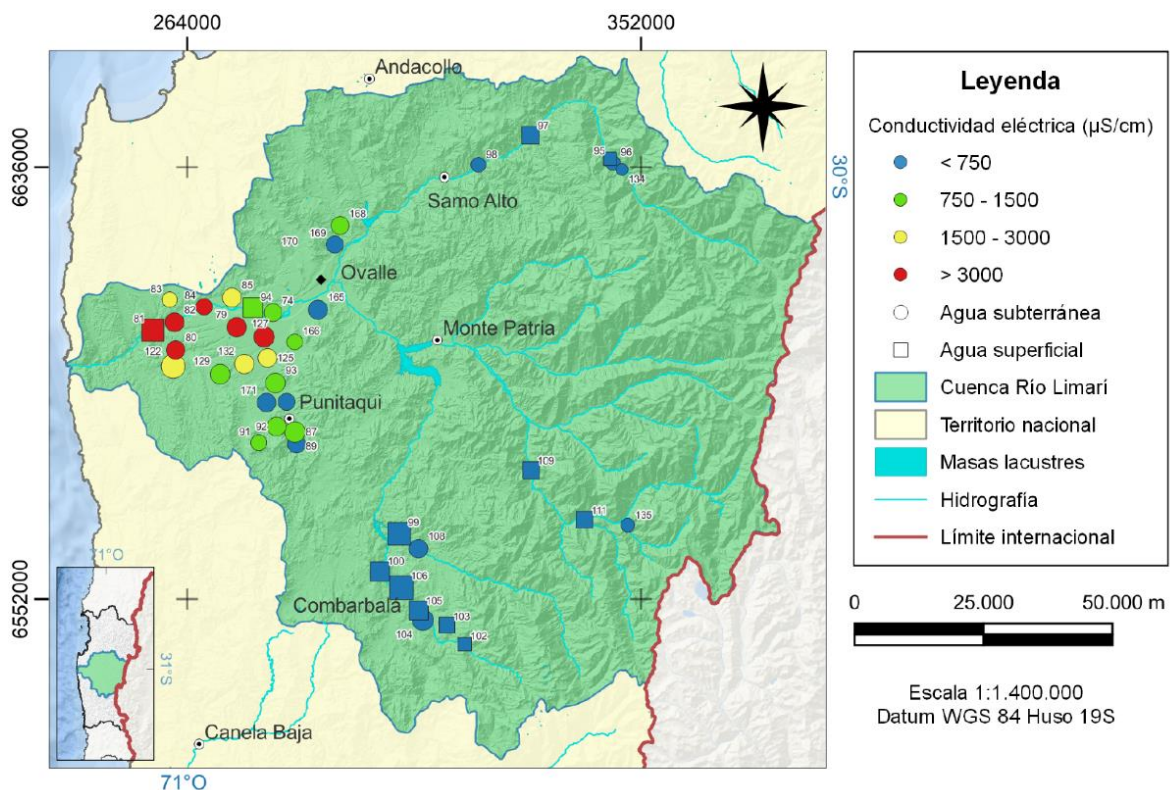


Figura 4.80: Distribución espacial pH dentro de la cuenca Río Limarí.

La conductividad eléctrica presenta gran variación en sus valores ya sea muestra superficial o subterránea, ya que se han medido valores entre los 280 y 5400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Al observar el mapa de distribución, se ve que los valores menores en los afluentes del río Limarí en la sección media de la cuenca, y los mayores, superando los 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en el tramo bajo de río Limarí. Este aumento es más notorio en cotas menores a la ciudad de Ovalle.

Las rocas sedimentarias que conforman la mayor parte de la litología de la cuenca presentan naturalmente compuestos se disocian fácilmente en iones con el agua. La conductividad aumentaría en el sentido del movimiento de las aguas subterráneas por efectos del intercambio acuífero-río desde el embalse La Paloma hasta la parte baja del río Limarí. A partir de las principales actividades de la zona, no se descarta la posible incorporación de sales disueltas de actividades antrópicas, principalmente, percolación de agua de riego.

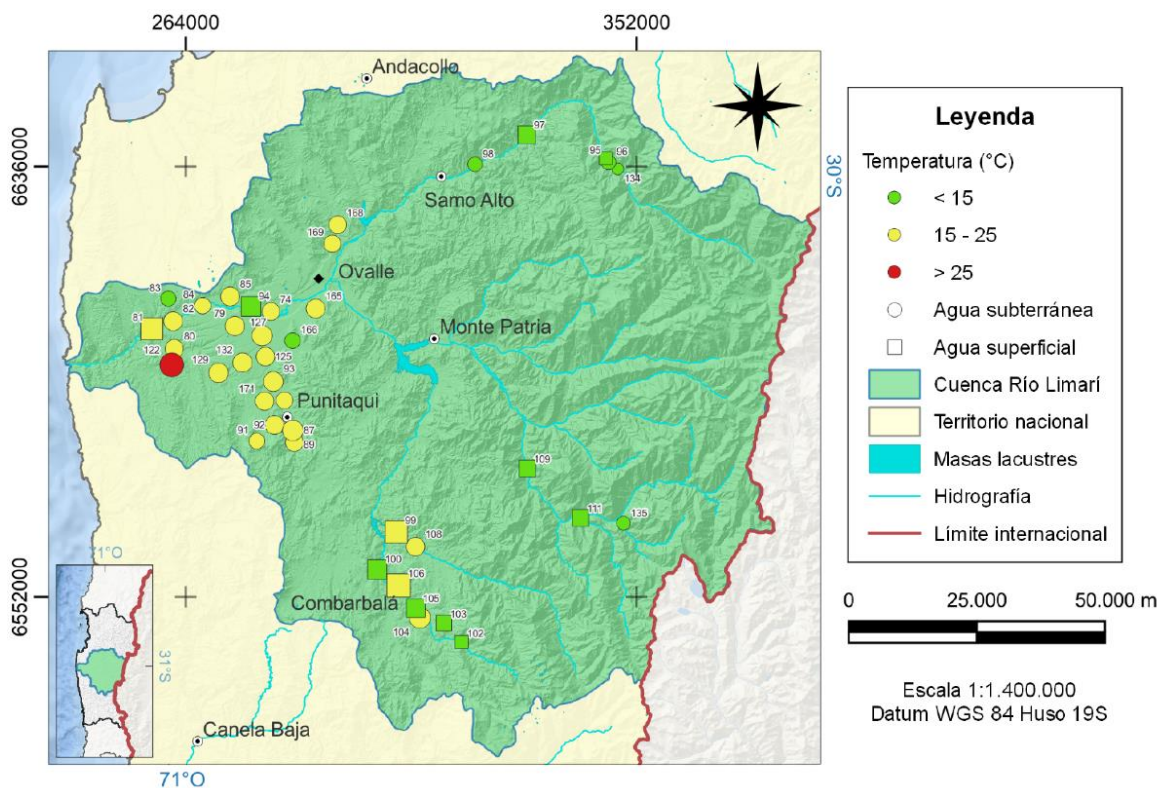


Figura 4.81: Distribución espacial Conductividad Eléctrica dentro de la cuenca Río Limarí.

Se aprecia que los valores temperatura de aguas subterráneas van desde los 15°C a los 25°C, siendo una excepción la muestra n°122 al oeste que alcanza los 26.5°C, correspondiente a agua termal. En aguas superficiales las temperaturas son menores a 15°C en sector norte y este y van en aumento hasta los 18°C hacia el oeste y sur de la cuenca. En general la temperatura de las aguas subterráneas es estable por lo que valores bajos se asocian a zonas de recarga y valores altos a zona de descarga.

Las variaciones en elementos mayoritarios en la cuenca Río Limarí se pueden observar espacialmente en las figuras 4.82 - 4.84. A continuación, la distribución de aniones a lo largo de la cuenca.

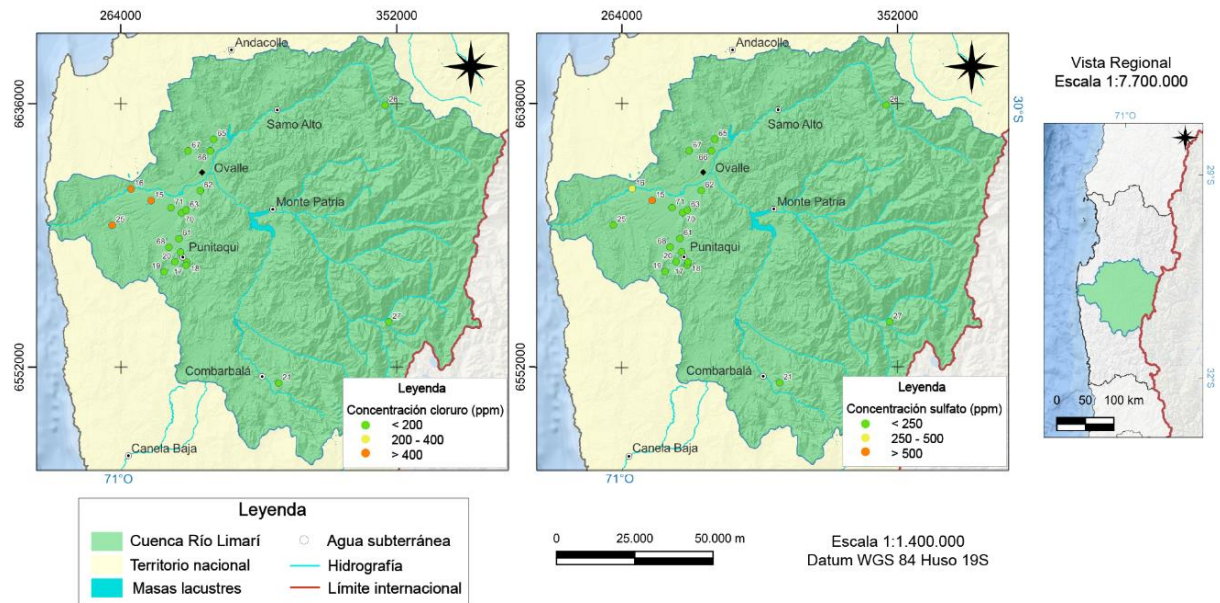


Figura 4.82: Distribución espacial concentración Cloruro y Sulfato en cuenca Río Limarí.

La distribución espacial de las concentraciones de **cloruro** muestra un aumento hacia las zonas más bajas de la cuenca, aguas abajo de la ciudad de Ovalle. Los pozos ubicados en ese tramo muestran valores superiores a 400 ppm. La muestra n°15 corresponde a medición en compañía pisquera de Chile, n°16 es medición en APR Tabalí y, n°25 corresponde a medición en Termas de Socos. Su origen podría restringirse a un aporte de Cl^- por la evaporación de agua marina, que luego precipitan en la Cordillera de la Costa, escurren e infiltran acumulándose en las aguas subterráneas, por causa de contaminación por vertidos urbanos e industriales o, en caso de la muestra hidrotermal, la interacción del fluido con la roca por la cual asciende.

La concentración de **sulfato** en los pozos a lo largo de la cuenca se encuentra sin grandes variaciones y bajo las 250 ppm. Estos valores aumentan gradualmente hacia el suroeste de Ovalle, lo cual se refleja en muestras n°15 (790 ppm) y n°16 (490 ppm), al igual que con concentraciones de cloruro. Estos valores son atribuibles a contaminación por actividad antrópica principalmente (urbana, industrial), debido a que los desechos industriales, liberan sulfuro el cual es arrastrado por el agua de lluvia y se oxida en sulfato (Custodio y Llamas, 1983) y por alteración en secuencias de rocas volcano-sedimentarias continentales del Jurásico Medio Superior que afectó la química del agua al interactuar con la roca.

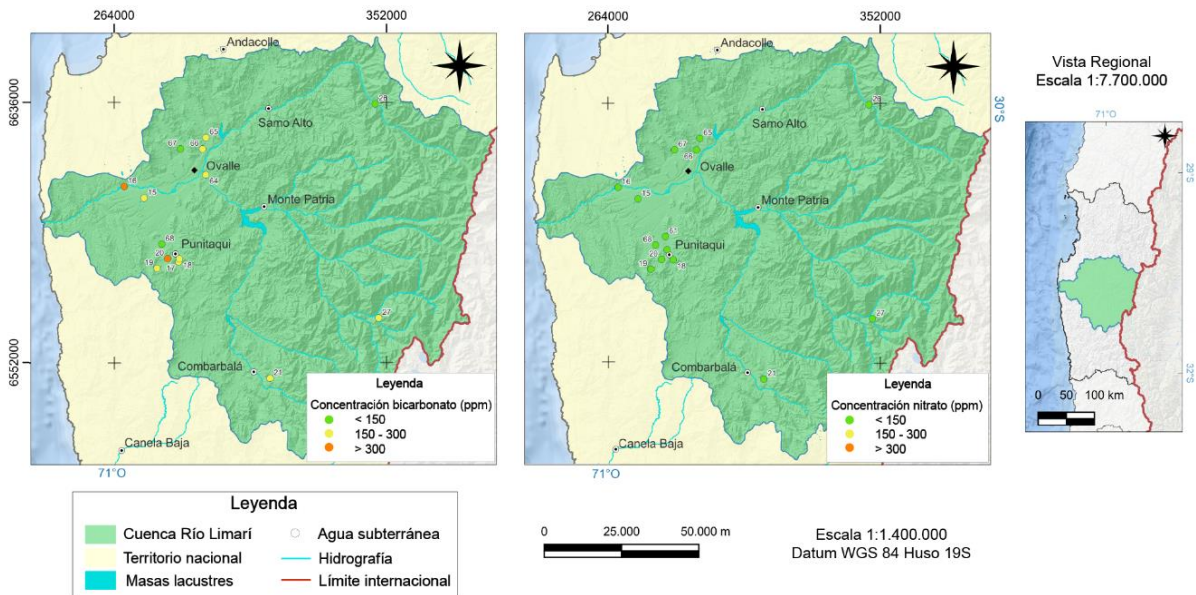


Figura 4.83: Distribución espacial concentración Bicarbonato y Nitrato en cuenca Río Limarí.

Las concentraciones de **bicarbonato** son mayormente superiores a 150 ppm y van en aumento hacia el suroeste de la cuenca, tramo bajo de río Limarí desde Ovalle y en sector de Punitaqui. Muestras n°16 y 20 son las de mayor concentración en este ión y alcanzan las 500 ppm. Son pozos de poca profundidad y nivel freático bajo, lo que daría cuenta de aguas de relativa poco tiempo de residencia, así como también con mayores oportunidades de ser afectada por la importante actividad antrópica en superficie, aumentando la concentración de este anión.

Las concentraciones de **nitrato** en la cuenca están en niveles bajo las 25 ppm a lo largo de toda la cuenca, rango que está aceptado en la norma de agua potable. Es un anión que guarda estrecha relación con la actividad agrícola y sus procesos de contaminación difusa.

A continuación, la distribución de cationes Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} a lo largo de la cuenca.

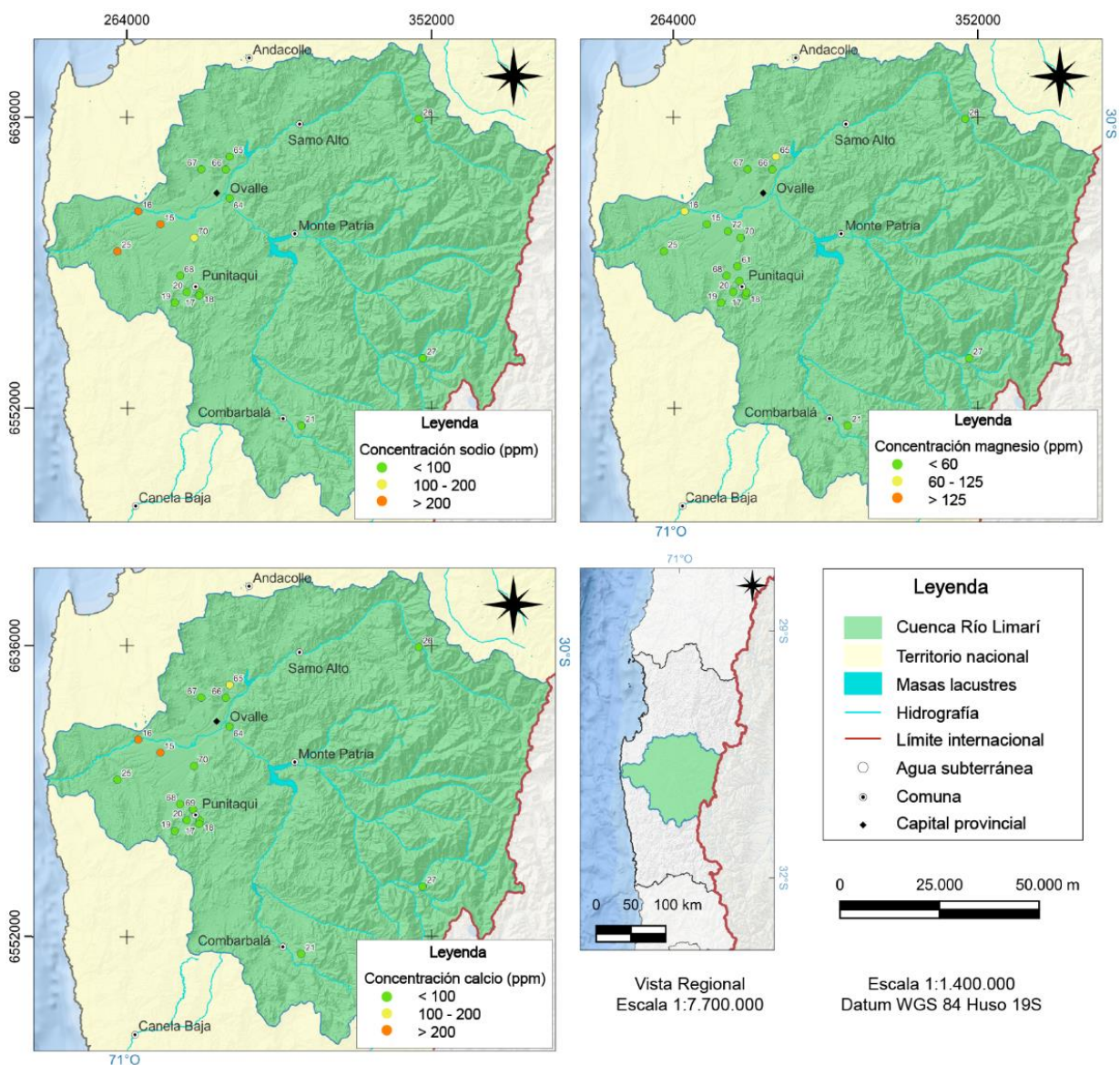


Figura 4.84: Distribución espacial concentración Sodio, Magnesio y Calcio en cuenca Río Limarí.

Las concentraciones de **sodio** son menores a 100 ppm a excepción de las muestras en el tramo bajo de río Limarí, al suroeste de Ovalle, los cuales alcanzan valores de 300 y hasta 940 ppm, siendo este último en pozo de Compañía Pisquera de Chile. Las unidades geológicas con las que entra en contacto el agua subterránea, rocas ígneas intrusivas que afloran en la zona, pueden influir en la composición química de estas (Custodio y Llamas, 1983).

El **magnesio** se mantiene bajo 60 ppm y alcanza 90 ppm en muestra n°16, ubicada en tramo bajo de la cuenca. Proviene de la disolución de la mayoría de los suelos, minerales ferromagnésicos y de algunas rocas que contienen carbonatos (unidad Kism en cotas mayores, por ejemplo). También puede determinarse su presencia como un elemento contaminante desde una posible fuente de contaminación difusa en la cuenca al ser terreno de uso agrícola.

La concentración de **calcio** generalmente se mantiene inferior a 100 ppm, con excepción de muestras en tramo bajo de río Limarí que alcanzan 730 ppm (n°15) y 290 ppm (n°16). Se

puede observar que son pozos con alto contenido de algunos de los elementos mayoritarios analizados respecto a su entorno aguas arriba, pudiendo reafirmarse una contaminación por infiltración de aguas de riego hacia el acuífero.

Las variaciones en elementos traza en la cuenca Río Limarí se pueden observar espacialmente en Figuras 4.85 - 4.88.

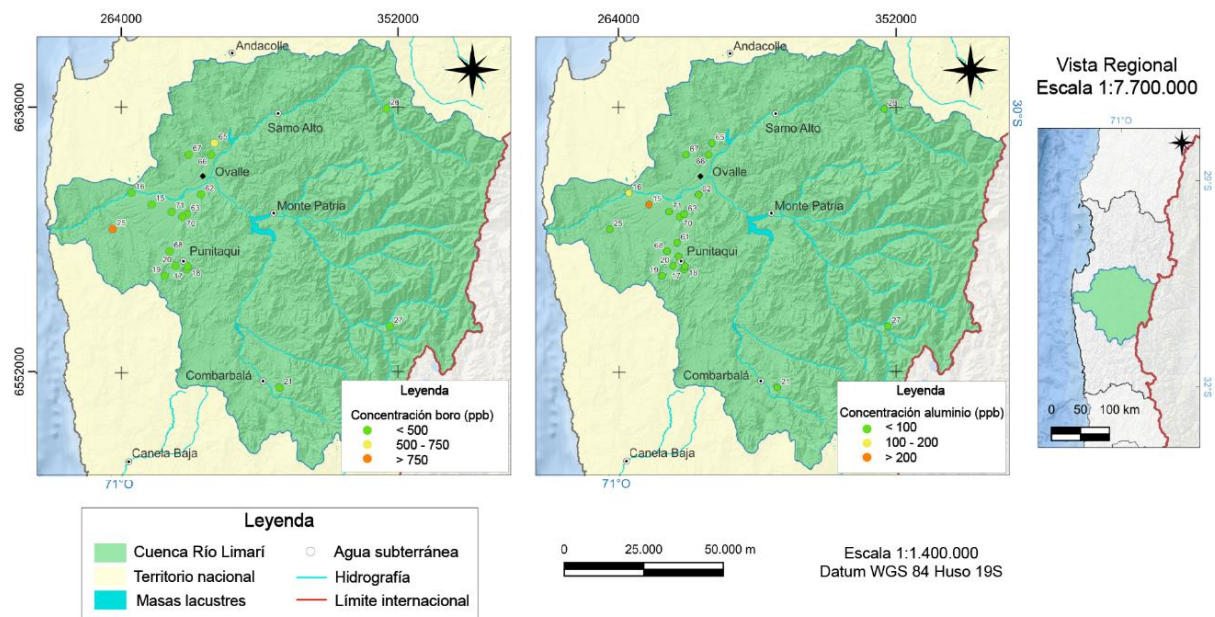


Figura 4.85: Distribución espacial concentración Boro y Aluminio en cuenca Río Limarí.

Las concentraciones de **boro** se encuentran bajo las 500 ppb, sin embargo, la muestra correspondiente a termas de Socos supera 910 ppb. Su posible proveniencia es por la mayor interacción agua-roca.

Aluminio muestra un aumento de su concentración hacia parte baja de la cuenca, no superando las 200 ppb, a excepción de 2 muestras al noroeste (n°67) y al suroeste de Ovalle (n°15) con concentraciones de 210 ppb y 700 ppb, respectivamente. Estos pozos están bajo el uso de Compañía pisquera de Chile y ENAMI. Proviene posiblemente de los minerales aluminosilicato complejos e insolubles, abundantes en rocas ígneas y sedimentarias, los cuales por procesos de meteorización e intemperización se transforman en arcillas que por fenómenos de lixiviación y escorrentías adicionan aluminio continuamente a los cursos de agua.

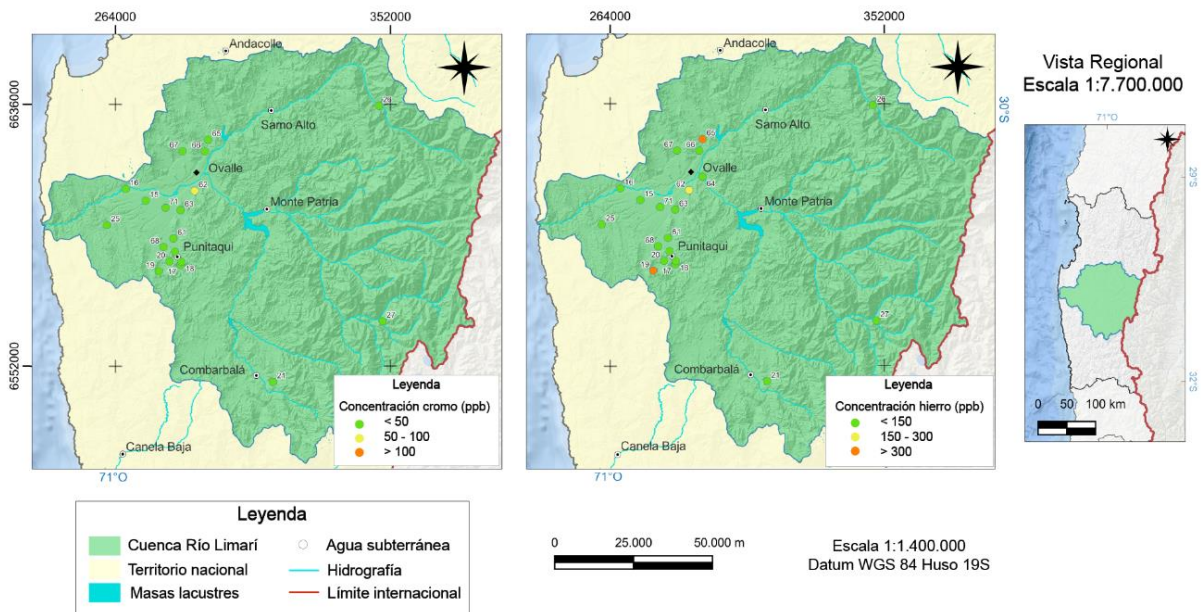


Figura 4.86: Distribución espacial concentración Cromo y Hierro en cuenca Río Limarí.

Las concentraciones de **romo** se mantienen bajo las 50 ppb a lo largo de la cuenca a excepción de muestra n°62 con un valor de 100 ppb de cromo. Este valor ligeramente más alto puede vincularse a que se localiza en zona de uso urbano e industrial (CIREN, 2012).

La concentración de **hierro** supera las 300 ppb en pozos alejados espacialmente, al norte de Ovalle (muestra n°65) con 330 ppb y al suroeste de Punitaqui (muestra n°19) con 450 ppb. La muestra n°62 también posee una concentración media de 250 ppb. Este elemento en aguas subterráneas proviene de la actividad minera sobre la franja metalogénica, además existiendo infiltración de fluidos desde tranques de relave tanto activos como inactivos actualmente.

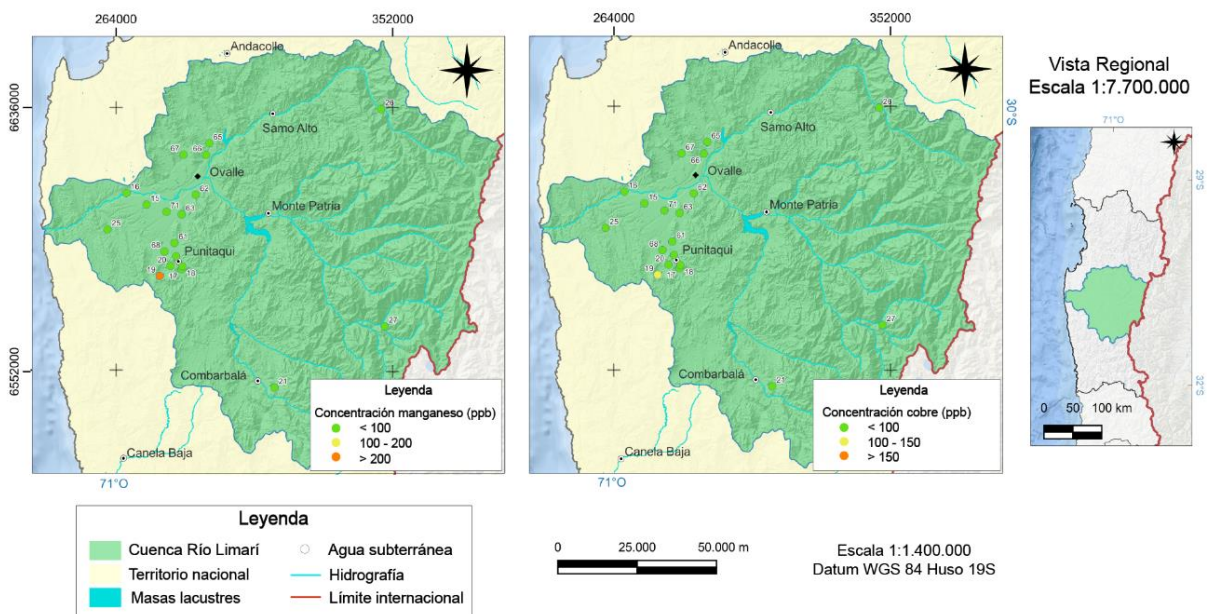


Figura 4.87: Distribución espacial concentración Manganeso y Cobre en cuenca Río Limarí.

Por otra parte, la muestra n°19, pozo utilizado para actividades agrícolas, presenta una concentración de **manganeso** de 2370 ppb y en general las muestras a lo largo de la cuenca son igual o menores a 5 ppb.

La concentración de **cobre** se mantiene bajo las 100 ppb dentro de la cuenca, sin embargo, la muestra n°19 logra un valor de 150 ppb en la parte suroeste de Punitaqui, el cual es un pozo utilizado para actividades agrícolas. Los altos valores tanto de manganeso como de cobre en muestra n°19, se interpreta que el acuífero se encuentra contaminado de forma antropogénica por esta actividad. Dada la presencia de yacimientos, es innegable una contaminación natural, la que podría estar siendo acelerada por las faenas de las mineras de la zona.

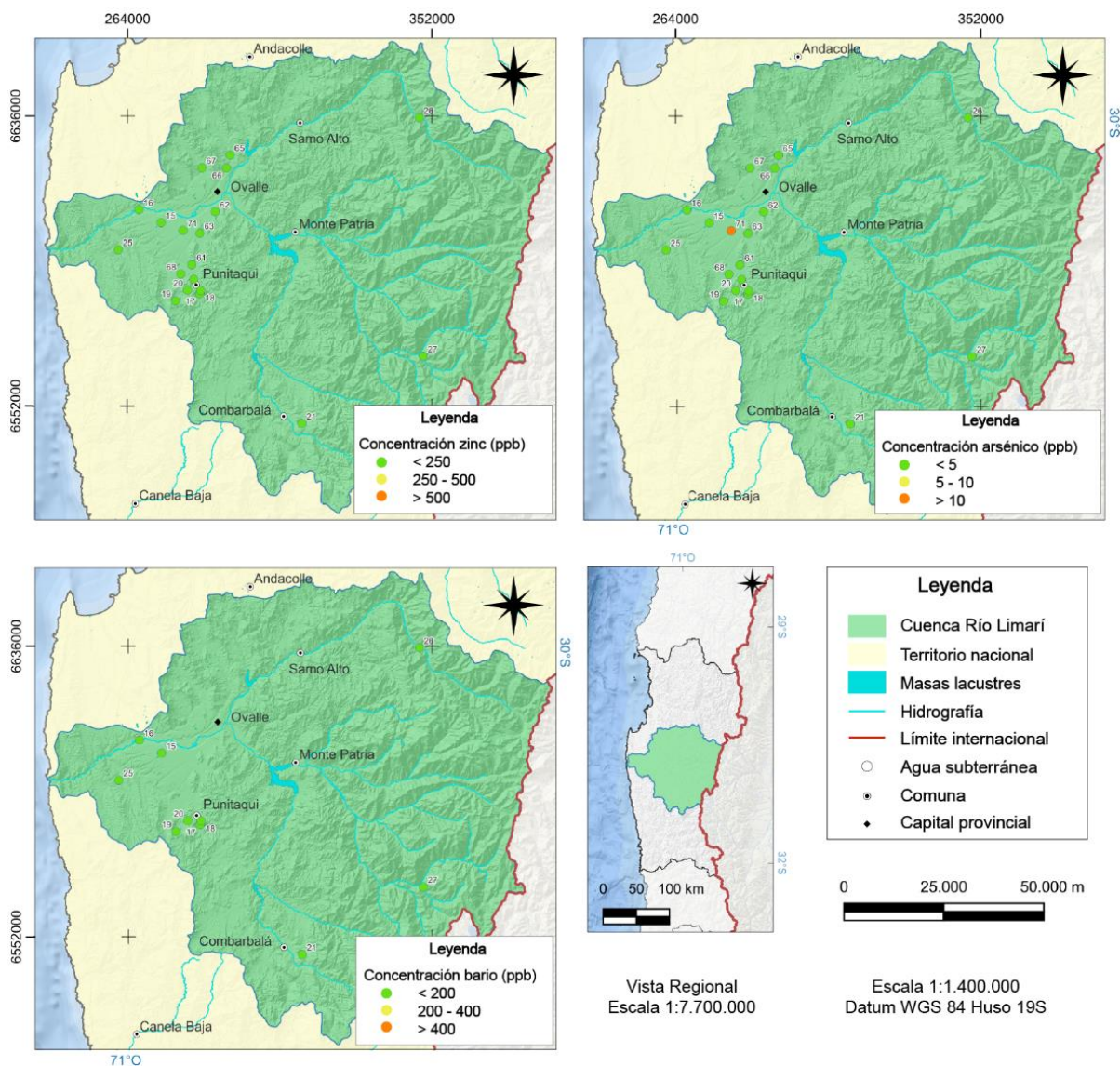


Figura 4.88: Distribución espacial concentración Zinc, Arsénico y Bario en cuenca Río Limarí.

Los valores de **zinc** se mantienen bajo 250 ppb a lo largo de toda la cuenca. En el caso del **arsénico**, se mantiene en una concentración baja, inferior a 5 ppb, sin embargo, la muestra n°71 tomada desde pozo con usos agrícolas, tiene concentraciones altas que alcanzan las 50 ppb. Al

ser puntual esta alta concentración, correspondería a una contaminación antropogénica. Todas las muestras presentan un nivel de **bario** dentro de los valores aceptables por normativa.

Para distinguir el proceso de evolución del agua de manera más local en la cuenca Río Limarí, se realizaron diagramas de Piper (Figura 4.89) y diagramas de Stiff georreferenciados (Figura 4.90). En el siguiente diagrama se muestran 11 composiciones químicas recopiladas, 8 son muestras hidroquímicas tomadas por proyecto DGA (2022) y 3 son provenientes de expedientes (análisis realizados en agosto 2000, enero 2002 y junio 2002).

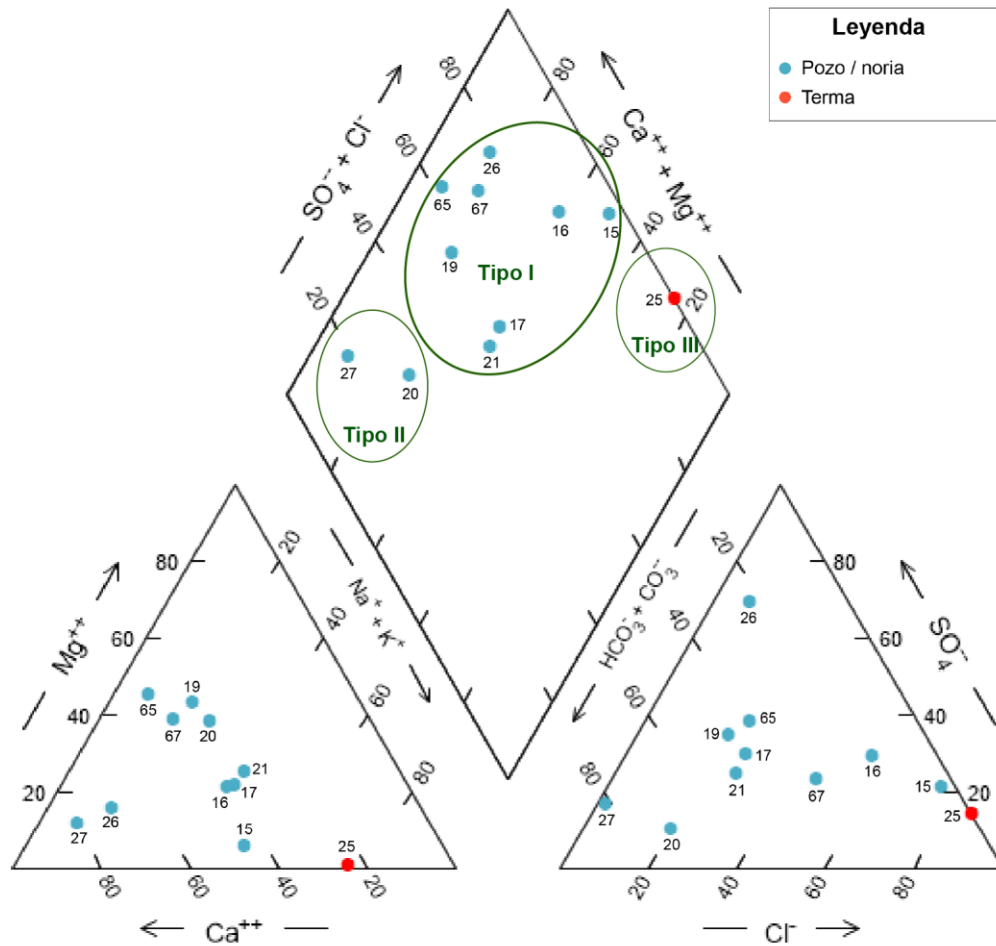


Figura 4.89: Diagramas Piper para muestras hidroquímicas en cuenca Río Limarí.

Las muestras corresponden a aguas subterráneas tomadas desde pozos y una de ellas es agua termal. Se logra identificar tres familias, principalmente agua subterránea de tipo sulfatada-clorurada cálcica-magnésica (Tipo I), dos muestras en zona sur de la cuenca que se encuentran en el campo de aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas (Tipo II) y la muestra termal corresponde a aguas de composición clorurada sódica (Tipo III).

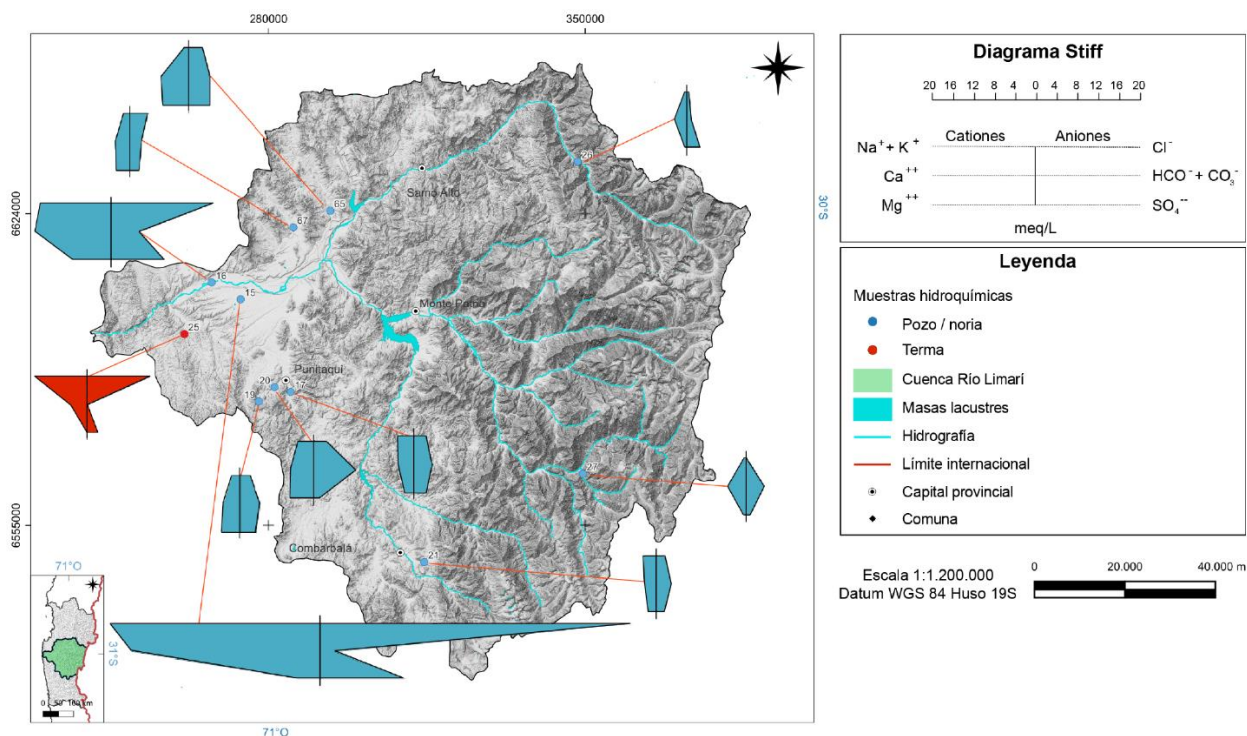


Figura 4.90: Diagramas Stiff georreferenciados de muestras hidroquímicas en cuenca Río Limarí.

Para estudiar su distribución espacial se elaboraron diagramas de Stiff en cada estación de toma de muestras, tal como lo ilustra la Figura 4.90. Se aprecia un aumento de las concentraciones de los iones en general a lo largo de la dirección del flujo de aguas subterráneas, donde tramo alto de la cuenca presenta composiciones sulfatadas cálcicas al noreste y bicarbonatadas cálcicas al sureste. El aumento importante de la carga iónica es notorio aguas abajo de la localidad de Ovalle, debido a un aumento leve de las concentraciones de Mg^{2+} y se tornan cada vez más cloruradas, teniendo composiciones cloruradas-sulfatadas sódicas y cálcicas. En la zona sur de la cuenca la composición del agua subterránea es mayormente bicarbonatada cálcica y hacia el noroeste presentan un aumento en el catión Mg^{2+} que se observa en gran parte del tramo medio de la cuenca. A partir de estos resultados, se aprecia una gran diversidad de composiciones a lo largo de la cuenca por su extensión y heterogeneidad. Aguas siguen un enriquecimiento en sales disueltas hacia cotas inferiores que condice con los tiempos de residencia en el acuífero de las aguas en este sentido. Los pozos aguas abajo de la localidad de Ovalle son de poca profundidad, con nivel freático somero y, además, el sector se caracteriza por actividad agrícola e industrial, siendo foco de infiltración de aguas de riego al acuífero, aumentando la concentración de iones disueltos como Na^+ , Ca^{2+} y Cl^- .

Interpretación general análisis hidroquímicos

La composición de las aguas subterráneas y su variación a lo largo de las cuencas se relaciona con la conductividad eléctrica como se esperaría, debido a que valores menores se observa en tramos de zona alta, media y al interior (en caso de cuencas costeras) y va en aumento hacia tramo bajo de estas y en sentido del flujo del agua, asociado a aumento de salinidad en su trayectoria como consecuencia de tiempo de residencia, flujos por medios costeros, percolación de sales relacionada con los usos de suelo o el alto grado de interacción río-acuífero.

La litología es la principal fuente de los elementos presentes en las aguas subterráneas debido a la interacción agua-roca, sin embargo, el aporte desde la recarga tanto en zona alta como en tramo bajo de cuencas cambia químicamente este recurso y depende de su origen. La mayoría de estos elementos se encuentran dentro de los rangos aceptables en normas de agua potable y de riego, sin embargo, aquellos que no cumplen con estos límites son aquellos provenientes de infiltraciones por actividades agrícolas e industriales de la región.

Las franjas metalogénicas existentes y la actividad minera asociada traen consigo la presencia de metales en el agua subterránea (Cu, Fe, Mn, Cr) y aún en rangos que posiblemente no son perjudiciales según norma de riego y de agua potable en cuencas de Río Limarí y Río Elqui.

Finalmente, la conexión entre agua subterránea y agua de mar infiltrada en el continente queda al descubierto por la variación en la composición química de muestras en tramo bajo de cuencas como en la cuenca costera entre Río Elqui y Limarí en su totalidad, especialmente, en aumento de valores de la conductividad eléctrica y concentraciones de cloruro y sodio.

4.5. Isótopos estables

Los isótopos proporcionan una herramienta complementaria para distinguir diferentes fuentes de agua y zonas de recarga. Los isótopos naturales ^{18}O y D son un componente intrínseco

de la molécula de agua, por lo que son trazadores ideales (Clark, 2015). Se distribuyen selectivamente en cada etapa del ciclo hidrológico, desde la evaporación primaria sobre los océanos, pasando por la condensación y la precipitación, hasta la recarga de las aguas subterráneas y la escorrentía de vuelta a los mares.

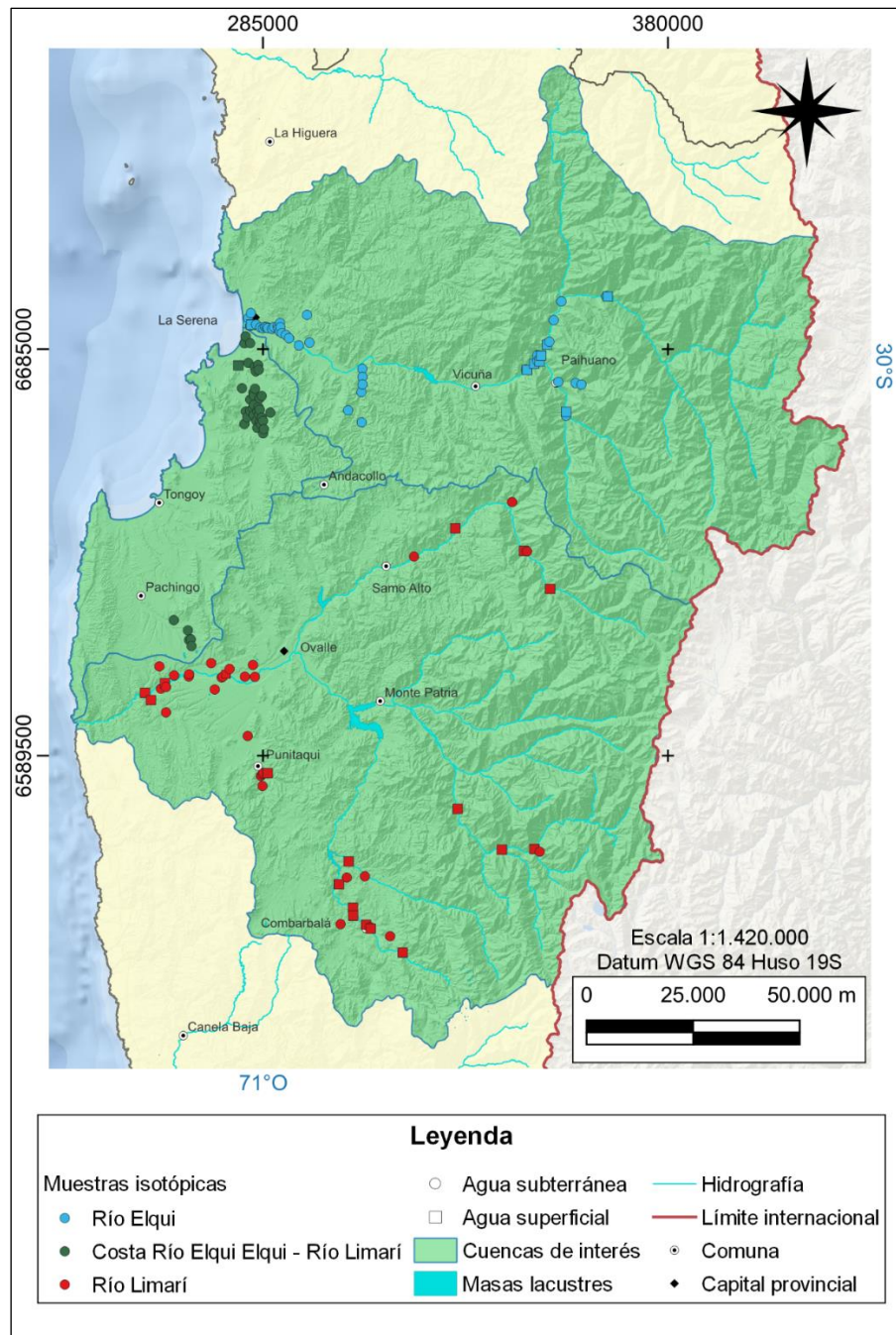


Figura 4.91: Mapa distribución muestras isotópicas obtenidas en campaña de terreno de proyecto (DGA, 2022).

Craig (1961) observó una fuerte correlación entre ^{18}O y D en las aguas dulces globales. La línea de regresión para estos datos es la "línea de agua meteórica global" (GMWL), definida como:

$$\delta D = 8 \delta ^{18}\text{O} + 10\text{‰}$$

La Figura 4.92 representa la correlación de los isótopos estables del agua δD y $\delta^{18}O$ junto a GMWL y la Línea de Agua Meteórica Local (MWL) a los 30°S calculada por Oyarzún et al. (2016), $\delta D = 8,5 \delta^{18}O + 16\text{‰}$. A pesar de que esta última es resultado de un estudio dentro de la cuenca Río Limarí, se integró en el análisis del resto de cuencas de interés debido a que entre ellas comparten parámetros climáticos y geográficos.

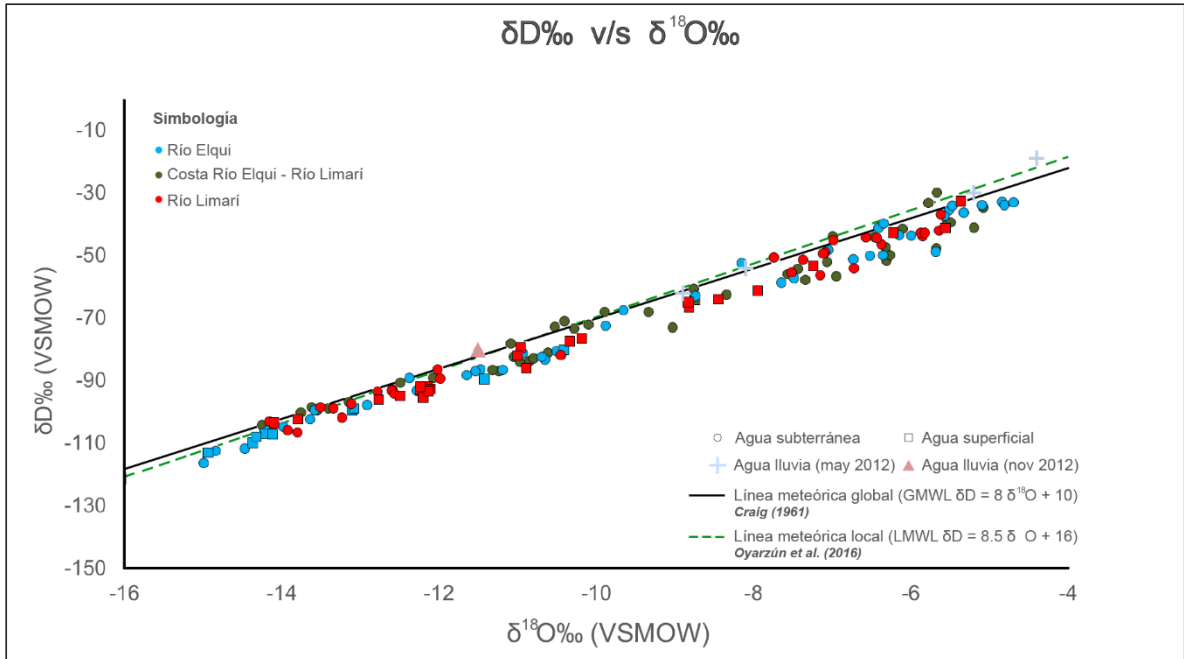


Figura 4.92: Gráfico de correlación de isótopos estables del agua δD y $\delta^{18}O$, junto a GMWL (Craig, 1961) y MWL (Oyarzún et al., 2016).

Las muestras de agua superficial y agua subterránea analizadas, se encuentran en su mayoría alineadas y ligeramente por debajo de línea meteórica local (LML), con excepción de muestras de agua subterránea en cuencas costeras entre Río Elqui y Río Limarí, una muestra de agua superficial de cuenca Río Elqui y una de agua subterránea de cuenca Río Limarí.

La línea meteórica local es subparalela a la GMWL, más enriquecida en isótopos pesados. En las regiones áridas se ha observado que la composición isotópica de las aguas subterráneas puede variar considerablemente de la precipitación local. La causa de este enriquecimiento isotópico se debe a la evaporación durante la escorrentía que ocurre antes de la infiltración. Esta evaporación es desde la zona no saturada o desde la superficie freática (Clark y Fritz, 1997).

En general, esta línea de tendencia sigue una orientación paralela a la línea meteórica local y global, pero ubicada bajo ésta, pudiendo concluirse que las muestras tienen una señal isotópica propia de aguas empobrecidas en deuterio por efecto de la evaporación.

A continuación, se analizará cada cuenca de interés.

4.5.1. Cuenca Río Elqui

Se observa que las muestras isotópicas en cuenca de Río Elqui se concentran en sector de Paihuano, cercanas al curso de río Turbio y río Claro, en sectores de Quebrada Arrayán y Elqui bajo, ubicados en tramo bajo de la cuenca.

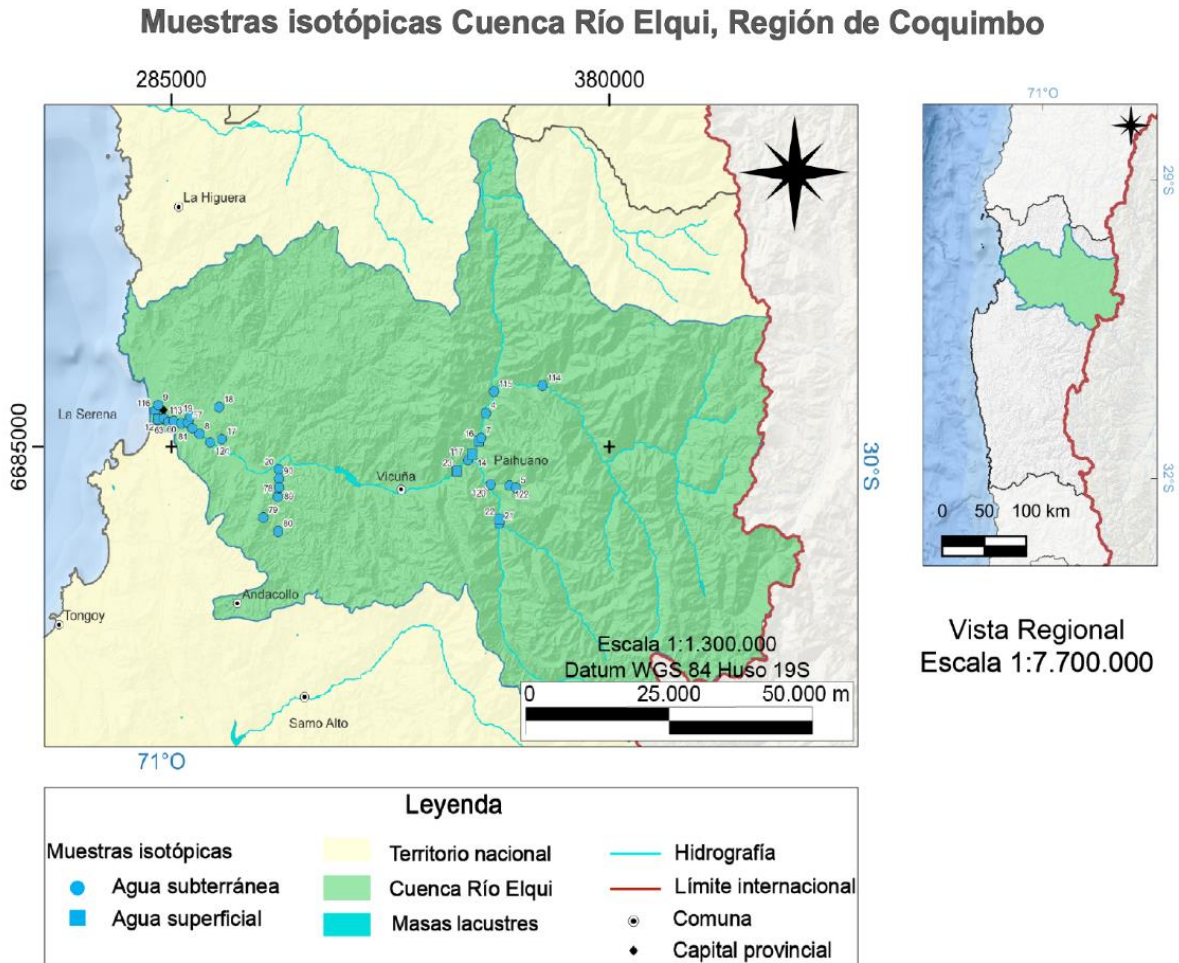


Figura 4.93: Distribución espacial de muestras isotópicas cuenca Río Elqui.

La Figura 4.94 muestra la señal isotópica para aguas subterráneas. De acuerdo con esta huella, se aprecia que muestras en zona baja de la cuenca poseen una huella dentro de un amplio rango entre -14 y -7 $^{18}\text{O}\text{‰}$ y los -100 y -50 $\text{D}\text{‰}$. El rango de la huella isotópica de las muestras en zona alta de la cuenca es amplio como los de zona baja, entre los -13.6 y -6.5 $^{18}\text{O}\text{‰}$ y los -110 y -40 $\text{D}\text{‰}$. Probablemente existen otros parámetros que generan estas variaciones, como diferencias meteorológicas que afecten la temperatura de la zona o cantidad de precipitación (Dansgaard, 1964).

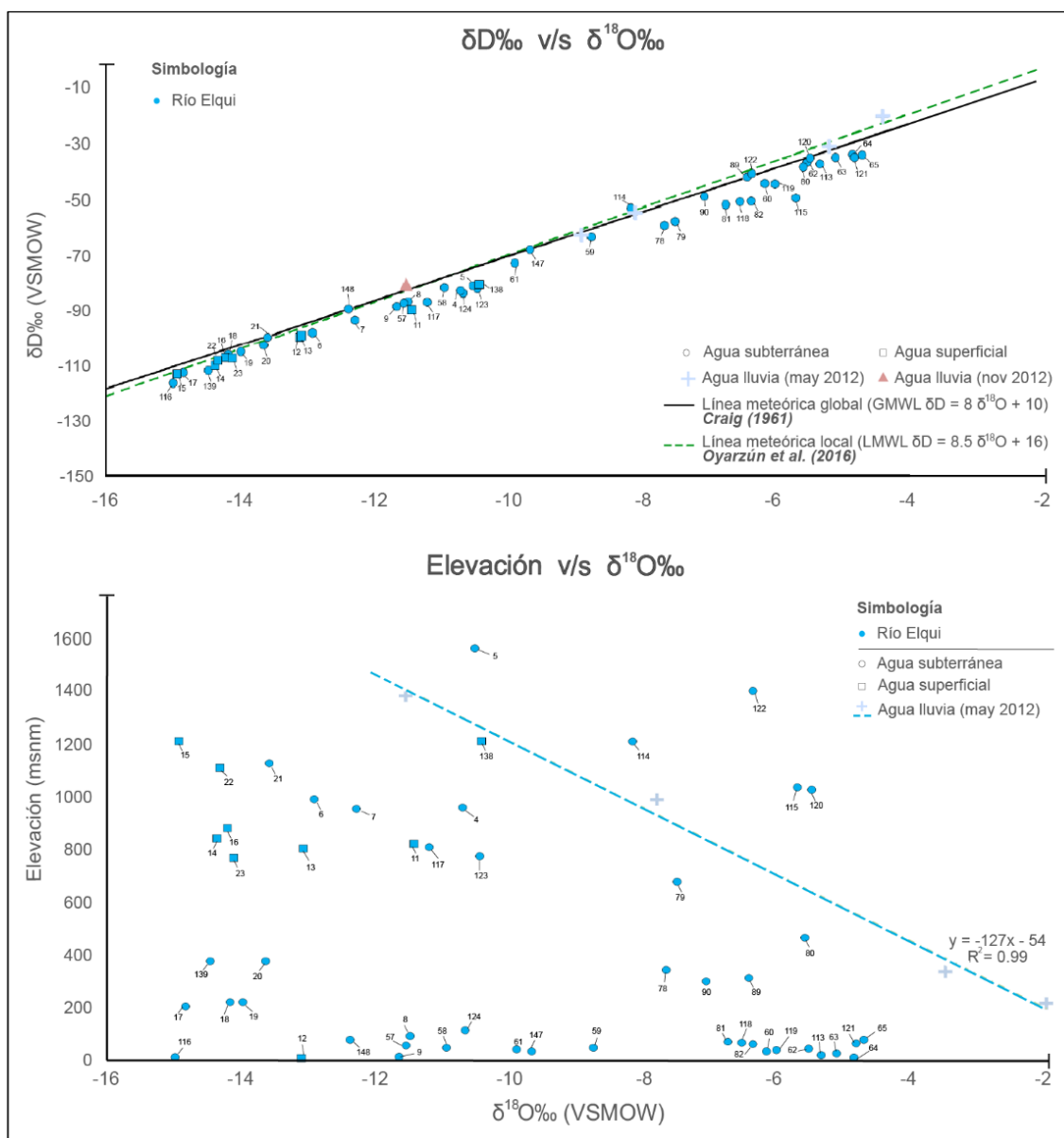


Figura 4.94: Composición isotópica del agua de cuenca Río Elqui (gráfica superior) y correlación Oxígeno-18 y elevación muestras (gráfica inferior).

Las muestras n°18, 21, 114 y 148 se encuentran ubicados sobre la línea meteórica local, lo que puede indicar una contribución de agua evaporada en un clima árido con una relativa baja humedad en la atmósfera o agua de lluvia evaporada durante la precipitación y/o infiltración (Appelo y Postma, 2009).

La línea de tendencia de aguas superficiales y subterráneas sigue una orientación paralela a la línea meteórica local, pero ubicada bajo esta. Probablemente las muestras tienen una señal isotópica propia de aguas empobrecidas en deuterio por efecto de la evaporación, como sucede en el riego (Schroeder et al., 1991). En conjunto, todas las muestras se encontraban en general muy próximas entre sí, lo que, además del origen común ya comentado, apunta probablemente a una relación entre los componentes de las aguas superficiales y subterráneas.

Las aguas superficiales (Figura 4.94, superior) muestran diferentes composiciones a lo largo de la cuenca. Las muestras más empobrecidas en $^{18}\text{O}\%$ y $\text{D}\%$ son de río Turbio y río Claro que en comparación con muestras aguas abajo de la localidad de Paihuano, enriqueciéndose en dirección al flujo del agua. Las muestras n° 11 y 138 (segunda medición en pozo de muestra 15) se encuentran en zona alta de la cuenca y son las aguas que más se alejan de la tendencia.

Podría guardar relación con que han experimentado un proceso de evaporación a medida que fluyen en contacto con la atmósfera, enriqueciéndose de isótopos estable y generando una pendiente distinta a la de la Línea de Agua Meteorica (Clark, 2015). Según Aravena y Suzuki (1990) este enriquecimiento isotópico puede ser causado por la evaporación ocurrida antes y durante la infiltración en las zonas de recarga. Cabe destacar que la composición isotópica del agua subterránea no es tan diferente a la composición de la precipitación local por lo que el factor de evaporación en el enriquecimiento isotópico del agua no es tan significativo.

La relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y la altitud (Figura 4.94, inferior) revela la altura a la que fueron precipitadas las aguas al interceptar los valores de $\delta^{18}\text{O}$ con la variación vertical del contenido isotópico a los 33°S . Las muestras más cercanas a la costa se encuentran a una altitud media de 50 msnm y fueron precipitadas entre los 190 y 780 msnm, por lo que han recorrido entre 140 y 730 m en la vertical para llegar al sistema. Existen excepciones de muestras de la costa, más distanciadas del curso de agua, que están a una altura media de 200 m y el agua fue precipitada entre los 1700 y 1900 m.s.n.m., considerándose como casos anómalos debido a que ha bajado 1500 m a 1700 m desde su punto de precipitación aproximadamente por lo que su proveniencia debe ser tanto por zonas de recarga aguas arriba como por infiltración local.

Aguas arriba, en Quebrada Arrayán, muestras se encuentran a una altitud media de 500 msnm y fueron precipitadas entre los 600 y 1800 m, donde esto último corresponde a aquellas más cercanas al curso del río. En la vertical se recorrió entre 100 y 1300 m. Las muestras en zona alta, en la unión de río Turbio y Claro, se encuentran a altitud de 500 a 1200 msnm pero fueron precipitadas entre los 1250 y 1850 m, de manera que han recorrido hasta 600 m en la vertical hasta su posición.

En general, se observó cierta tendencia de las señales isotópicas a ser más negativas en zonas de mayor altitud, y es consistente con su origen meteórico simple. Los patrones que controlan esta señal a lo largo de la cuenca son las precipitaciones, en conjunto con los procesos evaporativos, que ocurren a lo largo del flujo como en los embalses. Se verificó además el efecto de la altitud, en que las aguas más empobrecidas en isótopos pesados están en subcuencas de río Turbio y río Claro, debido a que son alimentadas por aguas recargadas a gran altitud y no por recargas directas desde los embalses o precipitación local. Las más enriquecidas fueron las aguas de la subcuenca río Elqui por su cercanía a la costa y también por la ocurrencia en forma rápida de infiltración luego de la precipitación.

Muestras n°5, 114, 115, 120 y 122, se encuentran sobre la línea de precipitación, lo que se debe a los procesos de recarga local. En general, aguas superficiales y subterráneas no mostraron mayor variación en sus señales isotópicas, lo que permite establecer una posible interacción entre éstas como aporte de manantiales a corrientes superficiales o viceversa.

4.5.2. Cuenca Costera Río Elqui - Río Limarí

Se observa que las muestras isotópicas en cuenca costera se concentran en valles de sector de norte, en localidades de Cerrillos y Coquimbo, como en sector Sur en quebrada Seca, cercanas al curso de río Limarí.

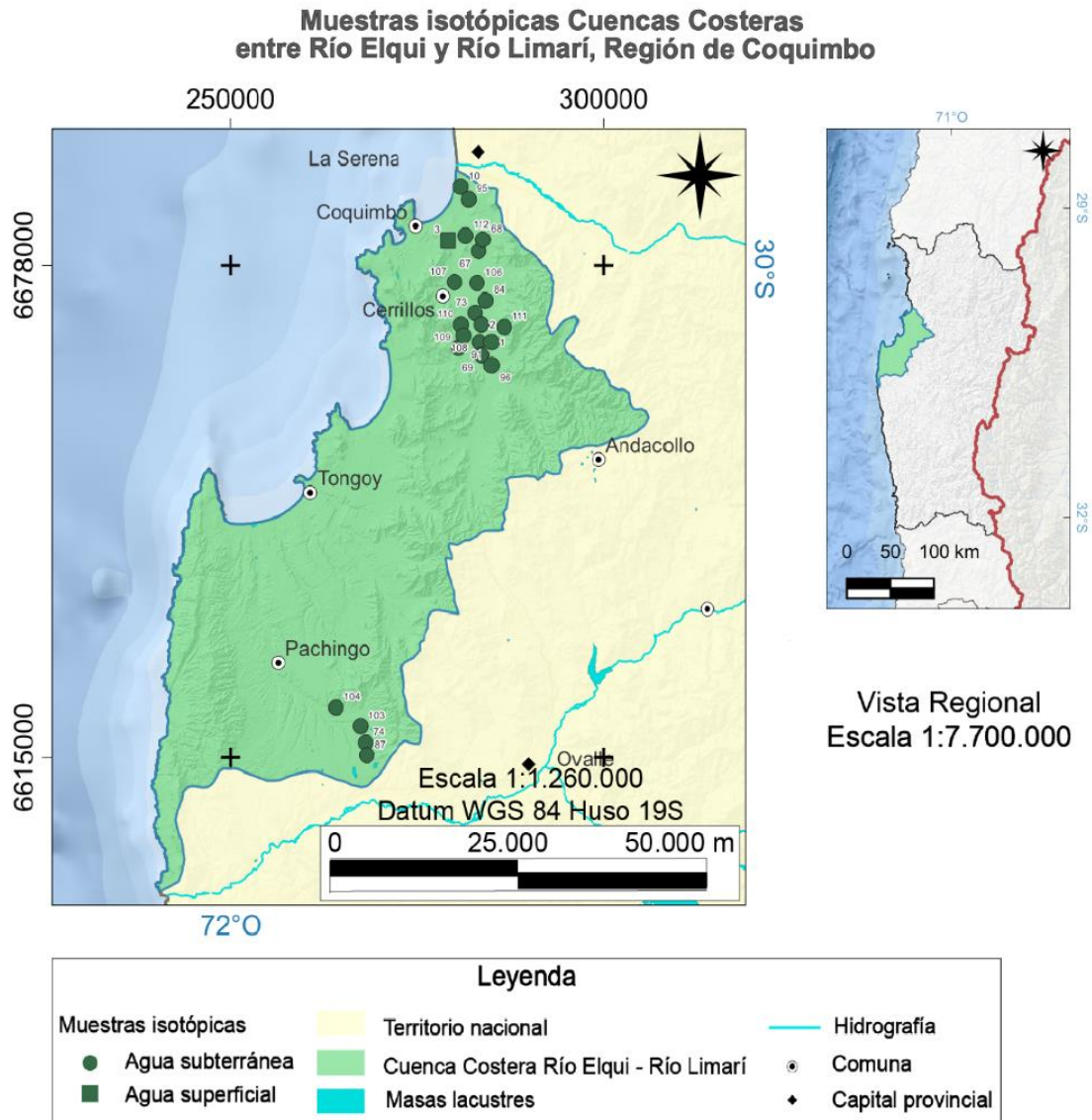


Figura 4.95: Distribución espacial de muestras isotópicas cuenca costera.

La Figura 4.96 muestra la señal isotópica para aguas subterráneas. De acuerdo con su huella isotópica, se aprecia que muestras en zona sur de la cuenca se encuentran en el rango entre -9 y -7 $^{18}\text{O}\text{‰}$ y los -60 y $-50\text{D}\text{‰}$, con una excepción en la muestra n°87 más cercana al límite sur de la cuenca (-5.5 $^{18}\text{O}\text{‰}$ y $-30\text{D}\text{‰}$). El resto se encuentran concentradas cercanas a la localidad de Cerrillos con una huella isotópica amplia desde -13.5 a -5 $^{18}\text{O}\text{‰}$ y $-100\text{D}\text{‰}$ a $-50\text{D}\text{‰}$, enriqueciéndose de sur a norte. Finalmente, las muestras que se ubican en la costa cercana a Coquimbo difieren su huella isotópica entre ellas de manera importante.

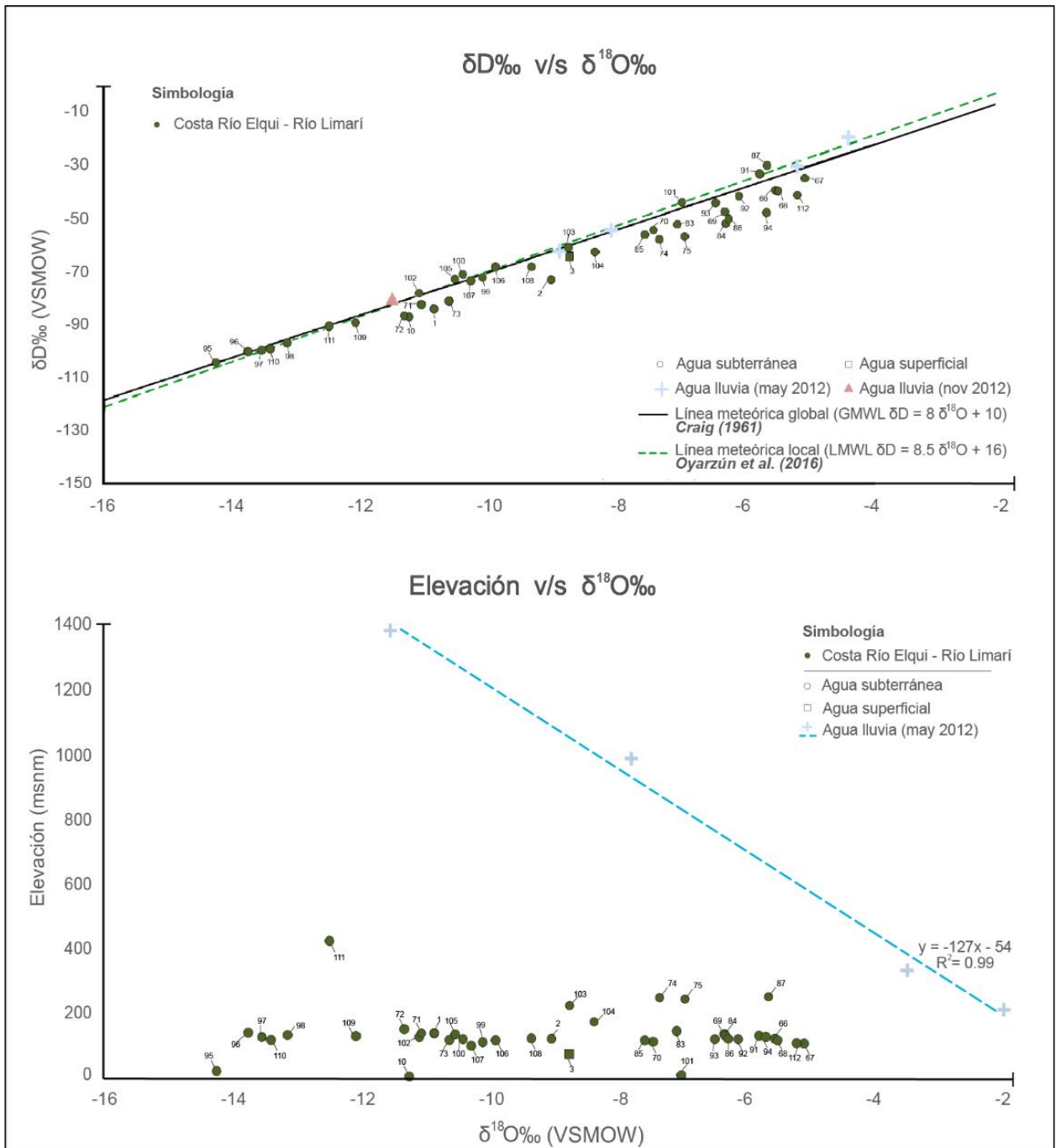


Figura 4.96: Composición isotópica del agua de cuenca costera (gráfica superior) y correlación Oxígeno-18 y elevación muestras (gráfica inferior).

Los puntos n°87, 91, 100, 101 y 105 se encuentran ubicados sobre la línea meteórica local lo que muestra el origen meteórico “directo” de estas aguas y la ocurrencia en forma rápida de infiltración luego de la precipitación, evitando el proceso de fraccionamiento isotópico.

Sólo existe una muestra de agua superficial (Figura 4.96, superior) y tiene una huella isotópica de -8.8 ¹⁸O‰ y -70D‰. La línea de tendencia de aguas superficiales y subterráneas

sigue una orientación paralela a la línea meteórica global, pero ubicada bajo esta, pudiendo concluir que las muestras tienen una señal isotópica propia de aguas empobrecidas en deuterio por efecto de la evaporación, atribuible al sistema de canales de distribución de agua de riego y su aplicación en los terrenos agrícolas, con excepción de los puntos de agua subterránea que se alejan de la tendencia.

La relación entre $\delta 18O$ y la altitud revela la altura a la que fueron precipitadas las aguas. En general, las muestras se encuentran a una altitud de 200 m máximo, a excepción de la muestra n°111 ubicada a 420 m. Las más cercanas a la costa se encuentran a una altitud media de 50 m y fueron precipitadas entre los 190 y 780 m, por lo que han recorrido entre 140 y 730 m en la vertical para llegar a su posición. Existen excepciones de muestras de la costa, alejadas del gradiente orográfico indicando que su proveniencia debe ser tanto por zonas de recarga aguas arriba como por infiltraciones locales y no por precipitaciones que ocurren en el lugar.

4.5.3. Cuenca Río Limarí

Se observa que las muestras isotópicas en subcuenca Río Limarí se concentran en zona alta, en sector de río Hurtado y río Grande, en zona media, cerca de localidad de Punitaqui y Combarbalá, y en zona baja, en valles de río Limarí.

Muestras isotópicas Cuenca Río Limarí, Región de Coquimbo

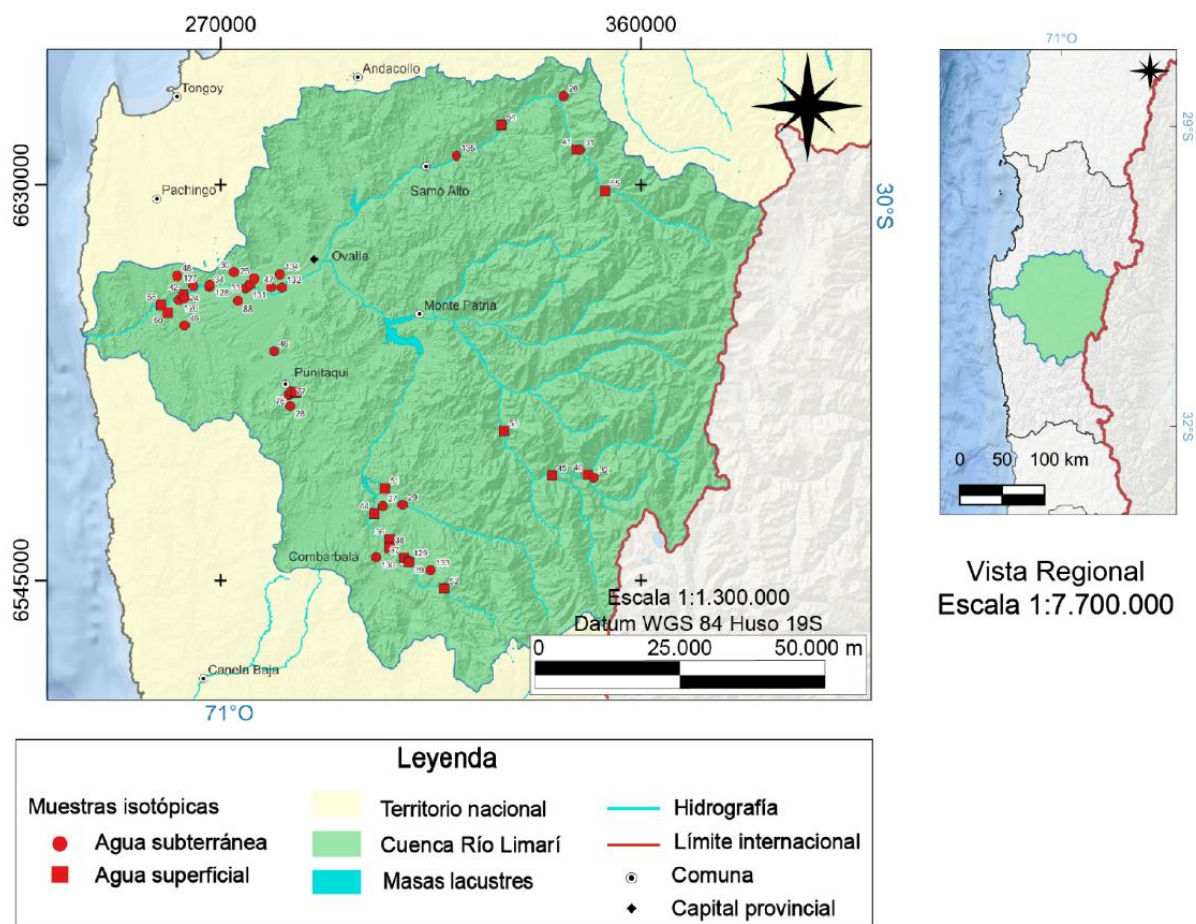


Figura 4.97: Distribución espacial de muestras isotópicas cuenca Río Limarí.

A continuación, se analizan por separado aguas subterráneas y aguas superficiales en la cuenca.

De acuerdo con esta huella isotópica (Figura 4.98, superior) se aprecia que muestras en zona baja de la cuenca poseen un amplio rango entre -10 y -5 $^{18}\text{O}\text{‰}$ y entre 70 y -35 $\text{D}\text{‰}$. El rango de la huella isotópica de las muestras en zona alta de la cuenca es amplio como los de zona baja, entre -14 y -6 $^{18}\text{O}\text{‰}$ y entre -110 y -30 $\text{D}\text{‰}$. Lo anterior indica la presencia de agua de diferentes fuentes y existirían otros parámetros que generan estas variaciones, como puede ser la continentalidad y diferencias meteorológicas que afectan la temperatura de la zona o la cantidad de precipitación (Dansgaard, 1964).

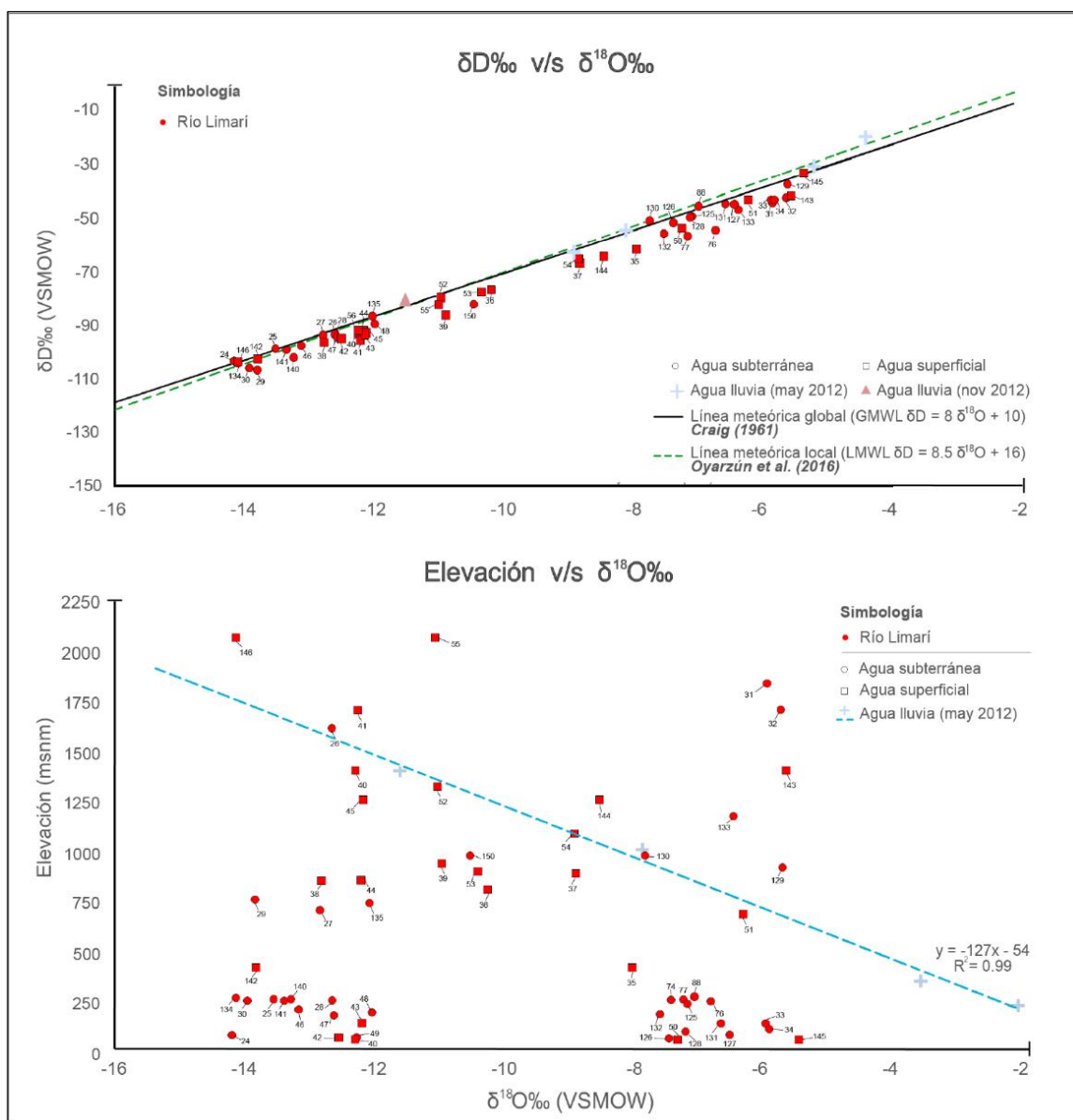


Figura 4.98: Composición isotópica del agua de cuenca Río Limarí (gráfica superior) y correlación Oxígeno-18 y elevación muestras (gráfica inferior).

Las muestras n°24 y 25, en tramo bajo de río Limarí, se encuentran ubicados por sobre la LMWL, lo que muestra ser una recarga local, cercana a la costa. Muestra n°130, pozo ubicado en Combarbalá, se encuentra sobre GMWL, puede indicar una contribución de agua evaporada durante la infiltración (Appelo y Postma, 2009). Esta característica se atribuye a la acción de los embalses Recoleta y La Paloma como lugares de evaporación, así como al sistema de canales de distribución de agua de riego desde los embalses y su aplicación en los terrenos agrícolas.

Las aguas superficiales (Figura 4.98) muestran diferentes composiciones a lo largo de la cuenca. Las muestras más empobrecidas en ^{18}O ‰ y D ‰ son de río Hurtado, y Punitaqui. Lo anterior hace suponer, como ya se señaló, que dichas aguas provienen de zonas ubicadas aguas arriba del embalse Recoleta y embalse la Paloma, de una recarga a mayor altura.

Las muestras n°35, 39, 143 y 144 se encuentran en zona alta de la cuenca y son las aguas que más se alejan de la tendencia. Estas aguas han experimentado un proceso de evaporación a medida que fluyen en contacto con la atmósfera enriqueciéndose de isótopos estable y generando una pendiente distinta a la de la Línea de Agua Meteórica (Clark, 2015).

De acuerdo con la relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y la altitud (Figura 4.98, inferior), las muestras en tramo bajo de río Limarí, se encuentran a una altitud media de 250 msnm y fueron precipitadas entre los 600 y 1750 m, por lo que han recorrido entre 350 y 1500 m en la vertical para llegar a su posición. Las muestras de sector de Punitaqui se encuentran a una altitud de 250 msnm y fueron precipitadas entre los 600 y 1000 m.

Al sur de la cuenca, sector de Combarbalá y río Grande, muestras se encuentran a una altitud media de 750 msnm y fueron precipitadas entre los 1050 y 1750 m. En la vertical se recorrió entre 300 y 1000 m. Muestra n°32 en río Grande es una excepción debido a que se encuentra por sobre la línea de precipitación. Sólo una de las muestras en zona alta, n° 135, se encuentra bajo la línea de precipitación con una altitud de 750 msnm y precipitó a los 1500 m, por lo que recorrió 750 m en la vertical hasta su posición.

En general, se observó cierta tendencia de las señales isotópicas a ser más negativas en zonas de mayor altitud a excepción de las muestras de tramo bajo de Río Limarí, las cuales varían en gran medida su huella isotópica. Los patrones que controlan la señal isotópica son las precipitaciones, en conjunto con los procesos evaporativos, que ocurren a lo largo del flujo como en los embalses. Se verificó además el efecto de la altitud, en que las aguas más empobrecidas en isótopos pesados están en las subcuencas de Río Hurtado y Río Grande Alto, debido a que son alimentadas por aguas recargadas a gran altitud y no directas. Las más enriquecidas fueron muestras en tramo bajo por su cercanía a la costa y, también, por la ocurrencia en forma rápida de infiltración luego de la precipitación y por los procesos de evaporación del agua en embalses y en el suelo (agua infiltrada y de riego).

Interpretación general análisis isotópicos

La línea de tendencia de aguas superficiales y subterráneas sigue una orientación paralela a la línea meteórica local, pero ubicada bajo esta en las tres cuencas principales estudiadas, lo cual es un fenómeno común en el norte de Chile. Las muestras tienen una señal isotópica propia de aguas empobrecidas en deuterio por efecto de la evaporación, más negativas en zonas de mayor altitud.

No existe similitud de la línea de tendencia de precipitación con la línea de las aguas subterráneas y superficiales, la variación esperada del contenido isotópico en el agua subterránea de manantiales con la elevación no es lineal, lo que significa que muestras de agua subterránea serían de agua procedente de las zonas de recarga aguas arriba y de infiltraciones locales (Custodio y Jódar, 2016). Una forma de recarga y de interacción entre aguas subterráneas y superficiales puede ser tanto por la infiltración de esta última como a través del basamento fracturado.

Las señales isotópicas observadas son una combinación de procesos como precipitación local, evaporación de embalses y suelo, donde se infiltra aguas como las provenientes de los canales de riego, transportadas desde áreas elevadas. Esto permite determinar que la recarga de estos acuíferos no es alimentada de manera exclusiva por la precipitación local y filtración fluvial (recargas directas) sino que también por otras prácticas.

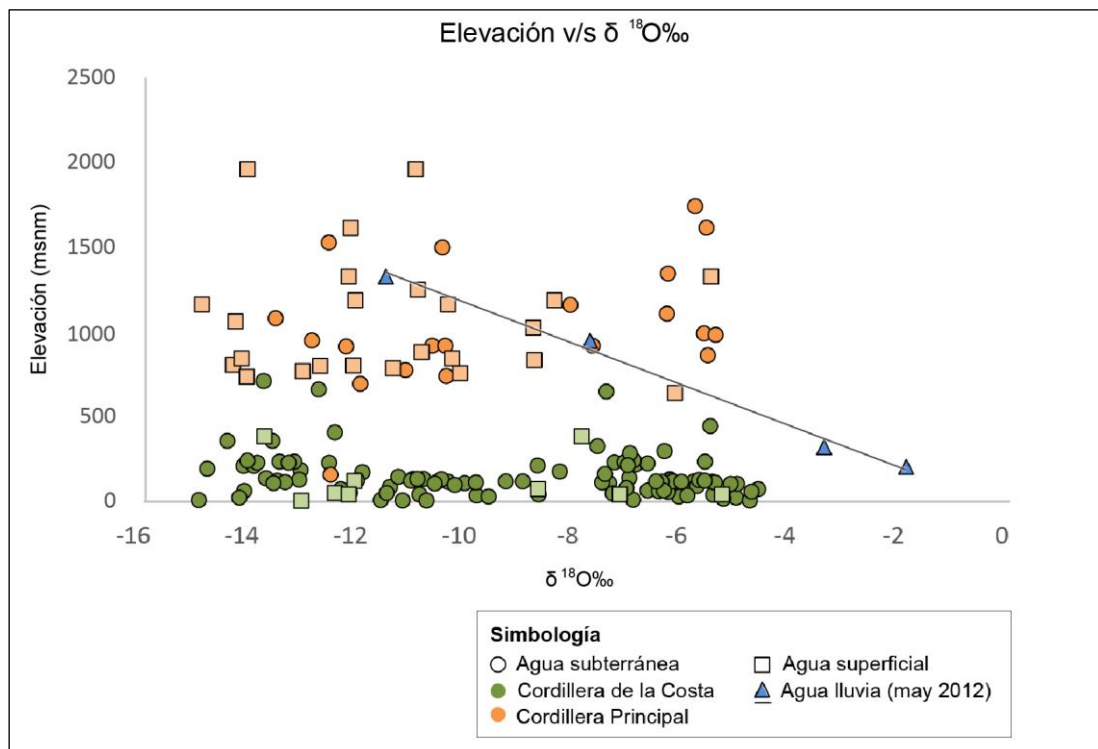


Figura 4.99: Correlación Oxígeno-18 y elevación muestras en Cordillera Principal y Cordillera de la Costa de las cuencas de interés.

La comparación de huella isotópica y altitud de las muestras de agua se realizó a partir de línea de tendencia de precipitaciones en cuenca Río Limarí. El análisis de esta línea en el resto de las cuencas permite tener un punto de comparación de la altura a la cual ingresó al sistema el agua que da origen a las diversas muestras analizadas (Figura 4.99).

Las cotas de recarga que indican los resultados isotópicos son 2 zonas principalmente. En cuenca Río Elqui una recarga a 600 - 900 msnm y a los 1200 - 1400 msnm, en cuenca Río Limarí una recarga a 700 - 1000 msnm y a los 1500 - 1750 msnm y, finalmente, en la cuenca entre estos dos ríos la recarga es entre los 600 y 1400 msnm. Una cantidad importante de muestras ya sea de agua subterránea como superficial tomadas en la Cordillera de la Costa y en Cordillera Principal de cuencas Río Elqui y costera entre Elqui y Limarí se encuentran fuera del gradiente orográfico, lo cual significa que precipitaron aguas arriba y se trasladaron hasta ese lugar. Sobre la tendencia se pueden observar muestras de Río Elqui y Río Limarí, interpretándose una recarga local del acuífero.

No se descarta que las recargas a cotas mayores puedan estar relacionadas con las fallas presentes en la Cordillera Principal debido a que a esas altitudes se encuentra mapeada una serie de fallas N-S importantes, junto a estructuras oblicuas de orientación N-W y N-E. Por un lado, Oyarzún et al. (2017) estudió la relación de patrones estructurales con la circulación de aguas subterráneas en la región de Coquimbo. Por otro lado, en la cuenca del Aconcagua, en la zona central del país, Taucare et al. (2020b) demostró que la Zona de Falla Pocuro en el Frente de la Cordillera Occidental representa una zona de circulación, y que las fallas oblicuas del basamento permiten el drenaje de agua subterránea desde la Cordillera Principal hacia el acuífero aluvial adyacente de la depresión central.

Con base en estos antecedentes, existe la posibilidad de que las zonas de alta densidad de fracturas en la Cordillera Principal permitan la infiltración, circulación y un posible almacenamiento en rocas fracturadas, siendo necesario realizar un análisis topológico en los tramos altos de las cuencas estudiadas en esta memoria.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

Las zonas áridas y semiáridas cubren como promedio el 40% de superficie terrestre y en muchas de estas se produce un aumento de la demanda de agua a causa del crecimiento demográfico e industrial, en un momento en que los escasos recursos hídricos están siendo amenazados.

La exploración de recursos hídricos subterráneos nace de la necesidad de generar información integral de la hidrogeología de la región de Coquimbo que, junto a otras zonas áridas del norte de Chile, sufre los efectos de los eventos de sequía y, por consiguiente, el incremento del interés por las aguas subterráneas. Por ello, se caracteriza este sistema de forma tal que constituya parte de las bases para la toma de decisiones en cuanto a gestión sostenible del recurso hídrico de la región.

En este trabajo, se llevó a cabo el análisis de las condiciones hidroclimáticas de la macrozona norte de Chile en las últimas décadas, con base en el contexto de sequía que sufren las regiones que la conforman. Se consideró el aumento significativo de derechos consuntivos de aguas subterráneas existentes en la región, lo que afecta directamente la disponibilidad de recurso, principalmente en aquellas cuencas en donde se identifican factores antrópicos que controlan los niveles piezométricos: actividad agrícola que constituyen más del 83% de su uso en cuenca Elqui y Limarí, y actividad minera y abastecimiento de agua para consumo humano.

Para afrontar escenarios más críticos en relación con la potencialidad y vulnerabilidad de las aguas subterráneas, es que se requiere reducir las brechas de información existentes relacionadas con la definición de las características de los acuíferos, desarrollo de monitoreos de niveles y calidad del recurso para identificar cuándo es necesario u óptimo intervenir en estos.

Con el fin de generar información nueva y de calidad, el presente estudio se centró, en primer lugar, en obtener características geoelectricas y sísmicas del terreno, las que permitieron delimitar los depósitos aluviales y el basamento. Los datos geofísicos analizados en sectores de tramo alto, medio y bajo de estas cuencas corroboraron la existencia de un basamento somero y que el límite de éste no coincide necesariamente con cambios litológicos, sino con algún grado de alteración y/o fracturación de la roca. Estas zonas se correlacionan con características geológico-estructurales.

En segundo lugar, la evaluación de propiedades hidráulicas permitió relacionar y corroborar la información de la geometría del subsuelo, logrando considerar no sólo los depósitos con una granulometría media a gruesa como únicas zonas permeables, sino integrar a la base de datos, nuevos sitios relacionados con el alto porcentaje de material rocoso fracturado a lo largo de las cuencas estudiadas que constituyen zonas permeables.

En tercer lugar, el análisis de datos fisicoquímicos del agua como su química, confirmó la existencia de un sistema hidrogeológico complejo. Ejemplo de aquello es la conductividad eléctrica que se incrementa naturalmente en los tramos finales de las cuencas, por efectos de la incorporación de sales de las actividades antrópicas (percolación de agua de riego o efecto de la

salinización en la zona costera). Es necesario recalcar que muestras que salen de la tendencia revelan posibles diferencias en su recorrido y circulación.

La calidad del agua conforma una de las principales bases al momento de tomar decisiones en el uso sostenible del recurso, con énfasis en la consideración de las principales actividades antrópicas que resultan ser un importante contribuyente de elementos que, superando los límites de las normas de riego y agua potable, pueden ser perjudiciales para los habitantes, actividades económicas y ecosistemas que conforman la región.

En último lugar, existe una consistencia de las huellas isotópicas de cada sector con la ubicación geográfica y las condiciones de altitud y longitud que regulan el fraccionamiento. La información analizada a lo largo de este trabajo conforma el contexto hidrogeológico de la región, pudiendo ser una herramienta para decidir sobre cómo gestionar el recurso existente.

A pesar de abarcar una extensa parte de la región de estudio, la complejidad geológica y estructural de la misma requiere de análisis complementarios. Esto es posible, actualizando esta caracterización a medida que se cuente con nuevos antecedentes, como sondajes con descripción litológica, y realizando estudios de mayor detalle en depósitos aluviales y en roca fracturada, además de aumentar la red de monitoreo y su frecuencia, con el fin de tener mayor abundancia de data.

Bibliografía

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2007). *Public Health Statement: Barium*. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2007). *Public Health Statement: Arsenic*. Department of Health and Human Services, Public Health Service.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2008). *Public Health Statement: Aluminum*. Department of Health and Human Services, Public Health Service

Aguilar, E., Peterson, T. C., Obando, P. R., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M., Mayorga, R. (2005). *Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D23).

American Public Health Association (APHA). (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18 th Ed., American Public Health Association, Washington: 770

Arabasz, W. (1971). *Geological and geophysical studies of the Atacama Fault Zone in northern Chile*. Ph.D. Thesis (Unpublished), California Institute of Technology, 264 p. USA.

Banco Mundial (2010). *Desarrollo y cambio climático*. Banco Mundial.

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas. (2022). *Boletín Climático Región de Coquimbo Noviembre*. La Serena, Chile.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2010). *Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile*. Publicación N.139.

Cepeda, J.; Cabezas, R.; Robles, M.; Zavala, H. (2008) *Antecedentes generales de la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo, Chile*.

Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. 1st ed. CRC

Craig, H. (1961). *Isotopic variations in meteoric waters*. *Science* 133 (3465), 1702–1703.

Creixell, C., Labbé, M., Arévalo, C., Salazar, E. (2013). *Geología del área Estación Chañar-Junta de Chingoles, Regiones de Atacama y Coquimbo, escala 1:100.000*. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Creixell, C.; Ortiz, M.; Arévalo, C. (2012). *Geología del área Carrizalillo-El Tofo, Regiones de Atacama y Coquimbo*. Servicio Nacional de Geología y Minería, *Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 133-134*: 82 p., 1 mapa 1:100.000.

Custodio, E., Jódar, J. (2016). *Soluciones simples para la evaluación de la recarga difusa en estado estacionario en acuíferos no confinados homogéneos en pendiente por medio de trazadores atmosféricos*. *Diario de hidrología*, 540, 287-305.

Custodio, E., Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Editorial Omega. Volumen I y II. Barcelona.

Custodio, E., LLamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea*. Barcelona, España.

Chandra, S., Dewandel, B., Dutta, S., Ahmed, S., (2010). Geophysical model of geological discontinuities in a granitic aquifer: analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences. *J. Appl. Geophys.* 71 (4), 137–148.

Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In: Moreno, T., Gibbons, W. (Eds.), *The Geology of Chile*. Geological Society of London, pp. 21–114

Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *tellus*, 16(4), 436-468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>.

Deformes, J. (2020). Evaluación de los factores naturales y antrópicos que determinan la distribución de las captaciones de aguas subterráneas en el secano de media montaña de la Región de Coquimbo. Memoria de título. Departamento de ingeniería en minas, Universidad de la Serena, La Serena, Chile.

Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C., Krishnamurthy, N.S. (2006). A generalized 3D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *J. Hydrol.* 330 (1–2), 260–284.

Diaz, N. (2020). Análisis de potenciales factores determinantes de la disponibilidad de aguas subterráneas en la cuenca del Estero Punitaqui, Región de Coquimbo, Chile. Memoria de título. Departamento de ingeniería en minas, Universidad de la Serena, La Serena, Chile.

Dirección General de Aguas. (1984). Balance Hidrológico Nacional. Regiones III y IV. Realizado por IPLA Ltda., Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Realizado por IPLA Ltda.

Dirección General de Aguas. (1986a). Mapa hidrogeológico de Chile escala 1:2.500.000. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas. (1986b). Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional, escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000. IPLA Ingenieros Consultores. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas. (2004). Aplicación del modelo hidrogeológico Valle Pan de Azúcar. Realizado por: Departamento de Estudios y Planificación (DEP), Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas. (2008). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Limarí: informe técnico; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Series: S.D.T. N° 268

Dirección General de Aguas. (2016). Atlas del Agua Chile 2016.

Dirección General de Aguas. (2017). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Coquimbo. Realizado por: Departamento de Conversación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH), Ministerio de Obras Públicas.

Emparán, C., Pineda, G. (1999). Mapa geológico área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Emparán, C., Pineda, G. (2000a). Mapa geológico área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Emparán, C., y Pineda, G. (2000b). Área La Serena - La Higuera. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos, 18, 1 mapa escala 1:100.000.

Emparán, C., Pineda, G. (2006). Geología del área Andacollo-Puerto Aldea. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Flores, J. P. (2012). Erosión actual y potencial en cuencas hidrográficas y el ordenamiento territorial, presentación en Seminario SUBDERE-CEPAL Mayo 2012.[Presentación].

Flores, J. P., Carmona, L., Rojas, S., Martínez, E., & Retamal, M. (2013). Estado actual de los suelos de la Región de Coquimbo, uso y degradación. (Pub. CIREN N° 176).

Gana, F. (1991). Mapa geológico de la cordillera de la costa entre La Serena y Quebrada El Teniente: Región de Coquimbo.

Golkarian, A., Naghibi, S. A., Kalantar, B., & Pradhan, B. (2018). Groundwater potential mapping using C5.0, random forest, and multivariate adaptive regression spline models in GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 149.

Hervé, F., Faundez, V., Calderón, M., Massonne, HJ, Willner, AP. (2007). Complejos de basamento metamórfico y plutónico. *La geología de Chile*, 5-19.

INE Coquimbo (2019) *Análisis del Censo de Población y Vivienda 2017*. Instituto Nacional de Estadísticas Región de Coquimbo.

Perelló, R. S. (2012). *Geologic Setting and Evolution of the Porphyry Copper-Molibdenum and Copper-Gold Deposits at Los Pelambres, Central Chile*. *Economic Geologist*, 16,55-104.

Keller, V.; F.C. Frischnecht. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*. 519 págs. Pergamon Press. Oxford. Londres.

Lachassagne, P, Wyns, R., Dewandel, B., (2011). *The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes*. *Terra Nova* 23 (3), 145–161.

Lictevout, E., Maass, C., Córdoba, D., Herrera, V., Payano, R., Rodríguez, J., Aguilera, J. (2013). *Gestión de la información hídrica en zona árida: caso de la región de Tarapacá, Norte de Chile*. *Aqua-LAC*, 5 (2), 69-77.

Lopez, L; Donoso, C.; Huerta, S; Cifuentes, J.L; Fuentes, F. (2019). *Geometría de la cuenca del río Limarí, región de Coquimbo* Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-19-78. 118 p. Santiago.

Maksaev, V. (1990). *Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21 and 26 south, and the origin of major porphyry copper deposits*. Ph.D. Thesis (Unpublished), Dalhousie University, 554 p. Canada.

Maksaev, J. V. 2001. *Reseña Metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina*. Santiago.

Maksaev, (1984). *Unidades Volcanicas y Plutonicas del Cenozoico Superior en la Alta Cordillera del Norte Chico (29°-31°S): Geología, Alteración Hidrotermal y Mineralización*. *Revista Geologica de Chile* No. 21, p 11-51.

Martin, M. W., Clavero, J., Mpodozis, C., & Cutiño, L. G. (1995). *Estudio geológico regional de la franja El Indio, Cordillera de Coquimbo. Informe registrado IR-95-6 Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, and Compañía Minera San José.*

Montepeque, J. C. F. (2018). *Caudal específico y su aplicación en el análisis regional de series máximas. Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, (1), 26-29*

Morata, D., Varas, M. I., Higgins, M., Valencia, V., & Verhoort, J. D. (2010). *Episodic emplacement of the Illapel Plutonic Complex (Coastal Cordillera, central Chile): Sr and Nd isotopic, and zircon U-Pb geochronological constraints. VII SSAGI South American Symposium on Isotope Geology, At Brasília, January 2015.*

Moscoso, R., Mpodozis, C. (1988). *Estilos estructurales en el norte chico de Chile (28-31°S), regiones de Atacama y Coquimbo. Realizado por: Moscoso, R., Mpodozis, C., Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).*

Mpodozis, C., Brockway, H., Marquardt, C., Perelló, J. (2009). *Geocronología U-Pb y tectónica de la región Los Pelambres-Cerro Mercedario: Implicancias para la evolución cenozoica de los Andes del centro de Chile y Argentina. In Congreso Geológico Chileno (Vol. 12, No. S9_059). No. 12. Santiago.*

Mpodozis C., Cornejo P. (1988). *Carta Geológica de Chile N° 68. Hoja Pisco Elqui, IV Región de Coquimbo. Escala 1:250000.*

Muñoz Cristi, J. (1942). *Rasgos generales de la construcción geológica de la Cordillera de la Costa; especialmente en la Provincia de Coquimbo. Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología. (No. 1, pp. 285-318).*

Nasi, C., Moscoso, R., & MaksaeV, V. (1990). *Hoja Guanta: regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio nacional de geología y minería.*

Nasi, C.; Mpodozis, C.; Moscoso, R.; MaksaeV, V.; Cornejo, P. 1985. *El Batolito Elqui-Limarí (Paleozoico Superior-Triásico): características petrográficas, geoquímicas y significado tectónico. Revista Geológica de Chile 25-26: 77-111.*

Ortiz, M., Marine, R. (2015). *Geología de las áreas Río Chollay-Matancilla y Cajón del Encierro, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).*

Oyarzún, R., Godoy, R., Núñez, J., Fairley, J. P., Oyarzún, J., Maturana, H., & Freixas, G. (2014). *Recession flow analysis as a suitable tool for hydrogeological parameter determination in steep, arid basins. Journal of Arid Environments, 105, 1-11.*

Oyarzún, R.; Jofré, E.; Morales, P.; Maturana, H.; Oyarzún, J.; Kretschmer, N.; Aguirre, E.; Gallardo, P.; Toro, L.; Muñoz, J. & Aravena, R. (2014). *A hydrogeochemistry and isotopic approach for the assessment of surface water-groundwater dynamics in an arid basin: the Limarí watershed, North-Central Chile. Environmental Earth Sciences, 73, 39-55.*

Oyarzún, R., Oyarzún, J., Fairley, J.P., Núñez, J., Gómez, N., Arumí, J.L., Maturana, H. (2017). *A simple approach for the analysis of the structural-geologic control of groundwater in an arid rural, mid-mountain, granitic and volcanic-sedimentary terrain: the case of the Coquimbo Region, North-Central Chile. J. Arid Environ. 142, 31-35.*

Oyarzún, R., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H., Higuera, P. (2006). *Strong Metal Anomalies in Stream Sediments from Semiarid Watersheds in Northern Chile: When Geological and Structural Analyses*

Contribute to Understanding Environmental Disturbances. *International Geology Review*, Vol. 48, p. 1133-1144.

Oyarzún, R., Zambra, S., Maturana, H., Oyarzún, J., Aguirre, E., Kretschmer, N. (2016). Chemical and isotopic assessment of surface water–shallow groundwater interaction in the arid Grande river basin, North-Central Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 61(12), 2193-2204.

Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800.

Pineda, G., Calderón, M. (2008). *Geología del Área Monte Patria-El Maquí, Región de Coquimbo*. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Rivano, S. (1996). *Geología de las Hojas Quillota y Portillo*. Servicio Nacional de Geología y Minería (Informe Inédito).

Rivano, S., Sepúlveda, P. (1991). Hoja Illapel, escala 1: 250000; Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile. *Carta Geológica de Chile* (69).

Rivano, S., Sepúlveda, P., Hervé, M., Puig, A. (1985). Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32° LS., *Rev. Geol. Chile*, N°24, pp 63-74.

Rivano, S. Sepúlveda, P. (1986). Hoja Illapel, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)

Rivera, C. (2018). *Análisis de las Franjas Metalogénicas de la zona comprendida entre los depósitos El Morro y Los Pelambres en alta cordillera, III y IV Región, Chile*. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad Andrés Bello.

Rojas M., P. Aldunce, L. Farías, H. González, P. Marquet, J. C. Muñoz, R. Palma-Behnke, A. Stehr y S. Vicuña (editores) (2019). *Evidencia científica y cambio climático en Chile: Resumen para tomadores de decisiones*. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Rossel, P.; Oliveros, V.; Ducea, M.; Charrier, R.; Scaillef, S.; Retamal, L.; Figueroa, O. (2013). El sistema de subducción andino temprano como análogo a los arcos de islas: evidencia de variaciones geoquímicas a lo largo del arco en el norte de Chile. *Lithos* 179: 211-230.

Segovia, M. (2015) *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas del sector norte de la cuenca Pampa del Tamarugal, entre latitud 19°S y 20°S, I Región de Tarapacá, Chile*. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile.

Taggart, A.F. (1945). *Handbook of Mineral Dressing*, John Wiley, New York, USA.

Taucare, M. (2020). *Groundwater resources of the western Andean front: insights from the Aconcagua basin, Central Chile*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Mención Geología, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Taucare, M., Viguier, B., Daniele, L., Heuser, G., Arancibia, G. y Leonardi, V. (2020). *Connectivity of fractures and groundwater flows analyses into the Western Andean Front by means of a topological approach (Aconcagua Basin, Central Chile)*.

Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R., (1990). *Applied Geophysics*. 2nd edition. Cambridge University

Theis, C., (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 16 (2), 519–524.

Thiele, R., Pincheira, M. (1987). *Tectónica transpresiva v movimiento de desgarre en el segmento sur de la Zona de Falla Atacama, Chile. Andean Geology, (31), 77-94.*

Thomas, H. (1967). *Geología de la Hoja de Ovalle, Provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. Boletín N°23.*

Valois, R., Schaffer, N., Figueroa, R., Maldonado, A., Yáñez, E., Hevia, A., MacDonell, S. (2020). *Characterizing the water storage capacity and hydrological role of mountain peatlands in the arid Andes of north-central Chile. Water, 12(4), 1071.*

Villanueva, M., Iglesias, A. (1984). *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Madrid: IBERGESA.*

Zabala, H; Trigos, H; Munizaga, I; Mall, E. (2008). *Hidrología Cuenca Río Elqui, MCRI Project: Institutional Adaptations to Climate Change.*

Anexos

Anexo A: Análisis de Pruebas de Bombeo

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
1	VPC-0401-309	Costera Elqui-Limari	284993	6666207	16,0	84,8	0,6	28,6	113,3	120,0
2	VPC-0401-310	Costera Elqui-Limari	284499	6666794	30,0	75,5	0,6	50,0	125,5	170,0
3	VPC-0401-312	Costera Elqui-Limari	284545	6666515	25,0	76,0	0,4	61,0	137,0	170,0
4	VPC-0402-188	Costera Elqui-Limari	267863	6616607	15,0	38,1	0,7	21,4	59,5	130,0
5	VPC-0401-236	Costera Elqui-Limari	283333	6679785	65,0	34,0	1,7	39,2	73,2	180,0
6	VPC-0401-237	Costera Elqui-Limari	283331	6680039	55,0	38,6	1,6	34,8	73,4	178,0
7	VPC-0401-250	Costera Elqui-Limari	284445	6670415	50,0	55,7	1,7	30,3	86,0	133,0
8	VPC-0401-251	Costera Elqui-Limari	283940	6670329	120,0	39,9	7,2	16,8	56,7	150,0
9	VPC-0401-283	Costera Elqui-Limari	284839	6666176	60,0	74,2	1,3	47,2	121,4	186,0
10	VPC-0401-234	Costera Elqui-Limari	283333	6679785	65,0	34,0	1,7	39,2	73,2	180,0
11	VPC-0401-235	Costera Elqui-Limari	283331	6680039	55,0	38,6	1,6	34,8	73,4	178,0
12	VPC-0401-166	Costera Elqui-Limari	283863	6681278	50,0	41,7	2,4	20,6	62,3	180,0
13	VPC-0402-166	Costera Elqui-Limari	267866	6616607	15,0	38,1	0,7	21,4	59,5	130,0
14	VPC-0402-167	Costera Elqui-Limari	268091	6616822	6,0	43,7	0,9	6,5	50,1	144,0
15	VPC-0402-168	Costera Elqui-Limari	267669	6616670	18,0	28,7	0,5	33,3	62,0	140,0
16	VPC-0401-226	Costera Elqui-Limari	283675	6670264	85,0	42,2	3,6	23,5	65,7	164,0
17	VPC-0401-227	Costera Elqui-Limari	283820	6671189	75,0	44,6	8,3	9,1	53,6	132,0
18	VPC-0401-228	Costera Elqui-Limari	283938	6670908	110,0	50,6	8,8	12,5	63,1	133,0
19	VPC-0401-253	Costera Elqui-Limari	283684	6666498	35,0	59,8	1,3	26,1	86,0	120,0
20	VPC-0401-257	Costera Elqui-Limari	283628	6666582	16,0	67,0	0,5	35,6	102,6	146,0
21	VPC-0401-223	Costera Elqui-Limari	281973	6670514	55,0	37,2	6,4	8,6	45,8	100,0
22	VPC-0401-224	Costera Elqui-Limari	283966	6670150	112,0	49,2	6,4	17,6	66,8	170,0
23	VPC-0401-225	Costera Elqui-Limari	283966	6670150	112,0	49,2	6,4	17,6	66,8	170,0
24	VPC-0401-204	Costera Elqui-Limari	284725	6674140	54,0	39,7	1,8	29,8	69,5	130,0
25	VPC-0401-205	Costera Elqui-Limari	284705	6674011	55,0	47,6	1,2	47,8	95,4	150,0

Tabla A.1. Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
26	VPC-0401-206	Costera Elqui-Limari	253529	6643796	2,0	3,5	0,4	4,7	8,2	21,0
27	VPC-0401-178	Costera Elqui-Limari	285204	6666229	25,0	77,2	1,1	23,6	100,8	125,0
28	VPC-0401-179	Costera Elqui-Limari	285225	6666817	8,0	81,5	0,2	40,0	121,5	132,0
29	VPC-0401-180	Costera Elqui-Limari	284449	6666794	30,0	75,5	0,6	50,0	125,5	170,0
30	VPC-0401-174	Costera Elqui-Limari	259631	6646119	3,0	28,2	0,3	11,1	39,3	73,0
31	VPC-0401-163	Costera Elqui-Limari	282869	6671875	110,0	40,5	2,8	39,4	79,9	150,0
32	VPC-0401-164	Costera Elqui-Limari	282909	6671799	90,0	40,5	2,2	41,3	81,8	150,0
33	VPC-0401-73	Costera Elqui-Limari	284621	6668317	70,0	55,0	3,9	18,2	73,2	145,0
34	VPC-0401-64	Costera Elqui-Limari	284568	6667372	78,0	61,9	2,9	27,3	89,1	140,0
35	VPC-0401-50	Costera Elqui-Limari	283681	6670871	60,0	36,5	5,7	10,5	47,1	150,0
36	VPC-0401-42	Costera Elqui-Limari	282542	6672675	36,0	10,2	6,1	5,9	16,1	80,0
37	VPC-0401-44/P2	Costera Elqui-Limari	282234	6669886	54,0	29,9	1,5	36,0	65,9	168,0
38	VPC-0401-44/P1	Costera Elqui-Limari	284227	6673487	75,0	42,7	0,8	100,0	142,7	184,0
39	VPC-0401-36	Costera Elqui-Limari	282810	6680478	65,0	17,6	2,3	28,5	46,1	88,0
40	VPC-0401-9/P3	Costera Elqui-Limari	283394	6670877	128,0	20,9	11,8	10,8	31,7	150,0
41	VPC-0401-9/P4	Costera Elqui-Limari	283251	6671202	200,0	23,4	12,3	16,3	39,7	150,0
42	VPC-0401-9/P5	Costera Elqui-Limari	283149	6670863	121,5	23,0	14,2	8,5	31,5	150,0
43	VPC-0401-9/P6	Costera Elqui-Limari	283022	6671168	210,0	24,2	16,2	12,9	37,1	150,0
44	VPC-0401-11	Costera Elqui-Limari	283457	6668145	100,0	35,7	3,4	29,4	65,1	120,0
45	VPC-0401-10	Costera Elqui-Limari	282826	6669490	83,0	24,0	11,0	7,5	31,5	90,0
46	VPC-0402-3	Costera Elqui-Limari	268251	6615250	7,0	14,8	0,2	36,8	51,6	60,0
47	VPC-0402-3	Costera Elqui-Limari	270221	6615651	6,0	7,4	0,2	26,1	33,5	52,0
48	VPC-0401-8	Costera Elqui-Limari	282650	6671047	86,0	24,3	10,1	8,5	32,8	100,0
49	ND-0401-1290	Costera Elqui-Limari	282789	6674849	45,0	20,4	2,2	20,6	41,0	91,0
50	VPC-0401-7	Costera Elqui-Limari	283700	6666069	3,1	8,4	1,9	1,6	10,0	10,7

Tabla A.2. (Continuación) Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
51	VF-0401-6	Rio Elqui	290413	6688304	31,5	0,5	242,3	0,1	0,7	2,1
52	VPC-0401-160	Rio Elqui	352784	6679309	4,0	6,1	0,2	26,7	32,8	50,0
53	ND-0401-2841	Rio Elqui	291048	6687456	10,0	7,0	0,9	10,8	17,8	80,0
54	ND-0401-2796	Rio Elqui	285481	6690411	12,0	5,1	4,2	2,9	8,0	7,0
55	ND-0401-2811	Rio Elqui	288612	6689915	125,0	17,5	2,6	48,4	65,9	200,0
56	ND-0401-2812	Rio Elqui	287994	6690161	148,0	5,8	3,7	39,6	45,3	200,0
57	ND-0401-2813	Rio Elqui	287592	6690192	163,0	7,0	3,5	46,6	53,6	197,0
58	ND-0401-2792	Rio Elqui	287137	6689766	15,0	8,7	0,6	23,4	32,2	62,0
59	ND-0401-2790	Rio Elqui	285485	6690256	6,2	7,4	30,8	0,2	7,6	50,0
60	ND-0401-2755	Rio Elqui	286115	6689939	30,0	9,1	1,1	26,8	35,9	45,0
61	ND-0401-2765	Rio Elqui	284671	6690138	5,8	6,1	1,0	6,1	12,2	50,0
62	ND-0401-2742	Rio Elqui	285031	6689905	6,0	7,4	0,6	9,7	17,0	
63	ND-0401-2756	Rio Elqui	286112	6689943	30,0	9,1	1,1	26,8	35,9	45,0
64	ND-0401-2751	Rio Elqui	284364	6690093	15,0	5,4	1,1	14,0	19,5	51,0
65	ND-0401-2726	Rio Elqui	281979	6690465	12,0	2,2	0,8	15,6	17,8	40,0
66	VPC-0401-23/P1	Rio Elqui	289074	6689059	60,0	3,0	0,9	66,7	69,6	150,0
67	VPC-0401-23/P2	Rio Elqui	289138	6689002	68,0	3,9	0,7	95,8	99,7	200,0
68	VPC-0401-23/P3	Rio Elqui	289220	6688966	64,0	4,9	0,7	91,4	96,3	200,0
69	VPC-0401-23/P4	Rio Elqui	289271	6688892	60,0	4,3	0,7	85,7	90,0	201,0
70	VPC-0401-23/P5	Rio Elqui	289375	6688903	60,2	4,0	0,5	118,0	122,0	117,0
71	VPC-0401-23/P6	Rio Elqui	289470	6688850	60,0	3,0	0,6	105,3	108,2	197,0
72	VPC-0401-23/P7	Rio Elqui	289511	6688762	60,0	3,2	0,7	84,5	87,7	195,0
73	VPC-0401-23/P8	Rio Elqui	288910	6689167	82,0	5,3	1,2	69,5	74,8	201,0
74	ND-0401-2588/P5B	Rio Elqui	308221	6666074	2,0	9,6	0,1	33,3	43,0	60,0
75	ND-0401-2588/P7B	Rio Elqui	308236	6665456	1,0	7,0	0,0	50,0	57,0	55,0

Tabla A.3. (Continuación) Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
76	ND-0401-2588/P9B	Rio Elqui	308453	6668131	10,0	4,6	1,0	9,8	14,4	65,0
77	ND-0401-2542/P1B	Rio Elqui	308295	6666103	4,0	8,8	0,1	57,1	65,9	85,6
78	ND-0401-2542/P2B	Rio Elqui	308028	6666532	6,0	6,8	0,2	33,3	40,1	65,0
79	ND-0401-2542/P3B	Rio Elqui	308173	6667796	15,0	3,7	0,5	32,6	36,3	66,0
80	ND-0401-2542/P4B	Rio Elqui	307863	6667267	4,0	6,7	0,3	12,1	18,8	51,0
81	ND-0401-1832	Rio Elqui	304961	6670611	2,0	5,0	0,0			15,0
82	ND-0401-1070	Rio Elqui	366733	6697055	2,0	2,4	0,0			3,0
83	ND-0401-649	Rio Elqui	308366	6676724	12,0	14,8	1,4	8,3	23,1	42,0
84	ND-0401-523	Rio Elqui	308339	6678488	29,5	5,4	3,7	7,9	13,3	31,0
85	VPC-0402-182	Rio Limari	284856	6585168	10,0	12,4	0,5	22,2	34,6	144,0
86	VPC-0402-183	Rio Limari	285114	6585444	5,0	21,9	0,1	71,4	93,3	166,0
87	ND-0402-1934	Rio Limari	285326	6584057	1,5	5,0	0,8	1,8	6,8	6,0
88	VPC-0402-12/P1	Rio Limari	273697	6605067	6,3	17,1	0,1	48,5	65,6	120,0
89	VPC-0402-12/P2	Rio Limari	273607	6604829	6,3	17,1	0,1	48,5	65,6	120,0
90	VPC-0401-304	Costera Elqui-Limari	261917	6650449	7,0	22,5	0,3	21,2	43,7	60,0
91	VPC-0401-238	Costera Elqui-Limari	281900	6669771	40,0	51,4	5,0	8,0	59,4	95,0
92	VPC-0401-242	Costera Elqui-Limari	279044	6654333	6,5	18,2	0,3	25,0	43,2	60,0
93	VPC-0401-229	Costera Elqui-Limari	281797	6670003	75,0	34,6	3,1	24,2	58,8	118,0
94	VPC-0401-167	Costera Elqui-Limari	279707	6654877	13,0	11,0	0,2	76,5	87,5	100,0
95	VPC-0401-170	Costera Elqui-Limari	279776	6654866	7,0	20,0	0,2	31,8	51,8	86,0
96	ND-0401-2715	Costera Elqui-Limari	262412	6650054	5,6	29,1	0,8	7,3	36,3	54,0
97	VPC-0401-27	Costera Elqui-Limari	285536	6662559	22,5	3,0	0,8	29,2	32,2	54,0
98	VPC-0401-21	Costera Elqui-Limari	272451	6665559	9,0	2,7	3,4	2,7	5,4	6,0
99	VPC-0401-22	Costera Elqui-Limari	272981	6665469	10,0	0,5	8,5	1,2	1,7	
100	VPC-0401-17	Costera Elqui-Limari	279950	6676023	21,0	0,8	0,5	43,8	44,6	98,0

Tabla A.4. (Continuación) Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
101	VPC-0401-15	Costera Elqui-Limari	279805	6676213	10,0	5,0	0,2	62,5	67,5	98,0
102	ND-0401-527	Costera Elqui-Limari	269083	6657951	6,0	11,6	9,4	0,6	12,2	13,6
103	ND-0401-527	Costera Elqui-Limari	269017	6657849	11,0	10,6	21,2	0,5	11,1	11,4
104	ND-0401-527	Costera Elqui-Limari	269373	6658246	7,0	13,8	3,4	2,1	15,9	17,5
105	ND-0401-610	Costera Elqui-Limari	270127	6657681	11,0	10,6	21,2	0,5	11,1	
106	ND-0401-611	Costera Elqui-Limari	269579	6658378	9,0	3,5	3,0	3,0	6,5	7,4
107	ND-0401-205	Costera Elqui-Limari	273051	6665969	10,0	4,7	5,6	1,8	6,5	8,3
108	ND-0401-571	Costera Elqui-Limari	281467	6670951	58,0	13,9	2,5	23,5	37,4	80,0
109	ND-0401-539	Costera Elqui-Limari	285987	6663265	50,0	35,8	2,1	23,4	59,2	75,0
110	ND-0401-540	Costera Elqui-Limari	282406	6666901	82,0	23,5	1,4	58,2	81,7	80,0
111	ND-0401-542	Costera Elqui-Limari	285774	6663858	50,0	41,7	3,4	14,8	56,4	81,0
112	ND-0401-487	Costera Elqui-Limari	281492	6682412	13,0	35,5	2,3	5,7	41,1	67,0
113	VPC-0401-2	Costera Elqui-Limari	281401	6669769	60,0	25,1	4,5	13,3	38,4	100,0
114	ND-0401-336	Costera Elqui-Limari	282075	6681668	8,0	20,0	1,4	5,8	25,8	40,0
115	ND-0401-432	Costera Elqui-Limari	282203	6685357	5,5	17,3	0,5	10,8	28,0	36,0
116	ND-0401-420	Costera Elqui-Limari	281243	6682755	17,0	37,8	0,8	22,4	60,2	116,0
117	ND-0401-332	Costera Elqui-Limari	274800	6681118	15,0	36,0	1,5	9,7	45,7	60,0
118	ND-0401-358	Costera Elqui-Limari	267701	6642069	25,8	31,2	1,2	21,5	52,7	64,0
119	ND-0401-358	Costera Elqui-Limari	267901	6642069	15,4	35,7	1,1	14,6	50,3	78,0
120	ND-0401-340	Costera Elqui-Limari	284750	6684668	4,9	11,9	0,1	60,9	72,8	91,0
121	ND-0401-268	Costera Elqui-Limari	262551	6650319	10,0	25,7	16,1	0,6	26,3	26,6
122	ND-0401-333	Costera Elqui-Limari	261994	6649836	11,0	16,1	4,7	2,4	18,4	19,0
123	ND-0401-182	Costera Elqui-Limari	280000	6683868	30,0	1,9	8,1	3,7	5,6	7,2
124	ND-0401-283	Costera Elqui-Limari	262301	6650069	11,0	18,6	12,9	0,9	19,4	20,0
125	ND-0401-218	Costera Elqui-Limari	281875	6678820	27,5	6,0	0,8	34,0	40,0	56,2

Tabla A.5. (Continuación) Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
126	ND-0401-207	Costera Elqui-Limari	284760	6684668	10,0	14,2	0,2	55,6	69,7	100,0
127	ND-0401-177	Costera Elqui-Limari	263501	6648369	8,0	0,4	0,8	10,4	10,8	12,0
128	ND-0401-177	Costera Elqui-Limari	263551	6648419	17,0	0,3	3,0	5,6	5,9	7,0
129	ND-0401-177	Costera Elqui-Limari	263701	6648369	8,0	1,8	2,3	3,4	5,2	5,8
130	ND-0401-111	Costera Elqui-Limari	284300	6660969	12,8	19,1	1,1	11,7	30,8	31,8
131	ND-0401-81	Costera Elqui-Limari	281350	6681918	8,8	27,8	0,5	18,3	46,1	50,0
132	ND-0401-83	Costera Elqui-Limari	282072	6678500	36,6	14,8	3,0	12,1	26,9	51,0
133	ND-0401-78	Costera Elqui-Limari	280650	6683818	15,3	0,5	10,1	1,5	2,0	3,9
134	ND-0401-78	Costera Elqui-Limari	280550	6683768	7,3	0,3	3,2	2,3	2,6	5,1
135	ND-0401-64	Costera Elqui-Limari	261811	6649741	5,5	14,9	4,7	1,2	16,1	17,3
136	ND-0401-2588/P6B	Rio Elqui	308176	6664727	3,5	3,6	1,4	2,6	6,2	15,0
137	VPC-0402-208	Rio Limari	280776	6598796	10,0	24,6	1,0	10,1	34,7	100,0
138	VPC-0402-209	Rio Limari	280850	6598564	10,1	22,5	1,1	9,6	32,1	100,0
139	VPC-0402-186	Rio Limari	286274	6604438	14,0	38,3	0,8	18,2	56,4	56,3
140	VPC-0402-143	Rio Limari	300675	6543460	12,0	9,7	0,2	80,0	89,7	150,0
141	VPC-0402-139	Rio Limari	303514	6594337	12,0	63,0	0,7	16,2	79,2	150,0
142	VPC-0402-140	Rio Limari	304166	6595060	6,0	40,2	0,1	60,0	100,2	150,0
143	VPC-0402-141	Rio Limari	305160	6594933	7,0	46,2	0,2	38,9	85,1	150,0
144	VPC-0402-142	Rio Limari	313473	6594514	17,0	11,1	10,4	1,6	12,7	60,0
145	VPC-0402-145	Rio Limari	282993	6592365	30,0	9,1	1,7	17,8	26,9	80,0
146	VPC-0402-148	Rio Limari	286507	6618714	13,0	44,7	1,2	10,7	55,4	102,0
147	VPC-0402-136	Rio Limari	282549	6592909	16,0	16,2	1,2	13,2	29,4	60,0
148	VPC-0402-131	Rio Limari	320321	6599910	30,0	3,0	2,2	13,5	16,5	50,0
149	VF-0402-29	Rio Limari	291889	6613648	70,0	3,6	93,3	0,8	4,3	
150	ND-0402-4664	Rio Limari	252691	6604994	5,1	10,2	0,3	19,6	29,9	63,0

Tabla A.6. (Continuación) Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
151	VPC-0402-19	Rio Limari	289370	6608234	55,0	17,7	3,4	16,2	33,9	60,0
152	VPC-0402-40	Rio Limari	284866	6601977	25,0	21,6	1,5	16,7	38,3	63,0
153	VPC-0402-24	Rio Limari	289376	6608269	55,0	17,7	3,4	16,2	33,9	60,0
154	VPC-0402-14	Rio Limari	287377	6606152	8,0	35,0	0,8	10,0	45,0	65,0
155	VPC-0402-14	Rio Limari	288106	6606430	21,0	34,0	1,0	21,0	55,0	81,0
156	ND-0402-1986	Rio Limari	293641	6612570	24,2	2,3	24,4	1,0	3,3	25,0
157	ND-0402-1999	Rio Limari	329933	6582032	20,0	1,6	5,9	3,4	5,0	8,9
158	ND-0402-2008	Rio Limari	309479	6539781	12,0	3,1	10,4	1,2	4,2	12,0
159	ND-0402-2194	Rio Limari	306542	6579326	7,0	4,6	5,3	1,3	6,0	10,0
160	ND-0402-2012	Rio Limari	332186	6643570	7,2	6,0	6,0	1,2	7,2	24,0
161	VF-0402-15	Rio Limari	332360	6600961	20,0	24,0	1,7	12,1	36,1	75,3
162	ND-0402-4453	Rio Limari	298292	6630143	5,8	4,0	0,3	20,0	24,0	28,0
163	ND-0402-2344	Rio Limari	313659	6634015	8,0	2,9	0,0			37,0
164	ND-0402-386	Rio Limari	308820	6579069	8,0	24,8	0,3	30,8	55,5	85,0
165	ND-0402-386	Rio Limari	308028	6578681	5,0	27,0	0,3	17,2	44,2	80,0
166	ND-0402-403	Rio Limari	295663	6609476	8,2	2,7	3,8	2,1	4,9	7,8
167	ND-0402-394	Rio Limari	280267	6599146	32,0	10,5	11,1	2,9	13,4	16,2
168	ND-0402-433	Rio Limari	289643	6607848	13,0	20,2	3,7	3,5	23,7	50,0
169	ND-0402-433	Rio Limari	289714	6607770	13,0	23,3	2,7	4,8	28,1	50,0
170	ND-0402-473	Rio Limari	305909	6546675	5,5	7,8	0,9	6,0	13,8	38,0
171	ND-0402-352	Rio Limari	282609	6624324	10,9	4,6	0,3	43,6	48,2	63,0
172	ND-0402-360	Rio Limari	314327	6595856	7,0	4,1	0,5	13,0	17,0	28,0
173	ND-0402-357	Rio Limari	293070	6621017	20,0	2,2	25,3	0,8	2,9	5,2
174	ND-0402-375	Rio Limari	284059	6592591	5,0	7,1	0,6	9,1	16,1	50,0
175	ND-0402-350	Rio Limari	263595	6599648	22,0	2,0	16,7	1,3	3,3	4,9

Tabla A.7. (Continuación) Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
176	VPC-0402-1	Rio Limari	293663	6624619	80,0	2,1	3,0	26,8	28,8	80,0
177	ND-0402-338	Rio Limari	286117	6620075	8,0	28,7	1,2	6,8	35,5	100,0
178	ND-0402-335	Rio Limari	280594	6617009	5,0	19,6	0,2	23,8	43,4	60,0
179	ND-0402-132	Rio Limari	314999	6596971	7,7	11,8	1,0	8,1	19,9	66,0
180	ND-0402-132	Rio Limari	313899	6593671	7,6	17,5	0,6	12,8	30,3	65,0
181	ND-0402-323	Rio Limari	290388	6616886	7,0	2,1	0,4	18,9	21,0	35,0
182	ND-0402-337	Rio Limari	311867	6546608	12,0	9,2	0,6	19,7	28,9	100,0
183	ND-0402-272	Rio Limari	292609	6620910	10,0	5,4	10,2	1,0	6,3	18,0
184	ND-0402-310	Rio Limari	273751	6593371	20,0	1,5	11,9	1,7	3,2	5,2
185	ND-0402-301	Rio Limari	323925	6600843	30,0	0,7	24,4	1,2	1,9	3,0
186	ND-0402-315	Rio Limari	276021	6588471	10,0	25,0	0,7	15,4	40,4	60,0
187	ND-0402-317	Rio Limari	285472	6620955	45,0	32,1	2,3	19,7	51,8	106,0
188	ND-0402-318	Rio Limari	285457	6620020	95,0	12,9	4,9	19,3	32,2	91,0
189	ND-0402-318	Rio Limari	285855	6620169	87,0	23,3	4,5	19,5	42,8	112,0
190	ND-0402-306	Rio Limari	282427	6617196	18,0	4,0	0,4	45,0	49,0	62,0
191	ND-0402-306	Rio Limari	281971	6617323	12,0	11,0	0,6	21,8	32,8	43,0
192	ND-0402-275	Rio Limari	313293	6594083	25,0	12,2	1,8	13,8	26,0	92,0
193	ND-0402-313	Rio Limari	305597	6543137	16,0	2,2	2,8	5,7	8,0	8,2
194	ND-0402-248	Rio Limari	303430	6546022	6,7	3,2	1,0	6,6	9,8	10,5
195	ND-0402-265	Rio Limari	303650	6545722	7,5	4,2	1,3	5,9	10,1	10,5
196	ND-0402-309	Rio Limari	281400	6602631	12,0	3,4	6,3	1,9	5,3	6,0
197	ND-0402-262	Rio Limari	279399	6590182	36,0	10,0	0,7	50,0	60,0	90,0
198	ND-0402-255	Rio Limari	287370	6606656	11,1	21,8	1,2	9,6	31,3	35,0
199	ND-0402-269	Rio Limari	282121	6591706	20,0	1,8	11,3	1,8	3,5	6,5
200	ND-0402-271	Rio Limari	292786	6616364	9,0	6,3	0,4	22,0	28,2	36,0

Tabla A.8. (Continuación) Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
201	ND-0402-281	Rio Limari	283320	6589483	20,0	1,8	4,3	4,7	6,5	70,0
202	ND-0402-238	Rio Limari	311067	6581644	7,1	8,2	2,4	3,0	11,2	65,0
203	ND-0402-225	Rio Limari	280381	6593610	11,2	0,0	12,8	0,9	0,9	2,2
204	ND-0402-225	Rio Limari	280482	6593468	8,5	0,5	17,9	0,5	1,0	2,0
205	ND-0402-188	Rio Limari	283072	6588670	5,6	4,2	2,4	2,3	6,5	14,5
206	ND-0402-239	Rio Limari	283286	6588944	20,0	2,2	4,7	4,3	6,5	12,0
207	ND-0402-222	Rio Limari	278971	6596779	9,5	0,4	95,0	0,1	0,5	10,0
208	ND-0402-196	Rio Limari	283428	6601170	38,0	18,4	15,1	2,5	20,9	55,0
209	ND-0402-192	Rio Limari	285120	6599571	5,0	9,0	0,1	41,7	50,7	60,0
210	ND-0402-86	Rio Limari	314997	6595747	22,0	3,9	4,2	5,3	9,2	80,0
211	ND-0402-86	Rio Limari	314961	6595669	22,0	3,6	4,4	5,0	8,7	63,0
212	ND-0402-187	Rio Limari	277914	6599535	8,5	11,7	0,2	38,6	50,4	64,0
213	ND-0402-187	Rio Limari	277591	6599328	5,0	12,8	0,9	5,4	18,2	64,0
214	ND-0402-87	Rio Limari	314859	6595803	24,5	5,2	8,3	2,9	8,1	75,0
215	ND-0402-137	Rio Limari	314773	6596083	6,0	10,8	0,4	16,7	27,4	75,0
216	ND-0402-160	Rio Limari	288169	6607933	12,0	18,2	2,0	5,9	24,1	28,0
217	ND-0402-161	Rio Limari	281170	6604167	5,5	15,7	0,1	61,1	76,8	90,0
218	ND-0402-162	Rio Limari	281230	6604741	6,3	17,1	0,1	57,3	74,4	80,0
219	ND-0402-101	Rio Limari	293059	6556980	5,0	3,3	5,3	0,9	4,2	5,5
220	ND-0402-178	Rio Limari	280035	6602790	15,0	17,7	0,3	57,7	75,4	120,0
221	ND-0402-182	Rio Limari	280615	6602867	6,0	15,4	0,2	37,5	52,9	63,0
222	ND-0402-182	Rio Limari	280737	6602998	6,5	15,2	0,1	46,4	61,6	71,0
223	ND-0402-144	Rio Limari	279800	6603051	12,6	15,9	0,2	54,7	70,5	108,0
224	ND-0402-106	Rio Limari	313017	6584726	8,0	14,7	0,4	21,6	36,3	39,0
225	ND-0402-64	Rio Limari	293740	6624100	70,0	9,1	3,0	23,6	32,7	42,0

Tabla A.9. (Continuación) Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

ID	Codigo Expediente	Cuenca	Este (m)	Norte (m)	Caudal PGB (L/s)	NE (m)	Caudal específico (L/s/m)	Descenso (m)	ND (m)	Profundidad (m)
226	ND-0402-64	Rio Limari	294090	6623930	60,0	14,6	2,7	22,1	36,7	55,0
227	ND-0402-52	Rio Limari	296350	6609070	5,0	6,0	1,0	5,3	11,3	25,0
228	ND-0402-62	Rio Limari	284675	6618770	7,0	1,0	12,1	0,6	1,6	2,5
229	ND-0402-82	Rio Limari	284329	6599797	6,0	11,8	0,2	30,0	41,8	58,0
230	ND-0402-82	Rio Limari	284192	6599877	9,0	9,8	0,2	45,0	54,8	66,7
231	ND-0402-82	Rio Limari	282900	6598871	6,0	2,6	0,1	60,0	62,6	66,7
232	ND-0402-82	Rio Limari	285000	6598726	6,0	3,1	0,1	46,2	49,3	53,0
233	ND-0402-47	Rio Limari	311102	6587767	36,0	0,3	37,1	1,0	1,3	4,7
234	ND-0402-45	Rio Limari	285635	6597547	13,8	7,1	0,4	38,3	45,4	80,0
235	Pozo Arrayán 1	Río Elqui	307900	6667600	1,1	5,4	0,4	3,1	8,5	91,0
236	Pozo Arrayán 2	Río Elqui	308200	6665800	1,2	9,5	0,2	5,5	15,0	91,0

Tabla A.10. (Continuación) Pruebas de bombeo de expedientes en cuencas de interés.

A continuación, se presentan gráficas de análisis pruebas de bombeo por medio de programa AquiferTest Pro.

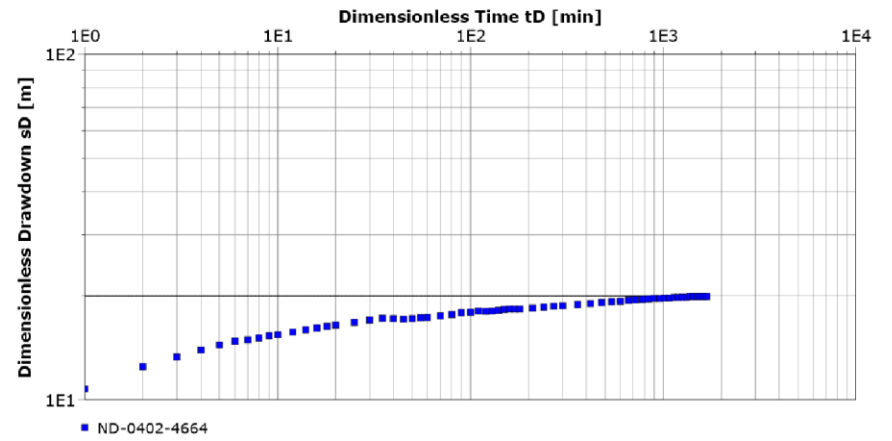
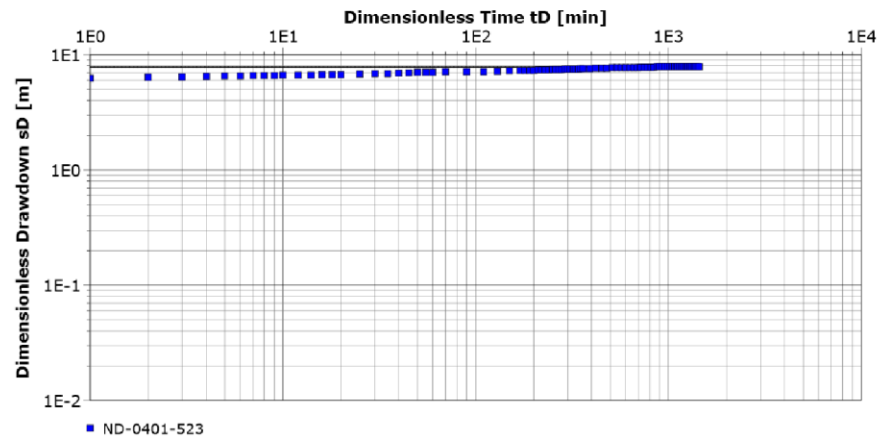
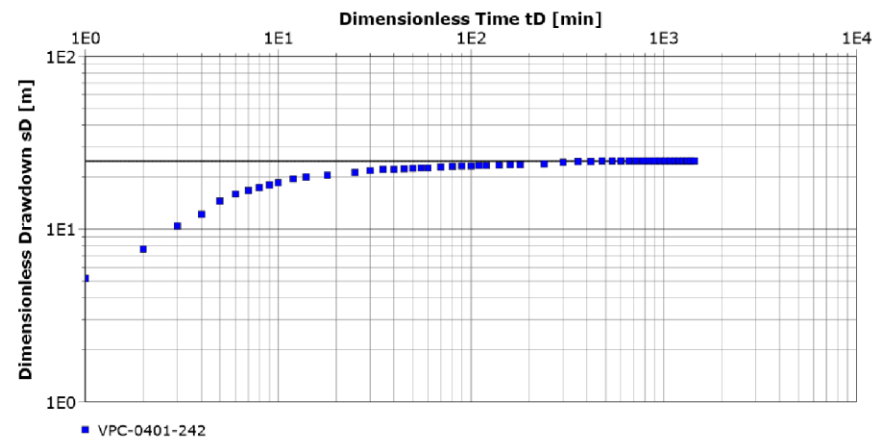
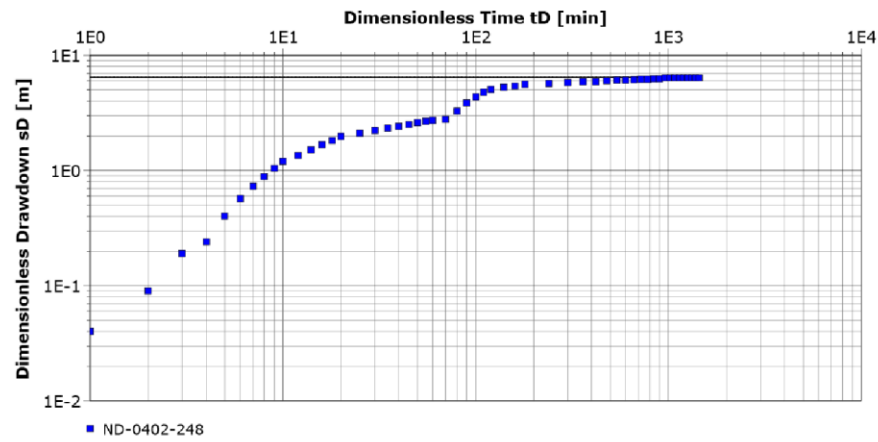


Figura A.1. Gráficos para cálculo de Transmisividad mediante análisis de abatimiento v/s tiempo (ambos en escala logarítmica).

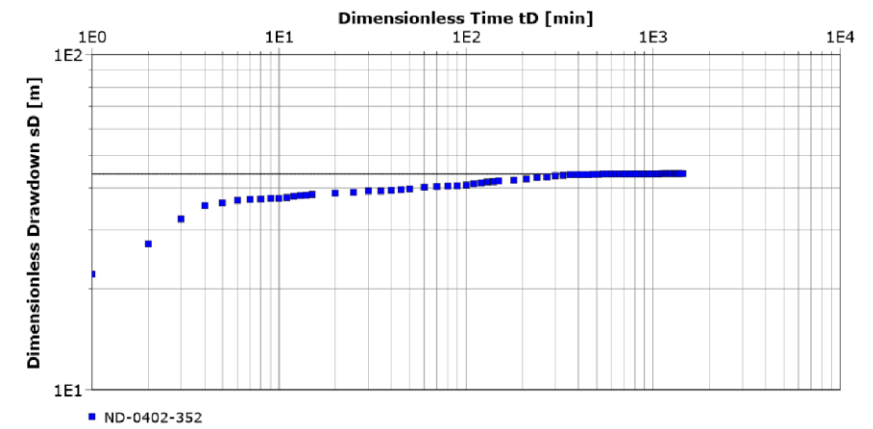
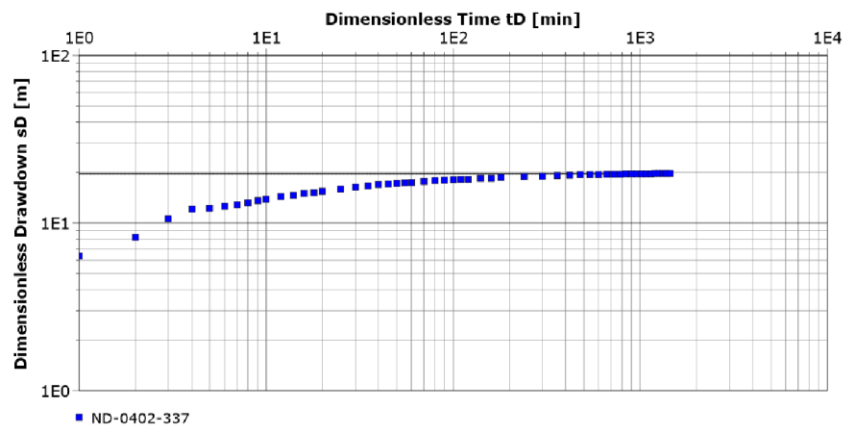
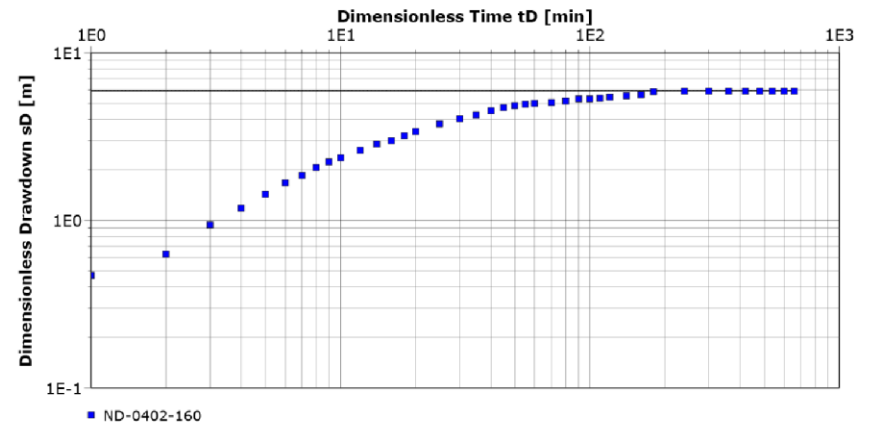
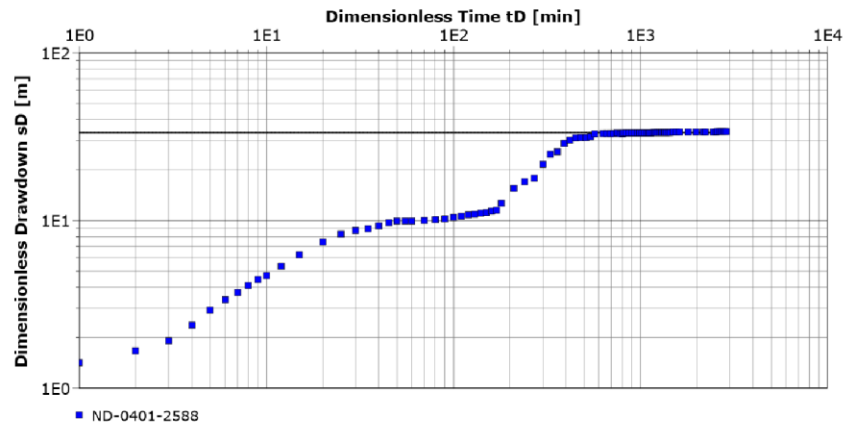


Figura A.2. Gráficos para cálculo de Transmisividad mediante análisis de abatimiento v/s tiempo (ambos en escala logarítmica).

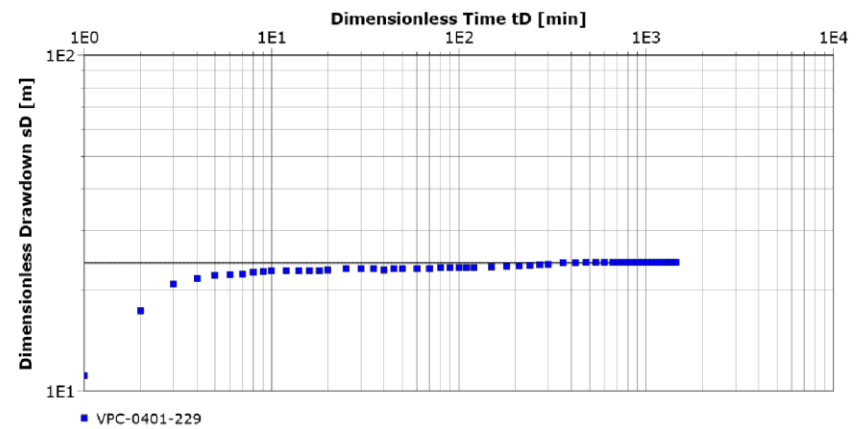
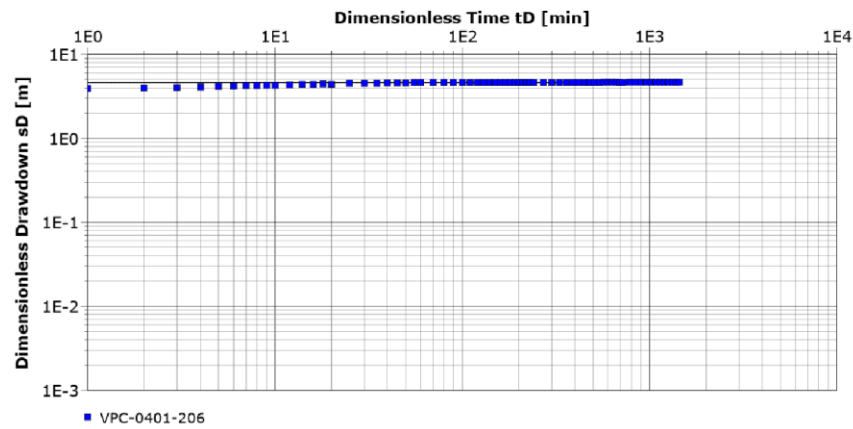
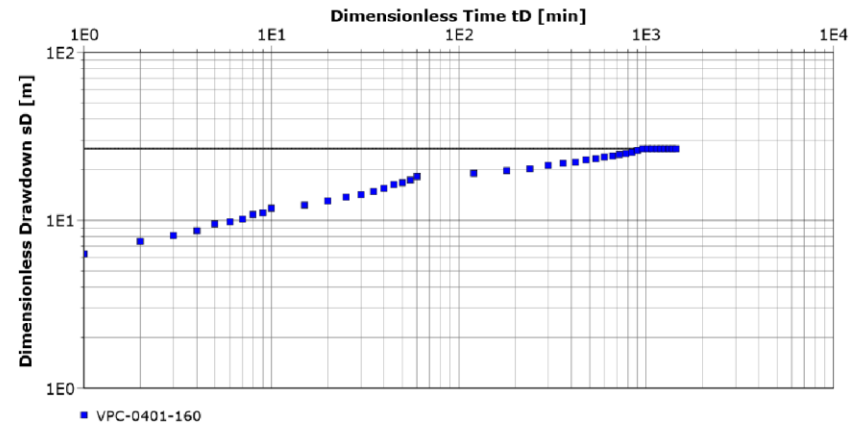
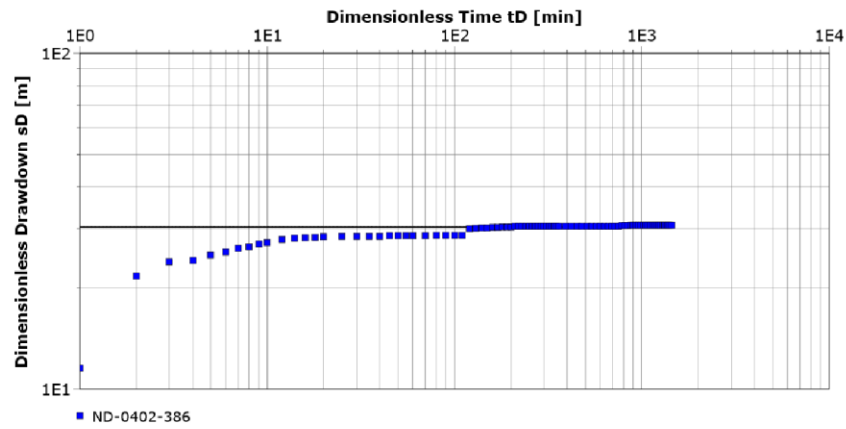


Figura A.3. Gráficos para cálculo de Transmisividad mediante análisis de abatimiento v/s tiempo (ambos en escala logarítmica).

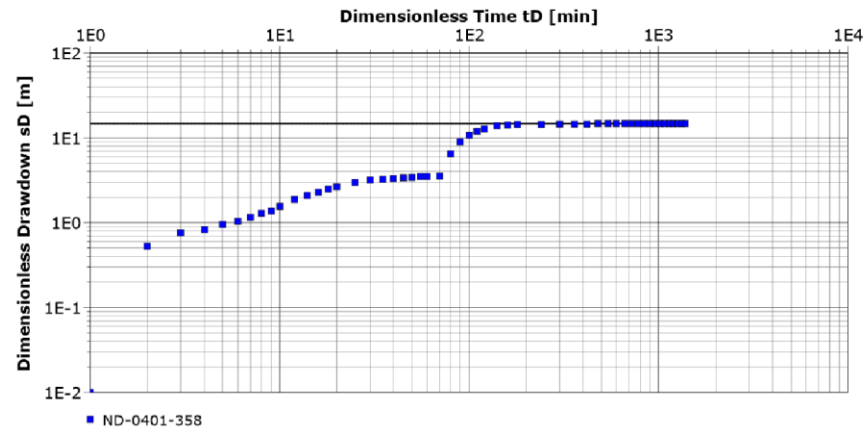
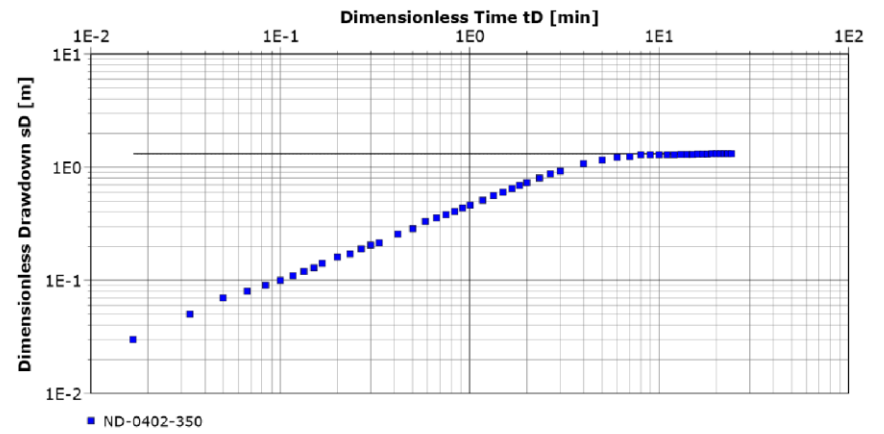
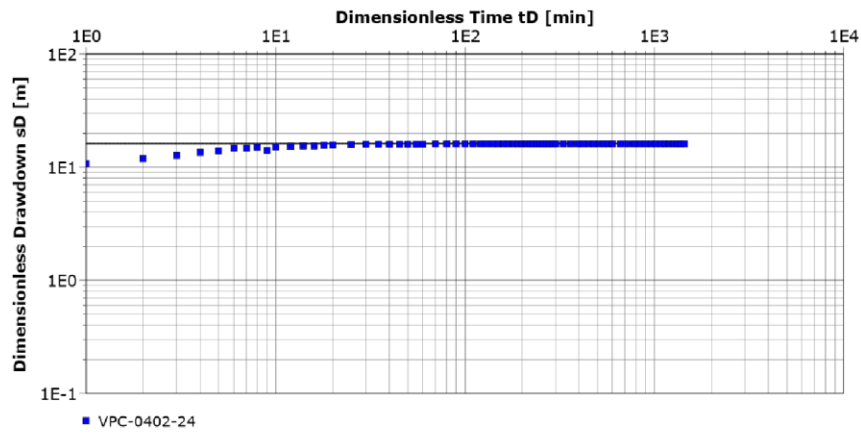


Figura A.4. Gráficos para cálculo de Transmisividad mediante análisis de abatimiento v/s tiempo (ambos en escala logarítmica).

Anexo B: Niveles Estáticos

ID	Estación	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Cuenca
1	Los Choros N1	276516	6757209	52	Río Los Choros
2	Los Choros N2	274227	6758063	53	Río Los Choros
3	Santa Fe	294017	6749390	276	Río Los Choros
4	Ang. Quebrada de Los Choros	277873	6755700	80	Río Los Choros
5	Punta Colorada 2	301512	6750361	390	Río Los Choros
6	Los Choros 4 B2	299908	6749964	315	Río Los Choros
7	Observatorio La Silla	323190	6772439	998	Río Los Choros
8	G. Cortés	294945	6748734	283	Río Los Choros
9	El Tofo 3	291160	6751551	237	Río Los Choros
10	A.P Peraillo	340060	6676449	678	Río Elqui
11	Algarrobal	346711	6680246	773	Río Elqui
12	Asentamiento Victoria B13	331919	6676480	575	Río Elqui
13	Diaguitas	342379	6677337	680	Río Elqui
14	Hacienda Huancara B8	333668	6676401	595	Río Elqui
15	A.P Vicuña	335551	6675800	618	Río Elqui
16	El Tambo B9	331984	6675974	595	Río Elqui
17	A.P Piedra C17	296765	6683275	156	Río Elqui
18	Alfalfares	291052	6687455	85	Río Elqui
19	Asentamiento Victoria	338119	6679364	0	Río Elqui
20	Bocalume	355023	6696221	1042	Río Elqui
21	Montegrande	356279	6669153	1127	Río Elqui
22	Pueblo La Campana	344364	6678352	740	Río Elqui
23	San Isidro	336901	6676781	640	Río Elqui
24	Pueblo Gualliguyaca	329860	6679579	0	Río Elqui
25	El Tambo A1	330506	6676289	560	Río Elqui

Tabla B.1. Estaciones con medición histórica desde 1970 a 2022 de niveles estáticos en la Región de Coquimbo.

ID	Estación	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Cuenca
26	Varillar	351752	6686257	873	Río Elqui
27	Pueblo El Islón	288455	6690390	59	Río Elqui
28	Mina Romeral B4	284383	6708935	216	Río Elqui
29	Mina El Romeral B10	284281	6708819	209	Río Elqui
30	Almendral	317446	6681173	403	Río Elqui
31	La Antena 2	285903	6690181	0	Río Elqui
32	Pelicana	307859	6680727	0	Río Elqui
33	Pueblo El Tambo	328400	6676813	492	Río Elqui
34	Pueblo Las Rojas	301266	6681807	210	Río Elqui
35	A.P La Serena	283396	6690748	0	Río Elqui
36	Altovalsol	297943	6687789	0	Río Elqui
37	El Molle	311416	6681792	350	Río Elqui
38	Quebrada Talca	303702	6679330	240	Río Elqui
39	Tranque Puclaro	321412	6679846	0	Río Elqui
40	El Rosario	301109	6680664	222	Río Elqui
41	Escuela Rivadavia	349321	6682342	812	Río Elqui
42	Quebrada de Paihuano	358465	6660245	0	Río Elqui
43	Almendral 1	318271	6683367	0	Río Elqui
44	Algarrobito	294143	6685840	0	Río Elqui
45	Parcela 164 Vegas Norte	282275	6693397	30	Río Elqui
46	Parcela 123 Vegas Norte	280201	6699210	5	Río Elqui
47	Asentamiento Vida Barriales	281467	6670955	113	Costeras Río Elqui-Río Limarí
48	Hijuela Santa Elena P.A	283949	6671372	124	Costeras Río Elqui-Río Limarí
49	Asentamiento Triunfo Campesino	281998	6673162	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
50	Parcela n2 San Ramón	283054	6680775	117	Costeras Río Elqui-Río Limarí

Tabla B.2 (Continuación) Estaciones con medición histórica desde 1970 a 2022 de niveles estáticos en la Región de Coquimbo.

ID	Estación	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Cuenca
51	El Sauce 2	280643	6667414	130	Costeras Río Elqui-Río Limarí
52	Firestone 1	281656	6683691	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
53	Fundo Bosques San Carlos	282346	6682719	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
54	Lanera Austral	282721	6682726	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
55	Nueva Vida	284110	6669608	123	Costeras Río Elqui-Río Limarí
56	Nueva Vida Barriales A1	301266	6681807	107	Costeras Río Elqui-Río Limarí
57	El Sauce	275673	6667922	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
58	El Sauce Santa Catalina	285549	6649204	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
59	Lo Martinez	284955	6668170	125	Costeras Río Elqui-Río Limarí
60	Asentamiento Santa Filomena	282832	6674085	124	Costeras Río Elqui-Río Limarí
61	Barrio Industrial	282275	6693397	110	Costeras Río Elqui-Río Limarí
62	Endesa S-E Pan de Azúcar	280295	6682018	92	Costeras Río Elqui-Río Limarí
63	Tambillos	284067	6663346	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
64	El Sauce 1	281313	6668998	123	Costeras Río Elqui-Río Limarí
65	Lo Zagnartu	285048	6665213	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
66	Cerrillos	283949	6671372	124	Costeras Río Elqui-Río Limarí
67	El Sauce 6	280982	6670370	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
68	Santa Carmen	284142	6667880	139	Costeras Río Elqui-Río Limarí
69	Tambillos	290287	6657305	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
70	Parcela n11C de María	284006	6680133	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
71	La Pampa	282005	6686409	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
72	Perla del Norte Chico	280664	6686382	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
73	Av. Santa Amalia	280089	6675821	101	Costeras Río Elqui-Río Limarí
74	Quebrada Seca	267397	6618947	0	Costeras Río Elqui-Río Limarí
75	Asentamiento Granero	281240	6593745	204	Río Limarí

Tabla B.3 (Continuación) Estaciones con medición histórica desde 1970 a 2022 de niveles estáticos en la Región de Coquimbo.

ID	Estación	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Cuenca
76	Asentamiento Nogales	275872	6597133	230	Río Limarí
77	Asentamiento Sol de Pradera	334594	6595972	981	Río Limarí
78	Asentamiento Unión Campesina	279548	6598868	236	Río Limarí
79	La Higuera	313344	6594487	398	Río Limarí
80	Montepatria	312477	6602608	400	Río Limarí
81	A.P Punitaqui	284512	6548752	221	Río Limarí
82	Asentamiento Los Litres	314861	6592605	0	Río Limarí
83	Asentamiento Santa Rosa	321852	6595958	403	Río Limarí
84	Chilecito	323659	6595834	408	Río Limarí
85	Asentamiento Nueva Aurora	283379	6600678	245	Río Limarí
86	Fundo Cogotí	309216	6561652	737	Río Limarí
87	Fundo Las Represas Vitivinícolas	313036	6602122	404	Río Limarí
88	Pueblo Recoleta	293938	6623558	313	Río Limarí
89	Mina Panucillo	291502	6618057	264	Río Limarí
90	Asentamiento Alborada Juntas	320248	6600844	500	Río Limarí
91	Canal Tabalí	267670	6608638	81	Río Limarí
92	Combarbalá	214847	6547096	0	Río Limarí
93	Hacienda Huancara B8	312641	6590256	0	Río Limarí
94	Llanos de Chingay	303335	6544435	0	Río Limarí
95	Pueblo Samo Alto	313689	6634011	601	Río Limarí
96	A.P Chañaral	307069	6581576	475	Río Limarí
97	Asentamiento Campo Lindo	274372	6597913	190	Río Limarí
98	Asentamiento Las Vegas	283110	6608032	150	Río Limarí
99	Barraza	261062	6605244	78	Río Limarí
100	Pueblo La Ligua	305830	6564109	680	Río Limarí

Tabla B.4 (Continuación) Estaciones con medición histórica desde 1970 a 2022 de niveles estáticos en la Región de Coquimbo.

ID	Estación	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Cuenca
101	Pueblo Pichasca	320438	6636282	0	Río Limarí
102	Pueblo San Julián	275603	6607964	124	Río Limarí
103	Asentamiento Cerrillos	324787	6600818	633	Río Limarí
104	Fundo El Mirador	286670	6610192	196	Río Limarí
105	Fundo San Felix	296644	6621042	325	Río Limarí
106	La Paloma	305091	6602198	325	Río Limarí
107	Llanos de Chingay 2	303926	6544890	876	Río Limarí
108	Parcela 13 Limarí	281357	6607629	158	Río Limarí
109	Pueblo Lagunilla	291902	6619231	303	Río Limarí
110	Fundo Las Represas	319953	6598144	381	Río Limarí
111	Pueblo Limarí	282655	6610823	0	Río Limarí
112	Carachilla	300804	6605181	289	Río Limarí
113	Asentamiento Panguecillos	322861	6476460	636	Río Choapa
114	Asentamiento El Tambo	309891	6481635	459	Río Choapa
115	Pueblo Cuz Cuz	291343	6498051	0	Río Choapa
116	Pueblo Cárcamo	303412	6503579	469	Río Choapa
117	Chalinga	315256	6487415	0	Río Choapa
118	Tunga Norte	275546	6498190	97	Río Choapa
119	Pueblo Huentelauquén	259538	6500436	13	Río Choapa
120	Pozo Los Vilos	265675	6471821	15	Costeras Río Los Choros-Río Elqui
121	Chigualoco	263418	6485153	12	Costeras Río Los Choros-Río Elqui
122	Pueblo Quilimarí	265217	6444054	13	Río Quilimarí
123	Fundo Santa Inés	263151	6441475	7	Río Quilimarí

Tabla B.5 (Continuación) Estaciones con medición histórica desde 1970 a 2022 de niveles estáticos en la Región de Coquimbo.

Anexo C: Muestras Análisis Parámetros Fisicoquímicos

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente	pH	T	CE
1	APF1	282068	6693418	9	Manantial	7,2	18,76	4689
2	APF2	281705	6692252	11	Manantial	7,93	15,00	2519
3	APF3	281976	6690468	8	Manantial	8,55	17,60	2430
4	APF4	284367	6690099	26	Manantial	7,25	18,17	2409
5	APF5	285031	6689951	38	Manantial	7,06	17,50	5506
6	APF6	286112	6689939	39	Manantial	7,34	17,71	2287
7	APF7	287140	6689774	45	Manantial	7,32	17,74	1167
8	APF8	287992	6690168	49	Manantial	7,52	19,96	3034
9	APF9	288611	6689914	54	Manantial	7,57	19,82	2844
10	APF10	288454	6690389	62	Manantial	7,78	19,00	1558
11	APF11	293385	6685809	111	Manantial	7,4	15,98	2746
12	APF12	290530	6688168	78	Manantial	7,51	18,42	1944
13	APF13	291054	6687457	91	Manantial	7,67	18,18	1101
14	APF14	351660	6686060	879	Superficial	7,26	7,97	994
15	APF15	365905	6697375	1209	Superficial	8,13	9,53	1020
16	APF16	365549	6697429	1200	Manantial	7,41	17,20	1042
17	APF17	353236	6691850	958	Superficial	8,3	8,94	1024
18	APF18	353189	6691236	947	Manantial	7,7	18,51	765
19	APF19	353119	6691390	954	Manantial	7,57	18,57	807
20	APF20	351754	6686216	880	Manantial	7,6	21,71	874
21	APF21	349931	6682121	819	Superficial	8,4	12,42	383
22	APF22	348546	6681648	795	Superficial	8,18	11,45	833
23	APF23	346959	6680123	766	Superficial	8,16	11,17	840
24	APF24	356365	6669094	1114	Superficial	6,91	7,60	300
25	APF25	356203	6662319	1330	Manantial	6,75	12,77	268

Tabla C.1. Muestras de agua subterránea y superficial en cuencas de interés para análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, CE, T).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente	pH	T	CE
26	APF26	359892	6676551	1596	Superficial	7,56	6,99	164
27	APF27	358873	6677055	1447	Manantial	7,25	16,13	252
28	APF28	354218	6677343	1018	Manantial	7,2	15,97	353
29	APF29	349257	6682384	811	Manantial	6,7	17,91	1760
30	APF30	349628	6682727	820	Manantial	7,5	18,31	985
31	APF31	308278	6666093	486	Manantial	7,3	20,95	2302
32	APF32	308029	6666536	476	Manantial	7,2	21,60	283
33	APF33	308169	6667797	463	Manantial	7,22	20,93	2659
34	APF34	308446	6668125	465	Manantial	7,31	20,66	1888
35	APF35	308086	6676202	327	Manantial	7,47	18,73	1339
36	APF36	308481	6678302	296	Manantial	7,3	17,80	1144
37	APF37	308366	6676724	310	Manantial	7,6	18,85	1242
38	APF38	304375	6680469	265	Manantial	7,3	18,55	1299
39	APF39	301061	6681578	202	Superficial	8,3	13,67	892
40	APF40	291940	6691227	109	Manantial	7,09	18,92	1321
41	APF41	294876	6685153	127	Manantial	7,23	18,47	1256
42	APF42	289091	6689016	62	Manantial	7,52	18,70	1498
43	APF43	289236	6688918	65	Manantial	7,49	19,61	1620
44	APF44	289151	6688954	65	Manantial	7,46	19,97	1754
45	APF45	289287	6688847	65	Manantial	7,38	19,65	1616
46	APF46	289389	6688854	65	Manantial	7,46	19,80	1453
47	APF47	289483	6688802	66	Manantial	7,3	19,40	1544
48	APF48	289530	6688715	68	Manantial	7,35	19,78	1838
49	APF49	283593	6680453	111	Manantial	7,69	17,60	1312
50	APF50	284559	6667996	138	Manantial	7,01	20,73	2290

Tabla C.2. (Continuación) Muestras de agua subterránea y superficial en cuencas de interés para análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, CE, T).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente	pH	T	CE
51	APF51	284561	6667379	147	Manantial	7,2	20,46	2357
52	APF52	283633	6669729	125	Manantial	7,46	20,26	1782
53	APF53	283515	6669983	124	Manantial	7,34	20,12	2260
54	APF54	282914	6671802	120	Manantial	7,63	20,15	3117
55	APF55	283912	6671423	126	Manantial	7,75	19,72	1513
56	APF56	283830	6671195	127	Manantial	7,76	13,89	1505
57	APF57	284012	6671125	126	Manantial	7,63	16,48	1485
58	APF58	283942	6670903	128	Manantial	7,34	18,78	1451
59	APF59	284504	6668523	134	Manantial	7,29	19,20	1656
60	APF60	284613	6668316	137	Manantial	7,3	20,34	2106
61	APF61	285203	6666228	153	Manantial	7,74	13,02	1393
62	APF62	284762	6666515	146	Manantial	7,74	20,32	1127
63	APF63	281366	6668741	128	Manantial	7,25	21,23	3644
64	APF64	281325	6669020	127	Manantial	7,14	20,36	4745
65	APF65	281318	6669313	124	Manantial	7,15	20,75	6960
66	APF66	281392	6669779	122	Manantial	7,15	20,64	5253
67	APF67	281260	6669849	120	Manantial	7,04	20,24	6124
68	APF68	281416	6670639	114	Manantial	7,19	19,83	8062
69	APF69	282035	6670018	116	Manantial	7,45	19,40	4947
70	APF70	281795	6670004	124	Manantial	7,55	20,07	4132
71	APF71	284723	6674138	141	Manantial	7,65	19,90	1244
72	APF72	284708	6674013	139	Manantial	7,59	19,36	1209
73	APF73	284717	6673854	137	Manantial	7,4	19,51	1453
74	APF74	280624	6607674	156	Manantial	6,93	17,90	1070
75	APF75	280274	6606817	151	Manantial	7,18	19,04	1076

Tabla C.3. (Continuación) Muestras de agua subterránea y superficial en cuencas de interés para análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, CE, T).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente	pH	T	CE
76	APF76	276794	6608895	130	Manantial	7,2	16,25	4794
77	APF77	275635	6608113	125	Manantial	7,16	17,55	1015
78	APF78	273691	6605065	254	Manantial	7,64	19,44	7811
79	APF79	273601	6604830	255	Manantial	7,96	20,17	5185
80	APF80	261756	6600402	54	Manantial	7,29	18,77	5444
81	APF81	257361	6604270	38	Superficial	7,68	16,04	3524
82	APF82	261553	6605782	51	Manantial	7,3	19,51	3351
83	APF83	260609	6610184	171	Manantial	7,82	14,16	2957
84	APF84	267293	6608805	82	Manantial	7,12	15,79	3364
85	APF85	272665	6610588	121	Manantial	7,5	19,60	1635
86	APF86	272602	6610548	120	Manantial	7,58	17,38	1465
87	APF87	285204	6582093	243	Manantial	6,9	18,02	576
88	APF88	284536	6584891	228	Manantial	7,15	20,54	864
89	APF89	284892	6584451	237	Manantial	7,64	21,97	790
90	APF90	285112	6585442	244	Manantial	7,59	22,74	809
91	APF91	277876	6582370	386	Manantial	6,93	15,11	835
92	APF92	281334	6585517	250	Manantial	7,41	19,36	1123
93	APF94	281098	6593986	195	Manantial	7,5	20,62	1057
94	APF95	276754	6608652	130	Manantial	7,83	13,26	1342
95	APF96	345995	6637609	1648	Superficial	6,86	5,77	414
96	APF97	346543	6636828	1687	Superficial	7,12	13,60	398
97	APF98	330594	6642188	925	Manantial	7,8	10,69	457
98	APF99	320478	6636425	715	Superficial	7,3	13,39	565
99	APF100	305096	6564637	667	Manantial	8,2	16,66	628
100	APF101	301390	6557304	757	Superficial	6,84	12,70	399

Tabla C.4. (Continuación) Muestras de agua subterránea y superficial en cuencas de interés para análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, CE, T).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente	pH	T	CE
101	APF102	301554	6556705	711	Superficial	7,64	14,60	97
102	APF103	317853	6543179	1307	Manantial	7,32	5,88	200
103	APF104	314404	6546850	1122	Superficial	7,81	8,58	423
104	APF105	309722	6547874	931	Superficial	8,02	22,50	677
105	APF106	308901	6549721	860	Manantial	8,29	11,82	378
106	APF107	305598	6554184	773	Superficial	7,91	17,73	574
107	APF108	308568	6562087	720	Superficial	7,39	19,09	492
108	APF109	308856	6561749	725	Manantial	7,22	19,06	464
109	APF110	330689	6577018	879	Manantial	7,07	9,93	406
110	APF111	348720	6567580	1380	Superficial	8,07	10,37	394
111	APF112	341053	6567407	1235	Superficial	8,09	9,73	289
112	APF113	283097	6590891	195	Superficial	7,25	19,50	1612
113	APF114	283247	6590461	196	Manantial	7,5	18,90	892
114	APF115	283291	6590326	195	Manantial	7,81	16,75	603
115	APF116	268689	6609618	91	Manantial	6,95	17,70	3338
116	APF117	404269	6689951	3255	Manantial	6,43	32,50	3251
117	APF118	281506	6681875	109	Manantial	7,92	14,27	1223
118	APF119	268263	6615155	245	Manantial	7,54	21,55	2249
119	APF120	267825	6618471	232	Manantial	7,66	20,51	1567
120	APF121	266179	6617638	199	Manantial	7,2	13,25	2595
121	APF122	262428	6620644	127	Manantial	7,82	13,43	7430
122	APF123	261282	6597243	93	Manantial	9,3	26,50	1514
123	APF124	283065	6690838	15	Manantial	6,88	13,50	1905
124	APF125	282959	6690761	17	Manantial	6,96	17,34	2533
125	APF126	279571	6598859	239	Manantial	7,32	18,94	2853

Tabla C.5. (Continuación) Muestras de agua subterránea y superficial en cuencas de interés para análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, CE, T).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente	pH	T	CE
126	APF127	281212	6598039	216	Manantial	7,69	19,77	1063
127	APF128	278913	6602952	256	Manantial	7,54	21,60	4686
128	APF129	279054	6603051	255	Manantial	7,6	21,72	1976
129	APF130	270400	6595692	117	Manantial	7,05	20,72	1268
130	APF131	270101	6595677	120	Manantial	7,39	14,05	1583
131	APF132	275427	6597445	237	Manantial	7,39	20,72	1806
132	APF133	275071	6597686	237	Manantial	7,52	20,19	1977
133	APF134	275875	6597145	232	Manantial	7,62	20,63	2067
134	APF135	348341	6635516	1754	Manantial	6,54	8,89	405
135	APF136	349470	6566355	1433	Manantial	7,25	12,02	461
136	HQ1	284445	6670415	130	Manantial	6,7	18	
137	HQ2	283940	6670329	124	Manantial	7,7	15,1	1057
138	HQ4	283863	6681278	119	Manantial	8,4	18,3	910
139	HQ6	282434	6670217	119	Manantial	6,6	17,8	5040
140	HQ7	284427	6673818	134	Manantial	6,5	16,4	1823
141	HQ8	283010	6680810	121	Manantial	7,5	22,5	1353
142	HQ9	283451	6671533	121	Manantial	7,26	16,1	1440
143	HQ10	283349	6671194	120	Manantial	7,32	25	
144	HQ11	283222	6671499	119	Manantial	7,8	25	
145	HQ12	283518	6668180	131	Manantial	7,31	17,4	964
146	HQ13	282850	6671378	121	Manantial	7,01	20,8	2230
147	HQ14	281797	6670003	124	Manantial	7,4	19,7	1603
148	HQ15	355828	6669754	1141	Manantial	8,3	14,1	309
149	HQ16	331422	6675909	574	Manantial	7,4	20	781
150	HQ17	297263	6683183	161	Manantial	7,9		1112

Tabla C.6. (Continuación) Muestras de agua subterránea y superficial en cuencas de interés para análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, CE, T).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente	pH	T	CE
151	HQ18	294477	6692999	200	Manantial	6,9	17	1600
152	HQ19	300080	6682950	189	Manantial	7,3	17	900
153	HQ20	298700	6682848	180	Manantial	7,3	17	750
154	HQ22	287994	6690161	49	Manantial	7,3	20,3	1303
155	HQ23	287592	6690192	45	Manantial	7,2	19,9	1189
156	HQ24	289274	6689391	61	Manantial	7,2	19,3	1815
157	HQ25	289338	6689334	62	Manantial	7,8	16,4	1842
158	HQ26	289420	6689298	64	Manantial	7,3	12,8	1839
159	HQ27	289471	6689224	65	Manantial	7,3	19,8	2040
160	HQ28	289575	6689235	65	Manantial	7	18,6	1859
161	HQ29	289670	6689182	65	Manantial	7	21,8	1943
162	HQ30	289711	6689094	66	Manantial	7	20,4	2050
163	HQ31	289110	6689499	59	Manantial	7,1	16,9	1528
164	HQ34	282549	6592909	200	Manantial	7,9		
165	HQ35	289370	6608234	296	Manantial	7,6	19,7	349
166	HQ36	284866	6601977	279	Manantial	7,7	14,9	1040
167	HQ37	293641	6612570	238	Manantial			420
168	HQ38	293663	6624619	324	Manantial	7,5	18	900
169	HQ39	292609	6620910	313	Manantial	7,5	17	650
170	HQ40	285472	6620955	299	Manantial	7,4	27	810
171	HQ41	279399	6590182	198	Manantial	7,8	19	320
172	HQ42	283072	6588670	200	Manantial	7,6		759
173	HQ43	283428	6601170	269	Manantial	7,8		738
174	HQ44	280035	6602790	259	Manantial	7,5		760
175	HQ45	279800	6603051	259	Manantial	7,7		830

Tabla C.7. (Continuación) Muestras de agua subterránea y superficial en cuencas de interés para análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, CE, T).

Anexo D: Muestras Análisis Hidroquímicos

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente	ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente
1	APF2	281705	6692252	11	Manantial	26	APF135	348341	6635516	1754	Manantial
2	APF4	284367	6690099	26	Manantial	27	APF136	349470	6566355	1433	Manantial
3	APF7	287140	6689774	45	Manantial	28	HQ1	284445	6670415	130	Manantial
4	APF10	288454	6690389	62	Manantial	29	HQ2	283940	6670329	124	Manantial
5	APF13	291054	6687457	91	Manantial	30	HQ3	285204	6666229	153	Manantial
6	APF31	308278	6666093	486	Manantial	31	HQ4	283863	6681278	119	Manantial
7	APF33	308169	6667797	463	Manantial	32	HQ5	282869	6671875	120	Manantial
8	APF49	283593	6680453	111	Manantial	33	HQ6	282434	6670217	119	Manantial
9	APF50	284559	6667996	138	Manantial	34	HQ7	284427	6673818	134	Manantial
10	APF52	283633	6669729	125	Manantial	35	HQ8	283010	6680810	121	Manantial
11	APF54	282914	6671802	120	Manantial	36	HQ9	283451	6671533	121	Manantial
12	APF56	283830	6671195	127	Manantial	37	HQ10	283349	6671194	120	Manantial
13	APF61	285203	6666228	153	Manantial	38	HQ11	283222	6671499	119	Manantial
14	APF71	284723	6674138	141	Manantial	39	HQ12	283518	6668180	131	Manantial
15	APF78	273691	6605065	254	Manantial	40	HQ13	282850	6671378	121	Manantial
16	APF84	267293	6608805	82	Manantial	41	HQ14	281797	6670003	124	Manantial
17	APF89	284892	6584451	237	Manantial	42	HQ15	355828	6669754	1141	Manantial
18	APF90	285112	6585442	244	Manantial	43	HQ16	331422	6675909	574	Manantial
19	APF91	277876	6582370	386	Manantial	44	HQ17	297263	6683183	161	Manantial
20	APF92	281334	6585517	250	Manantial	45	HQ18	294477	6692999	200	Manantial
21	APF105	309722	6547874	931	Manantial	46	HQ19	300080	6682950	189	Manantial
22	APF117	404269	6689951	3255	Manantial	47	HQ20	298700	6682848	180	Manantial
23	APF119	268263	6615155	245	Manantial	48	HQ21	288612	6689915	54	Manantial
24	APF120	267825	6618471	232	Manantial	49	HQ22	287994	6690161	49	Manantial
25	APF123	261282	6597243	93	Manantial	50	HQ23	287592	6690192	45	Manantial

Tabla D.1. Muestras de agua subterránea con información hidroquímica obtenida en proyecto y también de expedientes DGA de cuencas de interés.

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Fuente
51	HQ24	289274	6689391	61	Manantial
52	HQ25	289338	6689334	62	Manantial
53	HQ26	289420	6689298	64	Manantial
54	HQ27	289471	6689224	65	Manantial
55	HQ28	289575	6689235	65	Manantial
56	HQ29	289670	6689182	65	Manantial
57	HQ30	289711	6689094	66	Manantial
58	HQ31	289110	6689499	59	Manantial
59	HQ32	308567	6677056	316	Manantial
60	HQ33	308540	6678820	316	Manantial
61	HQ34	282549	6592909	200	Manantial
62	HQ35	289370	6608234	296	Manantial
63	HQ36	284866	6601977	279	Manantial
64	HQ37	293641	6612570	238	Manantial
65	HQ38	293663	6624619	324	Manantial
66	HQ39	292609	6620910	313	Manantial
67	HQ40	285472	6620955	299	Manantial
68	HQ41	279399	6590182	198	Manantial
69	HQ42	283072	6588670	200	Manantial
70	HQ43	283428	6601170	269	Manantial
71	HQ44	280035	6602790	259	Manantial
72	HQ45	279800	6603051	259	Manantial

Tabla D.2. (Continuación) Muestras de agua subterránea con información hidroquímica obtenida en proyecto y también de expedientes DGA de cuencas de interés.

Anexo E: Muestras Análisis Isotópico

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
1	APF001	285027	6668157	140	-10,85	-83,90
2	APF002	283697	6670410	124	-9,02	-73,07
3	APF003	279224	6681167	76	-8,74	-64,21
4	APF004	353230	6691800	957	-10,69	-82,44
5	APF005	359700	6676673	1561	-10,50	-80,51
6	APF006	349344	6683618	989	-12,91	-97,88
7	APF007	352198	6686736	952	-12,28	-93,31
8	APF008	291128	6687599	90	-11,47	-86,53
9	APF009	282158	6693464	11	-11,64	-88,36
10	APF010	280923	6688018	7	-11,24	-86,94
11	APF011	349932	6682122	819	-11,41	-89,67
12	APF012	282226	6690712	6	-13,10	-99,54
13	APF013	348673	6681605	802	-13,07	-98,95
14	APF014	350256	6683474	840	-14,36	-109,92
15	APF015	365906	6697376	1209	-14,93	-112,98
16	APF016	351661	6686061	879	-14,21	-106,98
17	APF017	295954	6686551	202	-14,83	-112,56
18	APF018	295351	6693039	219	-14,16	-105,98
19	APF019	289025	6691165	219	-13,97	-104,77
20	APF020	308320	6680397	374	-13,63	-102,37
21	APF021	356125	6669360	1125	-13,58	-99,46
22	APF022	356140	6670285	1107	-14,31	-108,16
23	APF023	346960	6680124	766	-14,11	-107,13
24	APF024	262250	6605647	67	-14,15	-103,09
25	APF025	277159	6609879	245	-13,51	-98,52

Tabla E.1. Muestras de agua subterránea con información isotópica obtenida en proyecto DGA (2022).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
26	APF026	343455	6649079	1591	-12,59	-93,25
27	APF027	304672	6560880	688	-12,78	-93,62
28	APF028	284878	6582401	240	-12,59	-92,92
29	APF029	308910	6561173	741	-13,79	-106,64
30	APF030	272867	6611238	239	-13,91	-105,94
31	APF031	346959	6637488	1813	-5,85	-43,97
32	APF032	349950	6566946	1682	-5,64	-42,02
33	APF033	275309	6607869	125	-5,87	-42,85
34	APF034	267604	6608106	96	-5,82	-42,76
35	APF035	286115	6585382	402	-7,94	-61,30
36	APF036	306128	6553791	789	-10,18	-76,56
37	APF037	309190	6549778	869	-8,81	-66,64
38	APF038	306162	6551943	834	-12,76	-96,26
39	APF039	310273	6548876	918	-10,89	-86,02
40	APF040	348721	6567581	1380	-12,23	-93,04
41	APF041	346264	6637602	1679	-12,19	-95,41
42	APF042	262018	6606505	54	-12,49	-94,91
43	APF043	276358	6608661	127	-12,13	-93,52
44	APF044	302846	6559275	835	-12,14	-91,94
45	APF045	341054	6567408	1235	-12,11	-92,79
46	APF046	281423	6594131	194	-13,11	-97,56
47	APF047	280766	6608074	166	-12,56	-94,30
48	APF048	260704	6610482	180	-11,97	-89,39
49	APF049	262249	6599670	56	-12,21	-92,97
50	APF050	258700	6602555	44	-7,24	-53,49

Tabla E.2. (Continuación) Muestras de agua subterránea con información isotópica obtenida en proyecto DGA (2022).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
51	APF051	305097	6564637	667	-6,22	-42,80
52	APF052	317796	6543251	1301	-10,96	-79,43
53	APF053	330690	6577019	879	-10,33	-77,52
54	APF054	330160	6642905	1068	-8,83	-65,06
55	APF055	352385	6628679	2041	-11,00	-82,00
56	APF056	257311	6604262	45	-12,23	-91,91
57	APF057	288612	6689915	54	-11,53	-86,95
58	APF058	287592	6690192	45	-10,93	-81,24
59	APF059	287137	6689766	45	-8,73	-62,95
60	APF060	285485	6690256	32	-6,14	-43,47
61	APF061	286115	6689939	39	-9,88	-72,51
62	APF062	285031	6689905	42	-5,51	-35,61
63	APF063	284364	6690093	24	-5,09	-33,94
64	APF064	281979	6690465	8	-4,84	-32,89
65	APF065	290413	6688304	76	-4,69	-33,01
66	APF066	282789	6674849	123	-5,53	-39,26
67	APF067	283333	6679785	109	-5,07	-34,79
68	APF068	283863	6681278	119	-5,49	-39,57
69	APF069	283684	6666498	138	-6,32	-47,34
70	APF070	281973	6670514	114	-7,43	-54,45
71	APF071	284705	6674011	139	-11,04	-82,52
72	APF072	285204	6666229	153	-11,32	-86,71
73	APF073	282869	6671875	120	-10,61	-81,06
74	APF074	268091	6616822	242	-7,34	-57,92
75	APF075	267669	6616670	228	-6,94	-56,73

Tabla E.3. (Continuación) Muestras de agua subterránea con información isotópica obtenida en proyecto DGA (2022).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
76	APF076	284856	6585168	235	-6,72	-54,21
77	APF077	285114	6585444	244	-7,15	-56,37
78	APF078	308100	6674904	341	-7,64	-58,76
79	APF079	304961	6670611	676	-7,48	-57,29
80	APF080	308173	6667796	463	-5,57	-37,53
81	APF081	289511	6688762	69	-6,72	-51,32
82	APF082	288910	6689167	60	-6,35	-49,93
83	APF083	284568	6667372	147	-7,06	-52,09
84	APF084	284227	6673487	133	-6,30	-51,86
85	APF085	282826	6669490	119	-7,56	-56,00
86	APF086	282650	6671047	124	-6,26	-49,96
87	APF087	268251	6615250	245	-5,67	-29,92
88	APF088	273697	6605067	254	-6,98	-45,15
89	APF089	308366	6676724	310	-6,41	-41,17
90	APF090	308339	6678488	298	-7,05	-48,38
91	APF091	283457	6668145	133	-5,78	-33,36
92	APF092	282832	6674085	122	-6,10	-41,56
93	APF094	281998	6673162	122	-6,47	-44,14
94	APF095	283949	6671372	129	-5,68	-47,69
95	APF096	282005	6686409	24	-14,25	-104,22
96	APF097	285048	6665213	143	-13,75	-100,21
97	APF098	284110	6669608	128	-13,54	-99,56
98	APF099	284721	6668874	135	-13,14	-96,84
99	APF100	284006	6680133	113	-10,09	-72,17
100	APF101	283054	6680775	122	-10,40	-70,99

Tabla E.4. (Continuación) Muestras de agua subterránea con información isotópica obtenida en proyecto DGA (2022).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
101	APF102	280664	6686382	12	-6,99	-43,94
102	APF103	284226	6670760	129	-11,08	-78,29
103	APF104	267397	6618947	222	-8,75	-60,85
104	APF105	264091	6621340	184	-8,34	-62,64
105	APF106	284142	6667880	137	-10,52	-72,85
106	APF107	283127	6675711	119	-9,89	-68,06
107	APF108	280089	6675821	102	-10,27	-73,52
108	APF109	281313	6668998	125	-9,33	-68,13
109	APF110	280643	6667414	131	-12,07	-89,15
110	APF111	280982	6670370	120	-13,40	-98,93
111	APF112	286721	6670082	424	-12,48	-90,75
112	APF113	281560	6681779	110	-5,19	-41,16
113	APF114	283395	6690810	18	-5,33	-36,36
114	APF115	365509	6697453	1207	-8,15	-52,45
115	APF116	355023	6696221	1033	-5,68	-48,85
116	APF117	281514	6692252	10	-14,99	-116,28
117	APF118	349321	6682342	807	-11,19	-86,72
118	APF119	289125	6690120	64	-6,51	-50,13
119	APF120	285903	6690181	37	-5,99	-43,80
120	APF121	354293	6677314	1024	-5,47	-34,23
121	APF122	288455	6690390	62	-4,81	-33,92
122	APF123	358351	6677049	1400	-6,34	-39,87
123	APF124	346711	6680246	772	-10,43	-81,71
124	APF125	293445	6685858	112	-10,65	-83,34
125	APF126	284511	6584756	223	-7,09	-48,99

Tabla E.5. (Continuación) Muestras de agua subterránea con información isotópica obtenida en proyecto DGA (2022).

ID	Muestra	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
126	APF127	261062	6605244	51	-7,37	-51,40
127	APF128	264162	6608339	68	-6,43	-44,42
128	APF129	267670	6608638	84	-7,11	-49,38
129	APF130	310186	6549213	899	-5,61	-37,01
130	APF131	303206	6549947	958	-7,74	-50,66
131	APF132	275650	6608112	125	-6,57	-44,34
132	APF133	283110	6608032	171	-7,51	-55,54
133	APF134	314847	6547096	1153	-6,37	-46,41
134	APF135	282655	6610823	253	-14,09	-104,12
135	APF136	320438	6636282	723	-12,01	-86,50
136	APF140	285027	6668157	140	-10,96	-84,08
137	APF141	280923	6688018	7	-10,79	-83,02
138	APF142	365906	6697376	1209	-10,40	-80,22
139	APF143	308320	6680397	374	-14,46	-111,80
140	APF144	277159	6609879	245	-13,23	-101,86
141	APF145	272867	6611238	239	-13,33	-98,88
142	APF146	286115	6585382	402	-13,78	-102,38
143	APF147	348721	6567581	1380	-5,55	-41,37
144	APF148	341054	6567408	1235	-8,44	-64,03
145	APF149	258700	6602555	44	-5,36	-32,73
146	APF150	352385	6628679	2041	-14,09	-103,54
147	APF151	285485	6690256	32	-9,65	-67,55
148	APF152	290413	6688304	76	-12,37	-89,20
149	APF153	281973	6670514	114	-13,61	-98,66
150	APF155	303206	6549947	958	-10,45	-81,80

Tabla E.6. (Continuación) Muestras de agua subterránea con información isotópica obtenida en proyecto DGA (2022).

Anexo F: Abreviaciones

El presente anexo contiene las formas de expresión escritas usadas en áreas de la geofísica e hidrogeología que representan palabras o grupo de palabras específicas.

Organismos

ATSDR	: Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BHP	: Broken Hill Proprietary
CEAZA	: Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas
CIREN	: Centro de Información de Recursos Naturales
COP	: Conferencia de las Partes
CORFO	: Corporación de Fomento de la Producción
COSAYACH	: Compañía de Salitre y Yodo - Atacama Chemical S.A
D.G.A	: Dirección General de Aguas
ENAMI	: Empresa Nacional de Minería
INE	: Instituto Nacional de Estadísticas
SERNAGEOMIN	: Servicio Nacional de Geología y Minería
SGS	: Société Générale de Surveillance
SOQUIMICH	: Sociedad Química y Minera de Chile S.A

Abreviaturas técnicas

A.G.I	: Advanced Geosciences Inc.
A.M.T	: Audio-frequency Magnetotellurics Technique
D.A.A	: Derechos de Aprovechamiento de Aguas
EB	: Balance Error
E.R.T	: Electrical Resistivity Tomography
GMWL	: Global Meteoric Water Line

IOCG	: Iron Oxide Copper Gold
LMWL	: Local Meteoric Water Line
M.A.S.W	: Multi-Channel Analysis of Surface Waves Surveys
MFZ	: Mountain Front Zone
ND	: Nuevos derechos de aprovechamiento solicitados a la DGA
T.E.M	: (Transient Electromagnetic)

Anexo G: Glosario

El presente anexo contiene un catálogo alfabético de palabras y conceptos técnicos, entregando la definición de algunos de estos términos técnicos fundamentales que son parte del contexto de este trabajo.

A

Agua Potable Rural: Programa destinado a dotar de agua potable a las localidades rurales del país, mediante la construcción, mantenimiento, operación y conservación de Sistemas de Agua Potable. La administración está a cargo de los beneficiarios agrupados en comités o cooperativas.

Anticiclón del Pacífico: Es definido por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) como una gran área de la atmósfera en la que el aire desciende y rota en el sentido contrario a las agujas del reloj.

C

Censo: Operación estadística más importante que realiza el INE y en la cual participan todos los habitantes del país, ya que este es un insumo esencial para elaborar estimaciones y proyecciones de población tanto para el país, regiones y comunas.

Corriente de Humboldt: Es un sistema que forma parte de la rama oriental de la circulación de las aguas oceánicas del Pacífico meridional, que forma un anillo de corrientes que giran en contrario a las agujas del reloj. Fluye en dirección norte desde aproximadamente 45°Sur, a la altura de Puerto Aisén, hasta los 4°Sur, en la costa peruana, desde donde gira hacia el oeste. Su anchura se estima en unos 900 km aproximadamente.

M

Macrozona: Agrupación de regiones de Chile en cuatro grandes zonas, debido a sus factores hidrográficos, orográficos y climáticos, atributos que mantienen cierta afinidad y coherencia. Macrozona Norte está conformada por las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Macrozona Centro incluye las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago, Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule. Macrozona Sur comprende las regiones del Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos y, por último, Macrozona Austral, integra las regiones de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y Magallanes y de la Antártica Chilena.

Método Theis: Permite predecir el descenso para los distintos tiempos de bombeo, mediante el cual se pueden calcular parámetros de transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Este método puede ser aplicado únicamente bajo ciertas circunstancias tales como que el caudal bombeado salga del acuífero, espesor saturado del acuífero sea constante y que el acuífero sea homogéneo e isótropo.

O

Ondas Rayleigh: Viajan a lo largo de la superficie libre de la Tierra con amplitudes que disminuyen exponencialmente con la profundidad. El movimiento de partículas es en sentido elíptico retrógrado en un plano vertical con respecto a la superficie.