



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



**GOBIERNO REGIONAL  
DE LA ARAUCANÍA**

**UNIDAD TÉCNICA**

**RESPONSABLE FINANCIERO**

# **ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO, REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

**2016-003  
RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR**

**ARCADIS CHILE S.A.**



**Santiago, Noviembre 2016**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas  
Sr. Carlos Estévez Valencia

Directora Regional de Aguas, Región de La Araucanía  
Sra. Vivianne Fernández Mora

Inspector Fiscal  
Sr. Julio Guerrero Soto

Profesionales División de Estudios y Planificación  
Sr. Miguel Caro Hernández

Arcadis Chile S.A.

Jefe de Proyecto  
Sr. Pablo Rengifo Oyarce

Especialistas Senior  
Sr. José Muñoz Pardo  
Sr. Eduardo Varas Castellón  
Sr. Cristian Ortiz Astete

Profesionales  
Sra. Francisca Chadwick Quezada  
Sr. Ernesto Ramírez Ovalle  
Sr. Luciano Achurra Reveco  
Sr. Rodrigo Herrera Sanaguas

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>REVISIÓN DE ANTECEDENTES</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>CATASTRO DE TERRENO Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN</b>	<b>13</b>
3.1	REVISIÓN INFORMACIÓN CATASTRO PÚBLICO DE AGUAS, CPA	13
3.2	CATASTRO DE CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	15
3.3	SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	20
3.4	DETERMINACIÓN DE DEMANDAS Y CONSUMOS	25
<b>4</b>	<b>CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA</b>	<b>28</b>
4.1	SISTEMAS DE DRENAJE	28
4.2	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CUENCAS	35
<b>5</b>	<b>MODELACIÓN HIDROLÓGICA</b>	<b>38</b>
5.1	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	38
5.2	DESCRIPCIÓN MODELO HIDROLÓGICO	38
5.3	APLICACIÓN DEL MODELO	44
<b>6</b>	<b>CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y GEOLÓGICA</b>	<b>46</b>
6.1	MARCO GEOMORFOLÓGICO REGIONAL	46
6.2	GEOLOGIA DE SUPERFICIE	47
6.3	GEOLOGÍA DE SUBSUPERFICIE	50
<b>7</b>	<b>TRABAJOS EN TERRENO - GEOFÍSICA, POZOS DE EXPLORACIÓN Y PRUEBA DE BOMBEO</b>	<b>52</b>
7.1	CAMPAÑA GRAVIMÉTRICA	52
7.2	CAMPAÑA GEOFÍSICA TEM	54
7.3	POZOS DE EXPLORACIÓN Y PRUEBAS DE BOMBEO	56
<b>8</b>	<b>CONCEPTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA</b>	<b>58</b>
8.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	58
8.2	PROPIEDADES HIDRÁULICAS	60
8.3	NIVELES Y PIEZOMETRÍA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	63
8.4	HIDROQUÍMICA	66
8.5	CONCEPTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	71
8.6	MODELO HIDROGEOLÓGICO 3D	71
8.7	RED DE MONITOREO PROPUESTA	75
<b>9</b>	<b>MODELO NUMÉRICO – CUENCAS RÍO IMPERIAL Y TOLTÉN</b>	<b>78</b>
9.1	DOMINIO, DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL	78
9.2	PROPIEDADES HIDRÁULICAS	81

9.3	CONDICIONES DE BORDE .....	83
9.4	EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS.....	86
9.5	CALIBRACIÓN MODELO DE FLUJO .....	87
9.6	RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN.....	90
9.7	OPERACIÓN DEL MODELO - SIMULACIONES .....	93
<b>10</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>95</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Cuencas en estudio de la región de la Araucanía (WGS84, Huso 18).....	7
Figura 3-1:	Caudal de derechos subterráneos de acuerdo a uso.....	15
Figura 3-2:	Distribución espacial de captaciones a visitar en catastro .....	17
Figura 3-3:	Ubicación de captaciones catastradas .....	18
Figura 3-4:	Ubicación de captaciones catastradas en terreno.....	19
Figura 3-5:	Caudal por uso de acuerdo a profundidad de captación.....	21
Figura 3-6:	Nivel Estático en pozos profundos (arriba) y someros (abajo) (NE: Nivel Estático).....	22
Figura 3-7:	Nivel Dinámico en pozos profundos (arriba) y someros (abajo).....	23
Figura 3-8:	Evolución de derechos de aprovechamiento otorgados.....	25
Figura 3-9:	Evolución de solicitudes de aprovechamiento de aguas subterráneas.....	26
Figura 4-1:	Curvas hipsométrica cuencas de estudio .....	29
Figura 4-2:	Cuenca del río Imperial y subcuencas .....	30
Figura 4-3:	Cuenca Río Toltén y subcuencas .....	32
Figura 4-4:	Cuenca Río Budi .....	33
Figura 4-5:	Cuenca costera entre Río Budi y Río Toltén .....	34
Figura 4-6:	Cuenca Río Queule.....	35
Figura 5-1:	Vista esquemática de los procesos que ocurren en un módulo de ZonaR ....	40
Figura 5-2:	Unidad de procesos hidrológicos .....	41
Figura 5-2:	Calibración estación Río Cautín en Almagro .....	42
Figura 5-15:	Validación del flujo total.....	43
Figura 5-5:	Validación del flujo base .....	44
Figura 6-1:	Unidades morfoestructurales de la zona de estudio .....	46
Figura 6-2:	Mapa geológico de la zona de estudio (elaboración propia).....	49
Figura 6-3:	Distribución de Pozos con estratigrafía en el área de estudio .....	51
Figura 7-1:	Mapas de profundidad y elevación de basamento .....	53
Figura 7-2:	Ubicación de estaciones TEM y perfiles representativos interpretados .....	55
Figura 7-3:	Distribución de Pozos Perforados en el área de estudio .....	56
Figura 7-4:	Ubicación de pozos con pruebas de bombeo efectuadas para este estudio ..	57
Figura 8-1:	Mapa y Perfiles Hidrogeológicos de la zona de estudio .....	61
Figura 8-2:	Distribución espacial de la permeabilidad en el área de estudio.....	62
Figura 8-3:	Superficie piezométrica para pozos Profundos .....	64

Figura 8-4: Superficie piezométrica para pozos Someros .....	65
Figura 8-5: Distribución temporal de las campañas de terreno (Se presenta la Conductividad eléctrica medida in situ en microsimens/cm) .....	66
Figura 8-6: Mapa con puntos de muestreo hidroquímico .....	69
Figura 8-7: Mapa con puntos de muestreo isotópico.....	70
Figura 8-8: Modelo hidrogeológico 3D de la zona de estudio .....	73
Figura 8-9: Distribución de unidades hidrogeológicas utilizadas en modelo numérico....	74
Figura 8-10: Red de monitoreo propuesta.....	77
Figura 9-1: Dominio del modelo numérico .....	79
Figura 9-2: Discretización espacial en planta – vista general .....	80
Figura 9-3: Distribución de permeabilidades calibradas en las 3 capas del modelo .....	82
Figura 9-4: Resumen de condiciones de borde empleadas en el modelo.....	85
Figura 9-5: Ubicación de pozos de extracción incluidos en el modelo.....	86
Figura 9-6: Pozos de observación utilizados en la calibración del modelo .....	89
Figura 9-7: Balance de masas calibración régimen permanente .....	90
Figura 9-8: Niveles observados vs simulados – calibración régimen permanente .....	92

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Síntesis de derechos de aguas subterráneas otorgados y en trámite .....	13
Tabla 3-2. Derechos otorgados de aguas subterráneas de acuerdo a uso .....	14
Tabla 3-3. Solicitudes en trámite de aguas subterráneas de acuerdo a uso .....	14
Tabla 3-4. Derechos de aguas subterráneas de acuerdo a uso informado en terreno ....	20
Tabla 3-5. Uso de agua de acuerdo a profundidad de la captación .....	20
Tabla 3-6. Síntesis de parámetros físico-químicos obtenidos en pozos catastrados.....	21
Tabla 3-7. Factores de uso determinados en base al catastro .....	27
Tabla 3-8. Caudal de uso de agua subterránea .....	27
Tabla 4-1: Hipsometría cuenca Río Imperial y cuenca Río Toltén.....	28
Tabla 4-2: Hipsometría cuencas costeras.....	28
Tabla 4-3: Características morfológicas Subcuencas de Río Imperial .....	31
Tabla 4-4: Características Subcuencas de Río Toltén .....	31
Tabla 5-2: Estimación de recarga en la cuenca del río Imperial dividido por subcuencas*	45
Tabla 5-3: Estimación de recarga en la cuenca del río Toltén dividido por subcuencas* ...	45
Tabla 5-4: Balance hídrico para las cuencas costeras de la región de la Araucanía* .....	45
Tabla 8-1: Propiedades Hidráulicas para pozos en la cuenca del río Imperial .....	60
Tabla 8-2: Propiedades Hidráulicas para pozos en la cuenca del río Toltén .....	60
Tabla 8-3: Cantidad y tipo de muestras tomadas en cada campaña .....	67
Tabla 9-1. Pozos de observación utilizados en la calibración .....	88
Tabla 9-2: Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente ....	91
Tabla 9-3: RMS normalizado por sectores - calibración en régimen permanente .....	91
Tabla 9-4. Caudales de extracción en los escenarios simulados .....	93

Tabla 9-5. Caudales óptimos de extracción .....	94
Tabla 9-6. Caudal adicional susceptible de ser otorgado .....	94

---

## 1 INTRODUCCIÓN

La región de La Araucanía posee una importante cantidad de recursos hídricos, superficiales y subterráneos. Por otra parte, el sostenido crecimiento poblacional y económico experimentado por el país, y en particular por la región, durante los últimos 20 años, ha originado un incremento en la demanda de dichos recursos hídricos cada vez mayor.

Regionalmente, las cuencas de los ríos Imperial y Toltén representan importantes fuentes de recursos, superficiales y subterráneos, cuyo aprovechamiento es, principalmente, superficial. Sus acuíferos asociados han sufrido un importante incremento en su explotación, respondiendo a la demanda del crecimiento demográfico y el desarrollo de actividades productivas (riego) y agua potable, especialmente en los meses de verano.

Lo anterior, sumado a los efectos del cambio climático y las sequías que han afectado en los últimos años al país y en particular a la región de la Araucanía, ponen de manifiesto la necesidad de disponer de un mayor conocimiento del funcionamiento de los principales sistemas hidrogeológicos, así como de herramientas para una adecuada gestión y administración de los recursos hídricos.

En este contexto, el Gobierno Regional de la Araucanía (GORE) apoyado por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (DGA), encargaron a Arcadis Chile (Arcadis) el estudio de los sistemas acuíferos que conforman los ríos Imperial, Toltén y las cuencas costeras de la Región de la Araucanía.

El área de estudio (Figura 1-1) comprende las cuencas hidrográficas de los ríos Toltén (8.446 Ha) e Imperial (12.652 Ha), las cuencas costeras río Budi (495 Ha), río Queule (698 Ha) y Costeras entre río Budi y río Toltén (162 Ha).

El estudio estuvo orientado a conocer y entender el funcionamiento de los sistemas acuíferos asociados a los ríos Imperial y Toltén, así como a distintas cuencas costeras en la región, junto con el desarrollo de modelos hidrogeológicos a nivel regional, que permitieron evaluar la respuesta del sistema para diferentes escenarios de explotación de los acuíferos y condiciones hidrológicas, en el corto y largo plazo.

El estudio contempló la identificación de los usos y usuarios de las aguas subterráneas en la región, mediante un catastro de más de 3.000 captaciones de aguas subterráneas en la región, el análisis de calidad química de las aguas subterráneas, realizándose un levantamiento de 512 muestras tanto en aguas superficiales como subterráneas, la estimación de recarga de aguas subterráneas, mediante la construcción de un modelo de aguas superficiales a escala regional, y el funcionamiento de aguas subterráneas, mediante el levantamiento de 481 estaciones geofísicas, 680 estaciones gravimétricas y la construcción de 4 sondajes (Freire, Padre Las Casas, Villarrica e Imperial, complementando un total de 400 m lineales de perforación).

Finalmente, se construyeron modelos numéricos para los acuíferos de los ríos Imperial y Toltén, en régimen estacionario, y modelos conceptuales para la cuenca del río Budi, río Queule y Costeras entre Río Budi y Toltén. Con este modelo se evaluó el comportamiento, en un plazo de 50 años, de los recursos hídricos considerando 5 escenarios de simulación, los que representan distintas condiciones, tanto de extracción de recursos, como de recargas hacia el sistema.



Asimismo, en marco del desarrollo del presente estudio se obtuvieron, los siguientes productos de interés:

- Levantamiento de información en terreno producto del catastro de más de 3.000 captaciones de aguas subterráneas en la región, determinándose los usos y usuarios principales del agua.
- Respecto a la conceptualización hidrogeológica, se obtuvo información geológica tanto de superficie como de subsuperficie que concluyó con el desarrollo de un Mapa Geológico a escala regional (1:250.000).

- Levantamiento de perfiles geofísicos (481 estaciones) y gravimétricos (680 estaciones) en toda la región, desde donde se obtuvo un mapa de profundidad del basamento en la región.
- Levantamiento y análisis de calidad química de las aguas superficiales y subterráneas en la región, mediante el muestreo de y análisis de parámetros establecidos en la NCh 409, Isotopos y Cloruros.
- Desarrollo de un modelo conceptual y numérico de aguas superficiales enfocados a la estimación de la recarga, mediante el establecimiento y cumplimiento de ecuaciones de continuidad en distintas zonas de riego que interactúan con los cauces superficiales y zonas subsuperficiales, en las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, implementado en plataforma ExtendSim;
- Perforación de sondajes PPA-01 (Padre Las Casas), PPA-02 (Freire), PPA-03 (Villarrica) y PPA-04 (Imperial), completando un total de 400 m lineales de perforación.
- Propuesta de una Red de Monitoreo de Aguas Superficiales y Subterráneas, que permita complementar la red existente enfocada a entender la interdependencia de los sistemas superficiales y subterránea en las distintas cuencas.
- Generación de un modelo hidrogeológico conceptual a escala regional en las cuencas de interés e implementado en software Leapfrog Hydro.
- Construcción de modelo hidrogeológico numérico de tres capas enfocado a modelar los dos acuíferos principales presentes en el sector, implementado en el software Groundwater Vistas.
- Generación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) con toda la información recopilada y analizada en el marco del presente estudio.

Respecto a la modelación numérica, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El caudal óptimo de extracción alcanza los 99.420 L/s (297,08 Mm<sup>3</sup>/año) para la cuenca del río Imperial y 3.481 L/s (109,78 Mm<sup>3</sup>/año) para la cuenca del río Toltén.
- Se estima que el caudal adicional que es posible de ser otorgado es de 1.570 L/s (49,51 Mm<sup>3</sup>/año) para la cuenca del río Imperial, y de 580,1 L/s (18,29 Mm<sup>3</sup>/año) para la cuenca del río Toltén.
- La magnitud del bombeo señalado anteriormente, implica la construcción de pozos más profundos, considerando que los pozos situados en la capa 1 presentan una mayor tendencia a secarse durante los 50 años de modelación.

En síntesis, se considera que los modelos generados constituyen importantes herramientas de gestión de los recursos hídricos, permitiendo las mismas la administración y planificación de los recursos hídricos subterráneos a una escala regional.

El estudio contempló las siguientes actividades principales, las que corresponden a los capítulos presentados en el cuerpo de este resumen:

- Recopilación y Revisión de Antecedentes.
- Catastro de Captaciones en Terreno y Sistematización Demandas y Usos.
- Caracterización Hidrológica.
- Modelación Hidrológica.

- Caracterización Geomorfológica y Geológica.
- Estudio Geofísico.
- Caracterización Hidroquímica de las Cuencas.
- Conceptualización Hidrogeológica.
- Modelo Numérico.
- Análisis Integral.

Se resumen a continuación las distintas actividades desarrolladas en el marco del presente estudio, junto a las conclusiones y recomendaciones obtenidas.

---

## 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Se revisaron distintos tipos de antecedentes, informes, estudios, tesis, expedientes, datos puntuales, etc., disponibles de distintas instituciones como la Dirección General de Aguas (DGA), la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), la Comisión Nacional de Riego (CNR), El Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), El Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), El Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), Universidades, el Instituto de Desarrollo Agropecuario, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Empresas de Servicios Sanitarios, hidroeléctricas, etc.

El trabajo de recopilación de antecedentes resultó en la compilación de 53 informes, los que se clasificaron en tres grupos: Estudios Principales, Estudios Secundarios y Otros.

Los Estudios Principales y Secundarios corresponden a una categorización según área cubierta y profundidad del estudio. Por otra parte, el grupo Otros, concentra antecedentes tales como información cartográfica, bases de datos, análisis químicos, estadísticas, entre otros.

La información se separó y sistematizó, en cuanto a su relevancia según las siguientes temáticas principales de interés para el estudio:

- **Meteorología e hidrología:** Se realizó una recopilación y análisis de la estadísticas hidrometeorológica pertenecientes a la red hidrométrica regional de la DGA y de la Dirección Meteorológica de Chile. Se recopiló información estadística de 47 estaciones pluviométricas y 40 estaciones fluviométricas, con extensiones de registros entre 10 y más de 50 años.

Se revisó numerosos estudios, destacando el estudio "Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuenca del Río Imperial, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, CONIC – BF (1998), que entrega una cuantificación de los recursos hídricos superficiales de la cuenca, junto a una caracterización de la calidad de aguas superficiales. Incluye la confección de dos modelos numéricos, uno enfocado a la simulación de operación y control de recursos hídricos y otro orientado a simular parámetros característicos de la calidad de aguas superficiales.

- **Calidad de Aguas:** Se realizó un levantamiento de estudios para recabar información con miras a caracterizar, hidroquímicamente, los recursos hídricos en el área de estudio. Entre los estudios y antecedentes revisados, cabe destacar:
  - Red de Calidad de Aguas DGA. Se recopiló registros de calidad desde el año 1969, en 31 estaciones. No existe información en cuencas costeras.
  - Catastro y Caracterización de Fuentes de Aguas Minerales y Termales de Chile (Hauser, A. 1997). Presenta información hidroquímica de fuentes termales y minerales de 23 sitios en las cuencas de los ríos Imperial y Toltén.
  - Catastro de Expedientes de Solicitudes de Derechos de Aguas Subterráneas de la DGA. Se recopiló información de análisis químicos de 27 pozos con derechos otorgados distribuidos de manera homogénea dentro del área de estudio.
  - Geología para el ordenamiento territorial: área de Temuco, Región de la Araucanía. Mapa 2: Recursos de Agua Subterránea (Sernageomin, 2007). Proporciona información de 91 análisis químicos: 64 pozos profundos, 21 norias y 6 vertientes. Se presenta información de parámetros in situ ( $\text{NH}_4^+$ ;  $\text{PO}_4^{-3}$ ;  $\text{T}^\circ$ , pH, etc.) y de laboratorio (Ca; Mg; Na; K; Li, etc.).

- **Geología de Superficie y Subsuperficie:** La geología superficial se obtuvo principalmente de cartas de Sernageomin, mientras que la geología de subsuperficie se obtuvo de información de pozos y geofísica.

Las principales fuentes de información estratigráfica de pozos se obtuvieron de piezómetros de la DGA, pozos profundos perforados por ENAP, pozos de agua potable rural (APR) y pozos de expedientes de solicitudes de derechos de aprovechamiento. Los piezómetros de la DGA entregan información más bien superficial (<30 m), mientras que los pozos ENAP entrega información profunda del sistema hidrogeológico (~1.200 m). Los pozos de expedientes de la DGA y APR proporcionan información variada, menor a 200 m de profundidad.

Los expedientes de pozos recopilados se seleccionaron considerando aquellos con un derecho de caudal otorgado mayor a 2 L/s, junto a su ubicación geográfica, de manera de disponer de información lo más homogéneamente distribuida en el área de estudio. De esta forma, se obtuvieron expedientes de 464 captaciones de aguas subterráneas con derechos concedidos (401 expedientes) y 46 con solicitudes en trámite (36 expedientes).

Se recopiló además información de estudios geofísicos de gravimetría y sísmica realizados por ENAP, para exploración de hidrocarburos. Estos antecedentes aportan valiosa información para caracterizar la geometría de la cuenca.

- **Derechos de Aprovechamiento de Aguas:** Se realizó una síntesis del estado actual de derechos de aprovechamiento de recursos hídricos y solicitudes en trámite en la Región, basado en la información actualizada a agosto de 2013 del Catastro Público de Aguas (CPA). El análisis incluyó la totalidad de los derechos de agua otorgados y las solicitudes de derechos de agua superficial y subterránea que se encuentran en estado pendiente, denegado y regularizaciones aprobadas.

Los derechos de aguas subterráneas otorgados en la Región corresponden 3.023 derechos, equivalentes a un caudal de 16.466 L/s. Un 61% en la cuenca del río Imperial y un 30% a la cuenca del río Toltén.

Finalmente, se recabó además información de solicitudes en trámite ingresadas a la DGA, tanto pendientes de resolver, como denegadas.

- **Hidrogeología:** No existen estudios específicos en la región, excepto en un área reducida que abarca la ciudad de Temuco (Sernageomin, 2007). Este estudio entrega información relevante para la definición de unidades hidrogeológicas locales que luego fue posible correlacionar y extrapolar a distintos ambientes de las cuencas estudiadas. Se analizó además el mapa hidrogeológico de Chile de la DGA, que entrega información muy referencial (escala 1.000.000).

En este contexto, la principal fuente de información hidrogeológica corresponde a aquella obtenida de los expedientes de solicitudes de derechos. Se obtuvo de estos expedientes información de la estratigrafía de los pozos, de niveles, de pruebas de bombeo, de caudales y calidad de las aguas, entre otros antecedentes.

En general, se considera que la información disponible se concentra en mayor proporción en la zona central de cuencas de los ríos Imperial y Toltén, habiendo un déficit de información en los bordes, especialmente hacia la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa. Lo anterior es esperable considerando que la

mayor concentración de captaciones subterráneas y, por ende de fuentes de información, se encuentran en esta zona (centro).

### 3 CATASTRO DE TERRENO Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN

Esta actividad consistió principalmente en la ejecución de importantes campañas de terreno para levantar información de usos y usuarios de captaciones de aguas subterráneas, junto a la revisión y recopilación de información de derechos superficiales y subterráneos del Catastro Público de Aguas, Juzgados de Letras y Conservador de Bienes Raíces.

La información de terreno y gabinete fue sistematizada, comparada y filtrada, con la finalidad de obtener un catastro único y actualizado de los derechos y usos de aguas subterráneas en el área de estudio. El catastro de terreno permitió además obtener información hidrogeológica de los pozos visitados y precisar la estimación de la demanda y consumo de aguas subterráneas.

#### 3.1 REVISIÓN INFORMACIÓN CATASTRO PÚBLICO DE AGUAS, CPA

Se recopiló información del Catastro Público de Aguas (CPA), el cual contiene información actualizada, de derechos constituidos y en trámite (aguas superficiales y subterráneas), a agosto del año 2013. En particular, el CPA presenta información relevante del tipo de derecho o solicitud (consuntivo, no consuntivo), su ejercicio (permanente o eventual), peticionario y ubicación, así como el uso de las mismas. Conforme a esta información se generó una base de datos de derechos de aguas, que sintetiza la información disponible. En la Tabla 3-1 se presenta el resumen de los derechos subterráneos otorgados y solicitudes en trámite en las cuencas en estudio, así como de los caudales asociados a dichos derechos otorgados/otorgados. Las tablas Tabla 3-2 y Tabla 3-3 presentan una síntesis de los usos de los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados y en trámite, clasificados de acuerdo a la información obtenida del CPA.

Tabla 3-1. Síntesis de derechos de aguas subterráneas otorgados y en trámite

Cuenca	Derechos Otorgados			Solicitudes en Trámite		
	Nº Derechos CPA	Q (L/s)	%*	Nº Derechos CPA	Q (L/s)	%*
Costeras	29	188	1,2			0,0
Río Budi	10	18	0,1	3	6	0,2
Río Imperial	1.727	10.072	66,1	345	1.500	60,6
Río Queule	3	18	0,1	1	0,5	0,0**
Río Toltén	828	4.948	32,5	210	970	39,2
Total	2.597	15.244	100	559	2.477	100

\*De acuerdo al caudal;

\*\* Solicitud en trámite: Porcentaje de caudal en río Queule=0,02%

Tabla 3-2. Derechos otorgados de aguas subterráneas de acuerdo a uso

Uso del agua	Cuencas											Total	
	Costeras Entre Río Budi y Río Toltén		Río Budi		Río Imperial		Río Queule		Río Toltén		Q (l/s)	N° Der.	
	Q (l/s)	N° Der.	Q (l/s)	N° Der.	Q (l/s)	N° Der.	Q (l/s)	N° Der.	Q (l/s)	N° Der.			
B/U D/S*					1.405	60	14	1	431	22	1.850	83	
E. H**					35	1					35	1	
Otros Usos					110	7					110	7	
Piscicultura									221	5	221	5	
Riego					414	44			190	17	604	61	
S/I***	188	29	18	10	8.109	1.615	4	2	4.106	784	12.425	2.440	
<b>Total</b>	<b>188</b>	<b>29</b>	<b>18</b>	<b>10</b>	<b>10.072</b>	<b>1.727</b>	<b>18</b>	<b>3</b>	<b>4.948</b>	<b>828</b>	<b>15.244</b>	<b>2.597</b>	

\*B/U D/S: Bebida/Usos Doméstico/Sanitario; \*\*E. H: Energía Hidroeléctrica; \*\*\* S/I Sin Información (CPA, 2013)

Tabla 3-3. Solicitudes en trámite de aguas subterráneas de acuerdo a uso

Uso del agua	Cuencas											Total	
	Costeras Entre Río Budi y Río Toltén		Río Budi		Río Imperial		Río Queule		Río Toltén		Q (l/s)	N° Der.	
	Q (l/s)	N° Der.	Q (l/s)	N° Der.	Q (l/s)	N° Der.	Q (l/s)	N° Der.	Q (l/s)	N° Der.			
B/U D/S*					49	7			63	4	111	11	
E. H**													
Otros Usos									57	3	57	3	
Piscicultura													
Riego					77	36			42	6	119	42	
S/I***			6	3	1.375	302	0,5	1	808	197	2.189	503	
<b>Total</b>					<b>1.500</b>	<b>345</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>970</b>	<b>210</b>	<b>2.477</b>	<b>559</b>	

\*B/U D/S: Bebida/Usos Doméstico/Sanitario; \*\*E. H: Energía Hidroeléctrica; \*\*\* S/I Sin Información (CPA, 2013).

De acuerdo a esta información, más del 80% de los derechos aprobados y solicitudes en trámite, no cuentan con información de uso, como se muestra en la Figura 3-1. En ella se observa también que el 12% de los derechos de agua aprobados son destinados a bebida y uso doméstico, mientras que el 4% es destinado a riego. En cuanto a las solicitudes en trámite, el 4% es destinado a bebida y el 5% a riego.

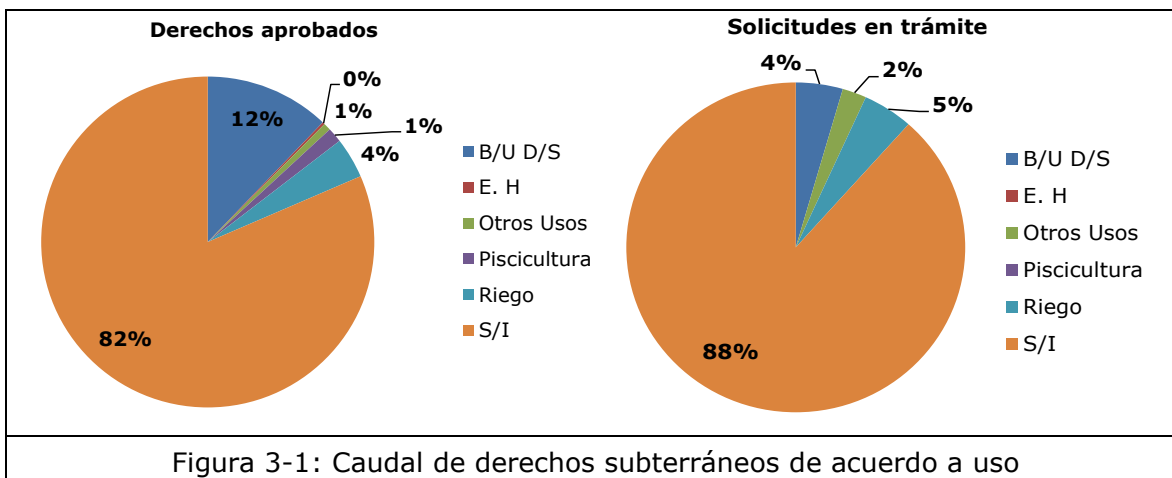


Figura 3-1: Caudal de derechos subterráneos de acuerdo a uso

### 3.2 CATASTRO DE CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Previo a la ejecución de la campaña de terreno, se confeccionó una base de datos para el catastro en terreno, considerando la información de derechos de aprovechamiento subterráneo y de solicitudes en trámite contenidos en el Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA actualizado a agosto de 2013.

Considerando las distintas bases de información disponibles (CPA; Sistemas de Agua Potable Rural (APR); Aguas Araucanía, etc), así como las características de las distintas zonas en las que se realizaría el catastro (seguridad, accesos, etc) se generó una base catastrable en gabinete de 3.153 captaciones de aguas subterráneas.

La Figura 3-2 muestra las captaciones visitadas en terreno. Como se observa, se consideró 125 captaciones fuera del área de estudio, ubicadas al norte y sur del área de estudio, en las cuencas de los ríos Bio Bio y Valdivia respectivamente. Estas captaciones fueron incluidas con el objetivo de disponer de información hidrogeológica para apoyar la definición de condiciones de borde de los modelos.

La campaña de terreno incluyó el levantamiento de la siguiente información:

- Características físicas de los pozos, tales como coordenadas de ubicación (UTM), profundidad, diámetro, entre otras.
- Características de usuarios y usos. Estos se clasificaron como agua para riego o consumo humano, animal, industrial o minería. Se obtuvo además información de horas de funcionamiento de las bombas y otra de interés. Para el caso de riego, se recabó información de la superficie regada, tipo de cultivo, método y horas de riego.
- Características hidrogeológicas. Se midió la profundidad del agua subterránea (nivel estático o dinámico, según corresponda).
- Características físico-químicas de las aguas, midiéndose en forma in-situ parámetros de pH y conductividad.

La campaña de terreno fue materializada, entre los meses marzo y agosto del año 2014, por 6 equipos independientes compuestos cada uno por dos técnicos cada uno. La metodología de trabajo consistió en la aplicación de una encuesta, toma de coordenadas mediante GPS, registro fotográfico, medición de niveles y parámetros in-situ.

Finalmente se catastró un total de 2.742 pozos los que, sumados a información obtenida de otros 54 pozos existentes en la región (no visitados), se dispuso de un catastro final de 2.796 fuentes subterráneas en la región.

De acuerdo a lo anterior, se catastro en terreno (2.742 pozos) un total de 86% del universo catastrable propuesto en gabinete, el que asciende a 88% si se consideran los pozos adicionales (54), no visitados pero sin con información levantada.

Las captaciones no catastradas tienen su explicación en cuanto a las dificultades para su acceso, ya sea por la no autorización del propietario, imposibilidad de ubicar la captación en terreno o que las mismas se encontraban secas o selladas.

De total de las captaciones catastradas (2.796), 1.956 corresponde a pozos o norias "someras" (< 20 m) y 495 corresponde a "pozos profundos" (> 20 m).

De los 136 APR revisados, se constató en terreno que en realidad 50 de ellos corresponden en la práctica a captaciones de fuentes superficiales.

En síntesis, el catastro de terreno abarco un universo total de 2.746 captaciones de aguas subterráneas.

La Figura 3-3 muestra el total de captaciones catastradas, mientras que la Figura 3-4 muestra la ubicación de las captaciones catastradas en terreno, agrupadas en captaciones someras y profundas.

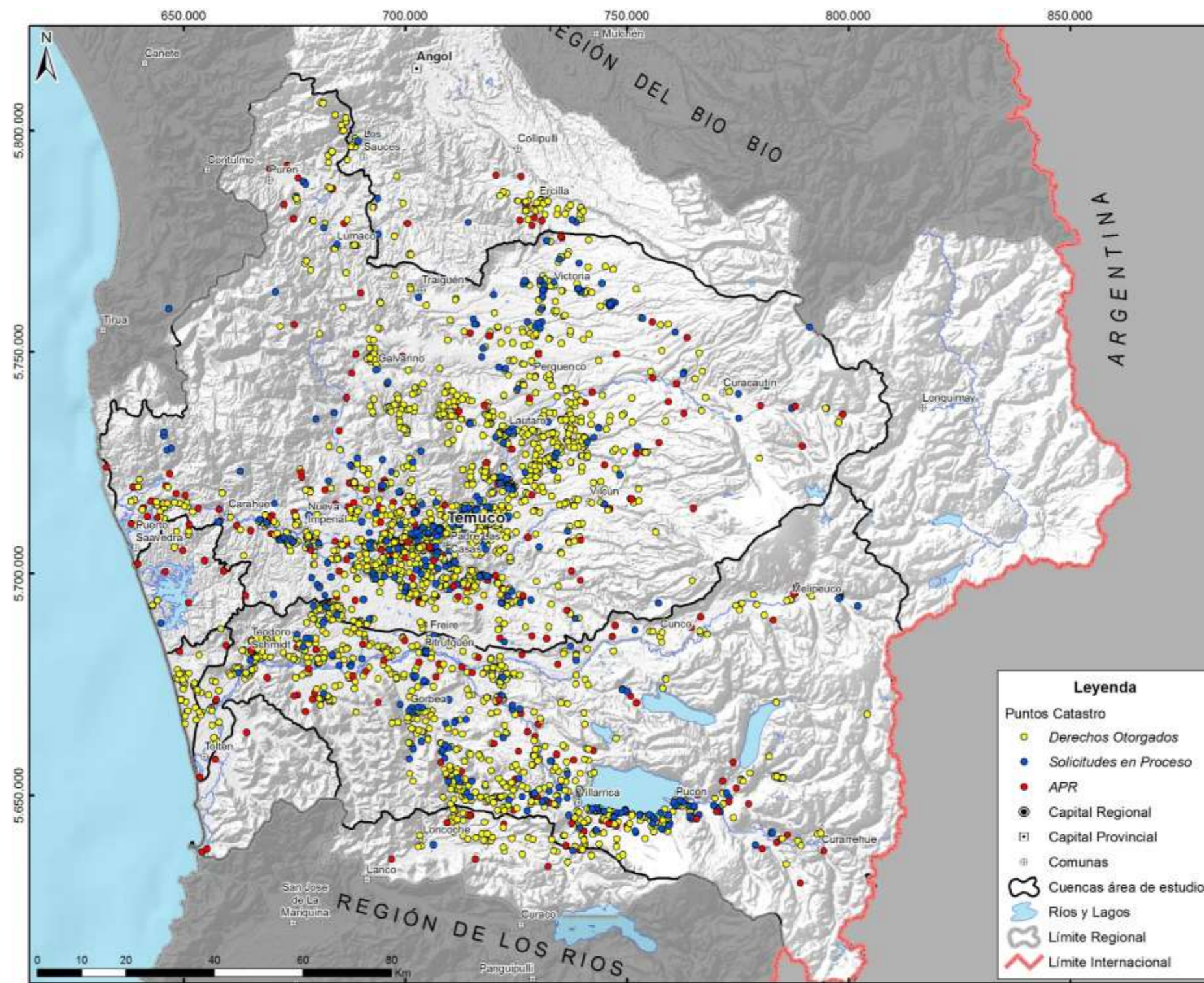


Figura 3-2: Distribución espacial de captaciones a visitar en catastro

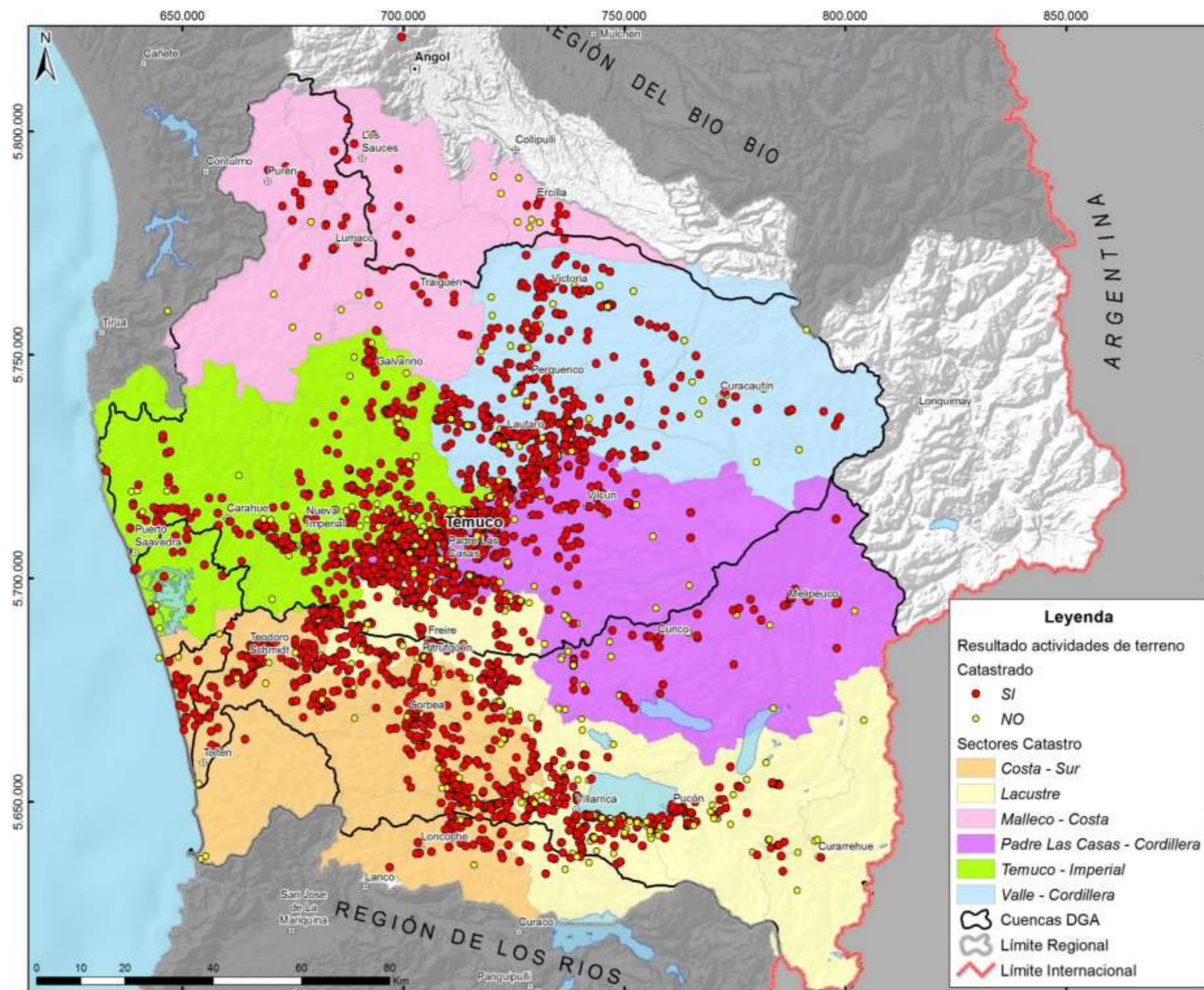


Figura 3-3: Ubicación de captaciones catastradas

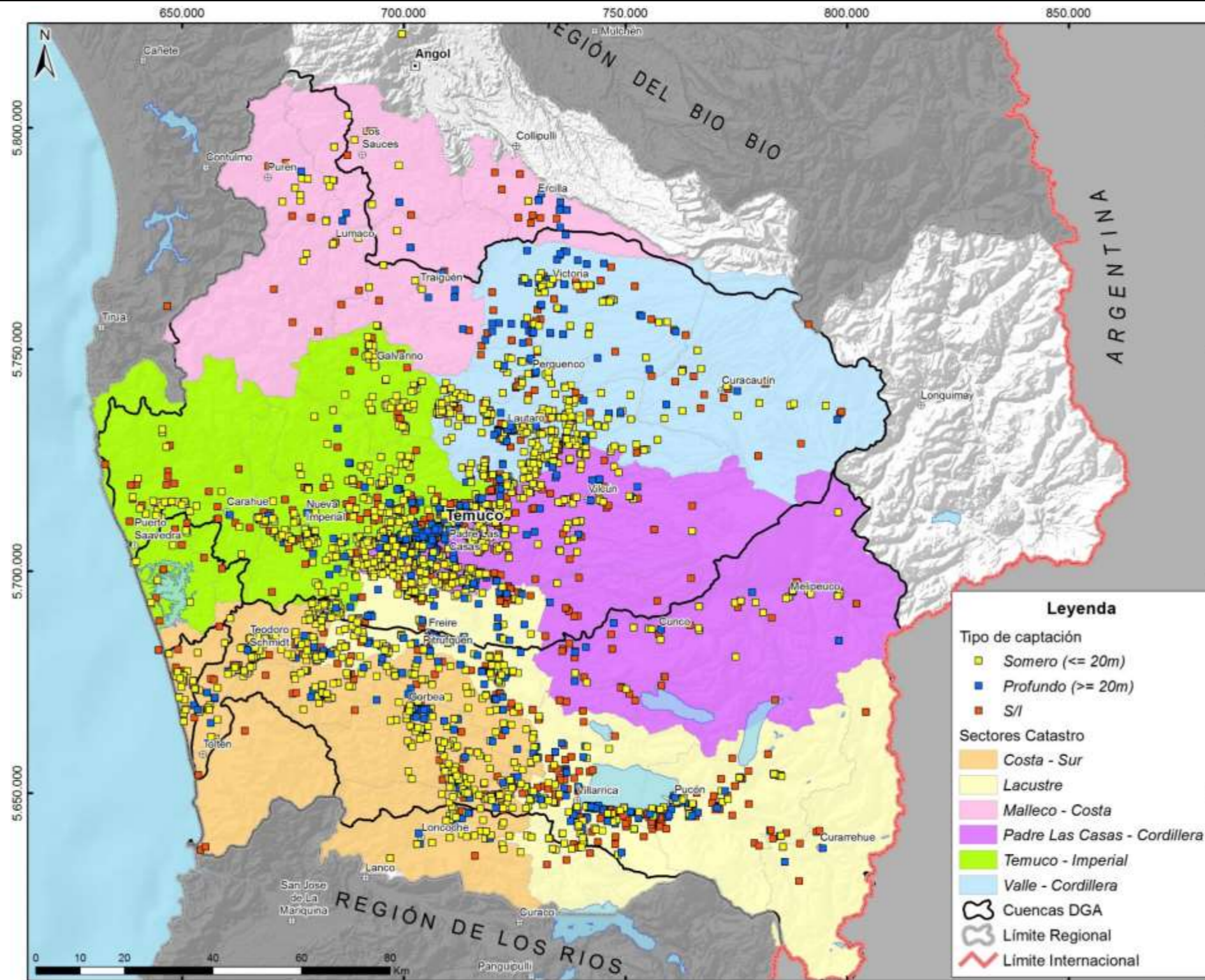


Figura 3-4: Ubicación de captaciones catastradas en terreno

### 3.3 SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**Información de usos de las aguas subterráneas:** De las 2.746 captaciones catastradas, se pudo obtener información respecto del uso del agua extraída en 2.693 captaciones (98%). Además, 107 captaciones no tienen información de caudal, de las cuales 43 corresponden a solicitudes en trámite, 35 a APR, y 29 a pozos nuevos encontrados en terreno (PZN).

La Tabla 3-4 muestra una síntesis de las captaciones de acuerdo al uso, siendo el Uso mayoritario el para Agua Potable con un 50% del caudal (7.520 L/s), seguido por Riego 30% (4.525 L/s) y uso Industrial con 8% (1.267 L/s). Por su parte, la Tabla 3-5 muestra información respecto del uso de agua, de acuerdo a profundidad de la captación.

Tabla 3-4. Derechos de aguas subterráneas de acuerdo a uso informado en terreno

Uso	Q(L/s)	% Q	N° Captaciones	% Captaciones
Agua Potable y Doméstico	6.816	45%	1.189	44%
Agua Potable/Riego	585	4%	206	8%
Agua Potable/Otro	119	1%	67	2%
Riego	4.525	30%	648	24%
Otros	318	2%	134	5%
Industrial	1.267	8%	68	3%
Sin uso	1.420	9%	381	14%
<b>Total</b>	<b>15.050</b>	<b>100%</b>	<b>2.693</b>	<b>100%</b>

El 14% de las captaciones no está en uso, ya sea porque el pozo está seco, en mal estado, abandonado o porque antiguamente era destinado a consumo doméstico y en la actualidad el usuario está conectado a la red de agua potable.

Se debe tener en consideración, como se observa en la Tabla 3-5, que hay 280 captaciones que no tienen información de profundidad, de las cuales el 56% está destinada a Agua Potable.

Tabla 3-5. Uso de agua de acuerdo a profundidad de la captación

Uso	Pozos Someros		Pozos Profundos		Sin Información de Profundidad	
	Q(L/s)	N° Captaciones	Q(L/s)	N° Captaciones	Q(L/s)	N° Captaciones
Agua Potable y Doméstico	1.536	815	3.356	240	1.924	134
Agua Potable/Riego	258	177	296	21	31	8
Agua Potable/Otro	92	59	26	6	2	2
Riego	1.069	493	3.097	111	359	44
Otros	198	118	98	6	22	10
Industrial	55	14	1.165	49	47	5
Sin uso	364	253	640	51	416	77
<b>Total</b>	<b>3.571</b>	<b>1.929</b>	<b>8.678</b>	<b>484</b>	<b>2.801</b>	<b>280</b>

La Figura 3-5 muestra la distribución del caudal extraído, tanto para los pozos someros como para los pozos profundos. Se observa que el 39% del caudal se destina a agua potable en captaciones profundas y un 36% a riego. Mientras que en los pozos someros, la distribución del caudal es de un 44% para agua potable y un 30% para riego.

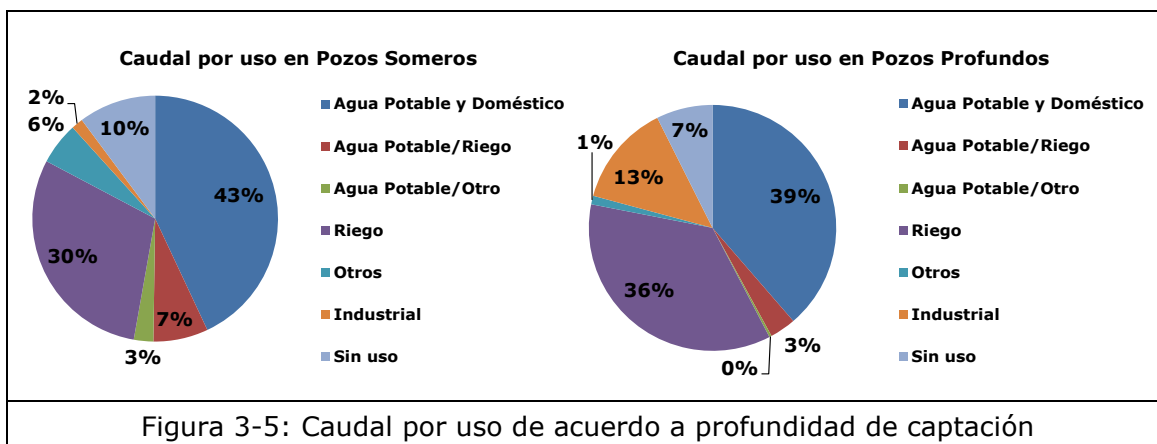


Figura 3-5: Caudal por uso de acuerdo a profundidad de captación

**Parámetros físico-químico:** Los parámetros físico-químicos catastrados en terreno corresponden a temperatura, pH y conductividad eléctrica. De las 2.746 captaciones catastradas, 2.283 contienen información de temperatura, 2.281 de pH y 2.268 de conductividad eléctrica. No fue posible obtener parámetros físico-químicos del 16% de las captaciones, ya sea porque el dueño se negó a ser catastrado, o porque el pozo se encontraba sellado o sin uso.

Considerando las muestras tomadas y obviando los valores descartados por presentar valores inconsistentes, la temperatura promedio es de 13,1 °C, el pH promedio es de 6,8 y la conductividad promedio de 0,13 us/cm (Tabla 3-6).

Tabla 3-6. Síntesis de parámetros físico-químicos obtenidos en pozos catastrados

Valor	Temperatura (° C)	pH	Cond. Eléctrica (us/cm)
Promedio	13,1	6,8	0,13
Mínimo	1,8	3,7	0,01
Máximo	50*	9,5	1,33
Desviación Estándar	2,8	0,7	0,10

\*corresponde a pozo de aguas termales en Termas del Manzanar (Curacautín)

**Información de profundidad del agua subterránea:** Del total de los pozos catastrados, se logró obtener información de profundidad del agua subterránea en 2.080 captaciones (76%). Entre las captaciones con información de nivel, 174 de las mediciones corresponden a Nivel Dinámico y 1.819 a Nivel Estático. Las captaciones que no cuentan con medición de nivel corresponden, principalmente, a las que se encontraban selladas o secas.

En la Figura 3-6 y la Figura 3-7 muestra en forma gráfica la información de profundidad de la napa medida en los pozos visitados.

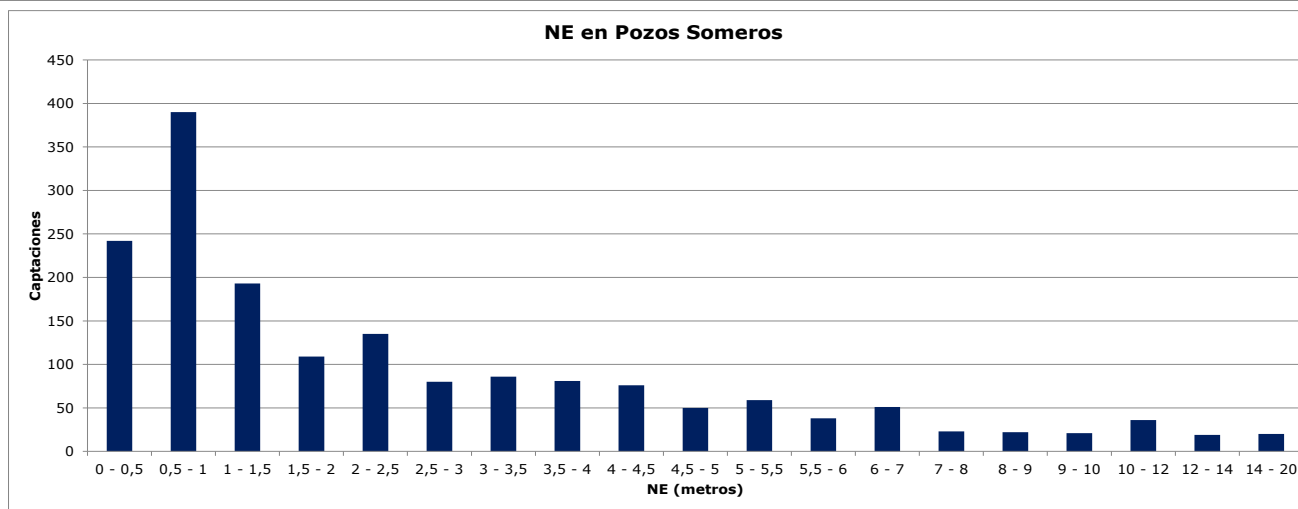
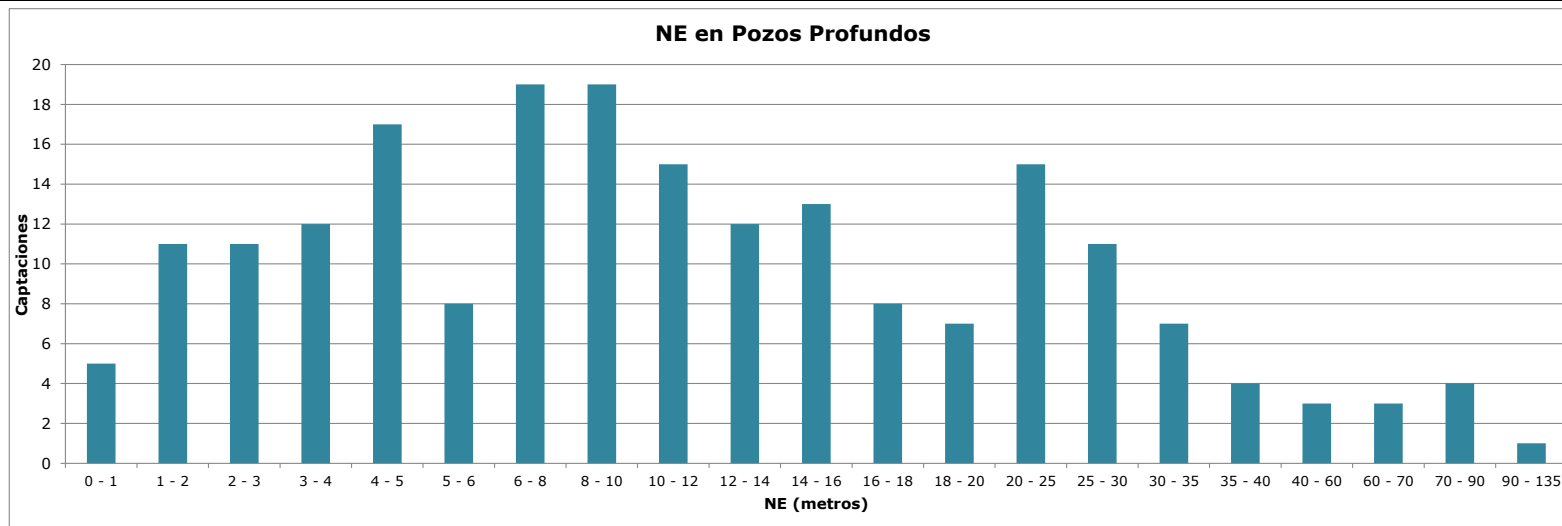
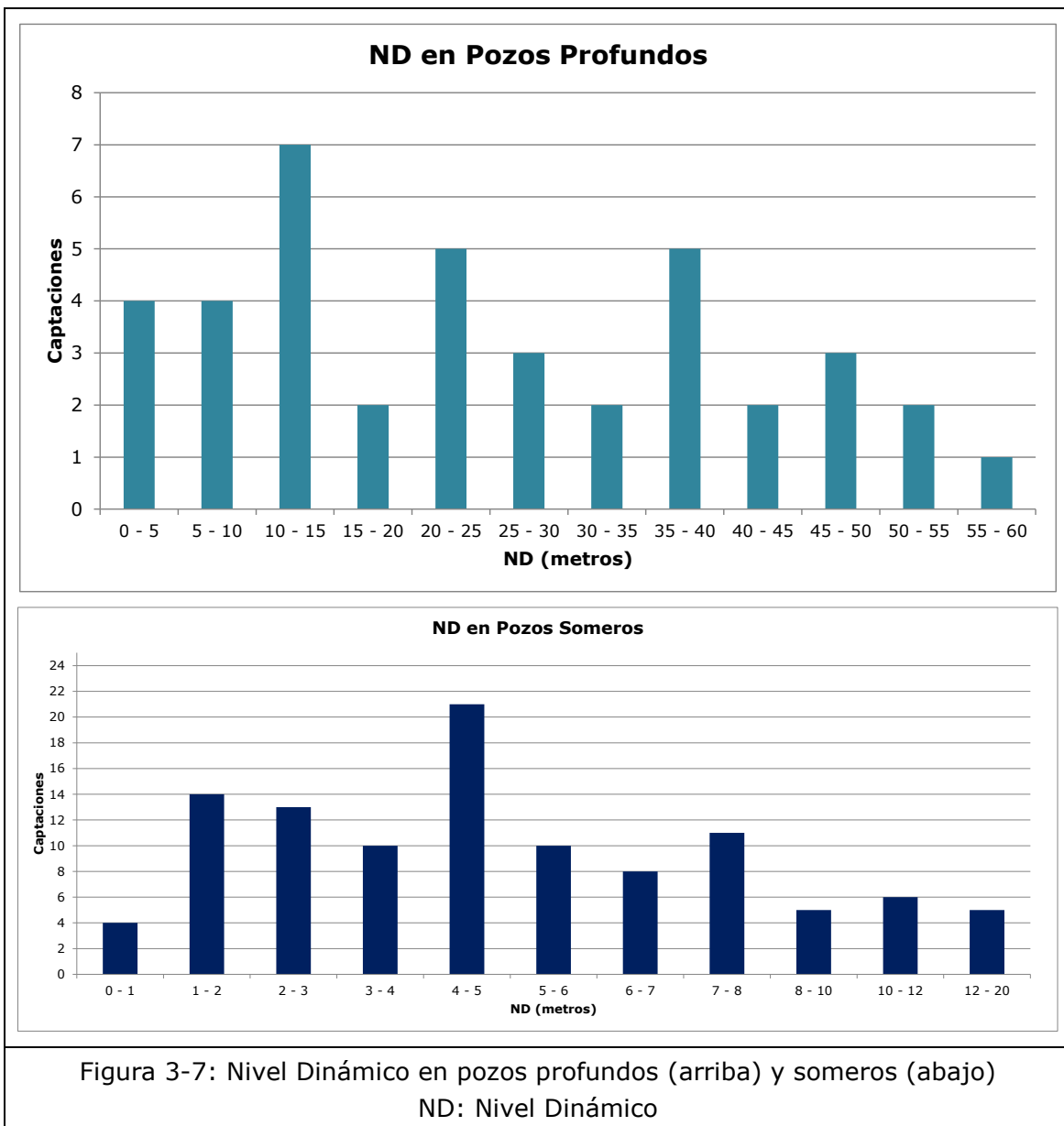


Figura 3-6: Nivel Estático en pozos profundos (arriba) y someros (abajo) (NE: Nivel Estático)



**Características de captaciones:** De las 2.414 captaciones con información de tipo de captación, el 52% corresponde a captaciones del tipo noria, el 29% a pozos y el 16% a pozo zanja. En cuanto a profundidad, el 66% corresponden a captaciones someras, (profundidad menor a 20 metros) y 34% a pozos profundos (profundidad mayor a 20 m). De los pozos profundos, el 14% son captaciones con profundidad mayor o igual a 100 metros, siendo el más profundo de 270 metros.

**Corrección de la base de datos del Catastro Público de Aguas usando información de terreno:** Usando la información de captaciones catastradas en terreno se complementó y corrigió la información proveniente del Catastro Público de Aguas de acuerdo a lo siguiente:

- De las 2.746 captaciones catastradas, 2.670 tienen expediente asociado. En la base de datos del CPA se tiene información de uso de sólo 214 derechos. Con la información del catastro se logra llegar a 2.619 derechos con información de uso.
- Hay 229 derechos que no están incluidos en el catastro por no poseer coordenadas o porque fueron eliminados para ser catastrados. De estos derechos, 212 no tienen información de uso, por lo que se procedió a asignar uso en base al nombre del petitionerario.
- Considerando el uso de terreno y la asignación de uso realizada en gabinete, se tiene información de uso del agua de 2.678 derechos, lo que representa el 85% del total de derechos contenidos en el CPA.
- Se recopiló información de profundidad de 2.391 captaciones con expediente asociado, información que no está disponible en la base del CPA.
- Se obtuvo las coordenadas de 16 captaciones que en la base del CPA no tienen información de coordenadas.

**Revisión de expedientes en Juzgado de Letras y Conservador de Bienes Raíces CBR y Revisión de Información Adicional:** Se revisaron los expedientes con situación informado "A" que se encontraban en la base de datos de solicitudes en trámite, que corresponden a 54 expedientes NR (regularización de derechos de aprovechamiento) y 4 expedientes ND (nuevos derechos de aprovechamiento).

Respecto a los 54 expedientes NR, se realizó una búsqueda a través de la página web del Poder Judicial y sus respectivos Juzgados de Letras, encontrándose 33 causas archivadas, 11 con sentencia ejecutoriada, de las cuales 1 es desfavorable (expediente NR-0901-324) y 3 en tramitación. En 3 expedientes no figuraba el ingreso en su respectivo juzgado y 4 no se encontraron debido a que los libros de la corte estaban extraviados.

Respecto a los expedientes ND, se revisó la resolución DGA de los cuatro expedientes en duda, que otorga el derecho de aprovechamiento subterráneo y se actualizó la base de datos con la información de caudal otorgado, N° de Resolución DGA y su fecha.

**Revisión de información adicional:** Cabe señalar que del total de derechos aprobados de la base de la DGA, 74 no poseen información de coordenadas, por lo que no están incluidos en el catastro de terreno. Estos derechos equivalen a un caudal otorgado de 2.355 L/s, de los cuales un 92% está destinado a bebida y uso doméstico, de este porcentaje el 99% corresponde a derechos de Aguas Araucanía. Para poder incluirlo en la base de datos se solicitó la información de las captaciones y su producción (coordenadas en UTM, cota, profundidad de la captación, niveles estáticos y dinámicos, caudales explotados y producción mensual de cada pozo) a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).

La SISS entregó información de sus captaciones que permitió determinar la demanda de uso por agua potable. En este mismo sentido, se pudo cruzar sólo información de algunas captaciones debido a que la SISS sólo envió número de captación interno y no está relacionado en ningún caso con el número de expediente de la DGA.

Por otro lado, se revisó los expedientes digitalizados que están disponibles en la página de la DGA. De los 74 revisados, 29 fueron encontrados digitalmente y 45 no contaban con información. De los 29 encontrados, se pudo actualizar la coordenada de 12 captaciones y la profundidad de 24 captaciones. Esta información fue actualizada en la base de datos final que se obtiene como resultado del catastro de captaciones con información de gabinete y terreno.

### 3.4 DETERMINACIÓN DE DEMANDAS Y CONSUMOS

Se realizó un análisis de la evolución temporal de los derechos de aguas, determinándose la demanda de aguas subterráneas en función de datos levantados de terreno y la evolución temporal de la demanda por cuenca.

**Evolución temporal de Derechos de Agua:** Se analizó la evolución de los derechos de agua subterráneos otorgados y en trámite, entre los años 1977 y 2013. La Figura 3-8 y la Figura 3-9 muestran los resultados obtenidos.

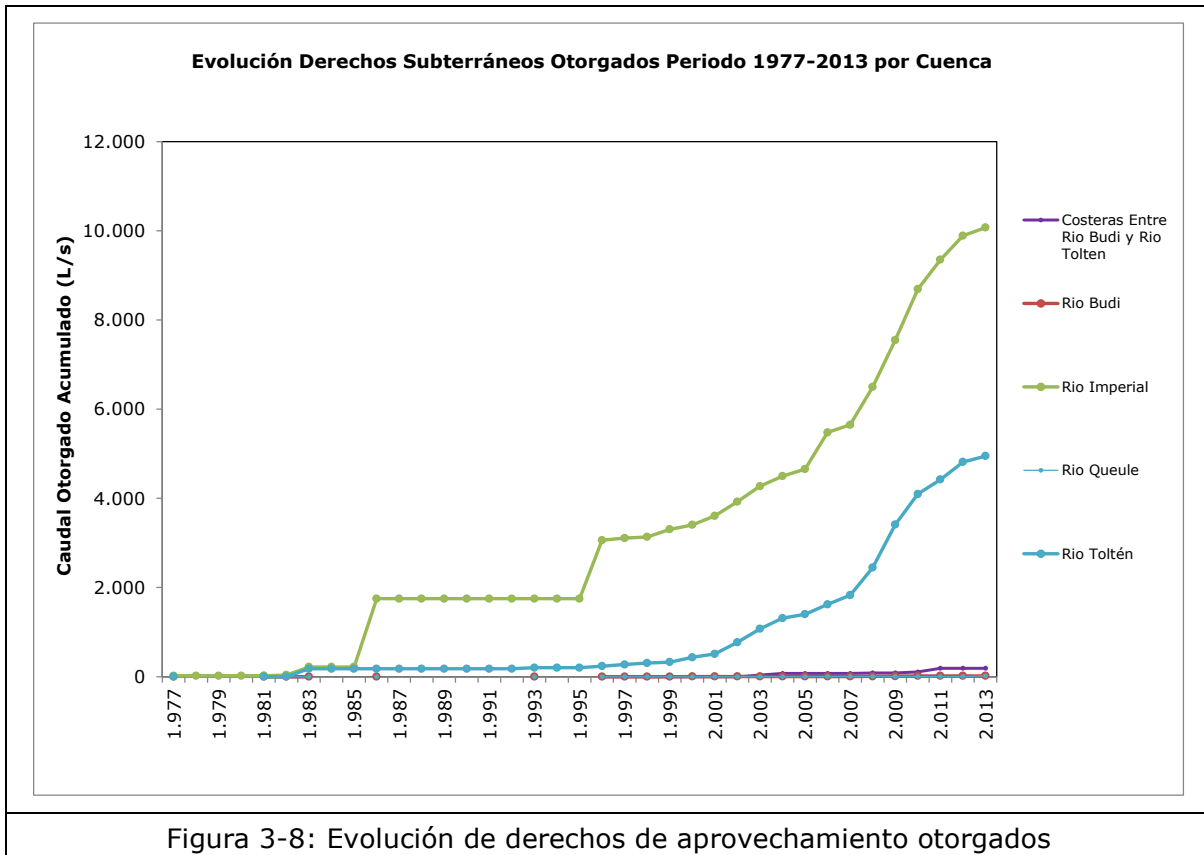


Figura 3-8: Evolución de derechos de aprovechamiento otorgados

Se observa que, de todas las cuencas que componen el área de estudio, las cuencas de los ríos Imperial y Toltén son las que presentan un mayor aumento en cuanto a los derechos de aguas subterráneas otorgados (Figura 3-8).

Por otra parte, las cuencas costeras entre el río Budi y Toltén, cuenca del río Budi y cuenca del río Queule han experimentado un aumento menor, en comparación a las cuencas mayores, en cuanto a su caudal otorgado, manteniendo este en torno a los 500 L/s.

En este sentido, en términos generales se concluye que hasta el año 1995, el total de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados en el región alcanzaban un caudal relativamente bajo (2.000 L/s aproximadamente), sufriendo un considerable aumento hasta alcanzar los 15.245 L/s al año 2013.

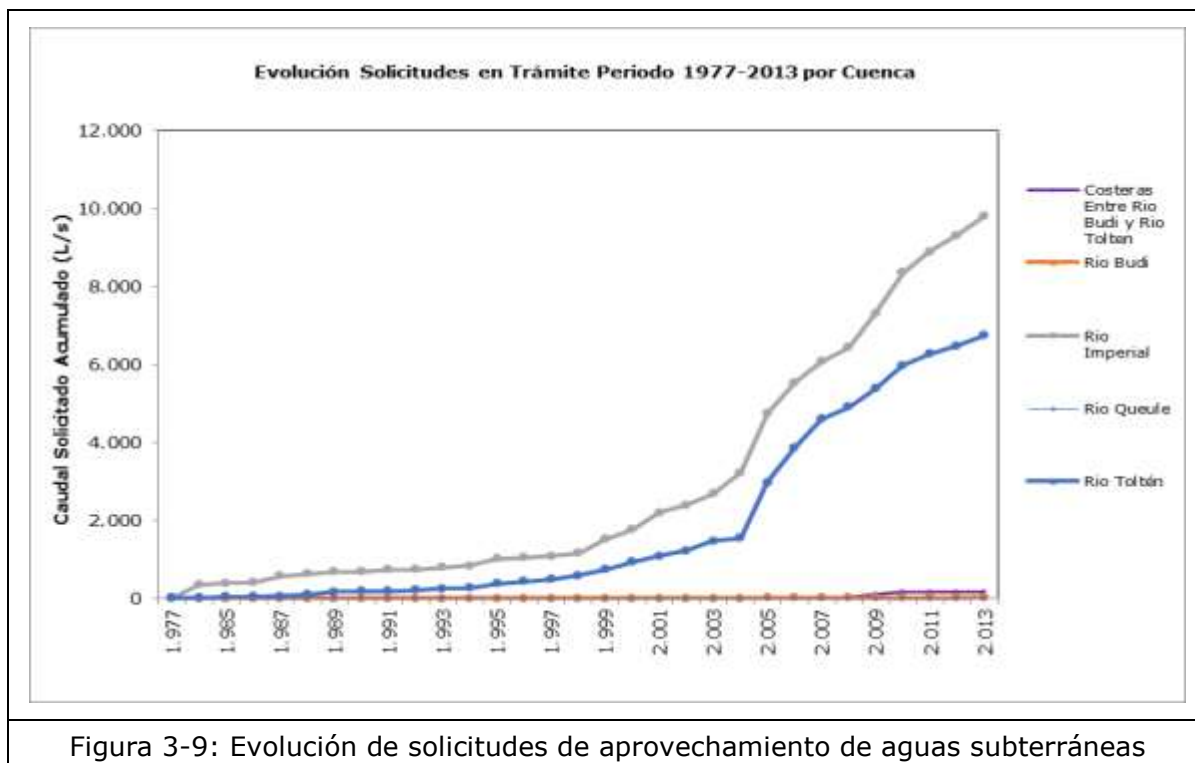


Figura 3-9: Evolución de solicitudes de aprovechamiento de aguas subterráneas

Respecto a las solicitudes en trámite en el periodo 1977 a 2004, se observa un incremento relativamente estable de los derechos solicitados. A partir del año 2005 el total de derechos solicitados aumenta considerablemente hasta 16.735 L/s el año 2013.

Del total de solicitudes en trámite entre los años 1977 y 2013 (16.735 L/s), se han otorgado en el mismo período 15.245 L/s, quedando por consiguiente un caudal de 1.490 L/s en solicitudes por aprobar o rechazadas por distintos motivos.

**Determinación de demanda:** La determinación de la demanda y consumos actuales del agua se efectúa a través de la estimación de un Factor de Uso. Este fue determinado en base a la información sobre caudal y horas de extracción entregada por el entrevistado para cada uso. De las 2.362 captaciones con información de uso actual, 1.142 cuentan con información de caudal y horas de extracción.

La Tabla 3-7 muestran los factores calculados. El valor de factor de uso varía entre 0,7 y 0,2, donde el mayor valor corresponde a agua potable y doméstico, y el menor valor corresponde a riego. Por otra parte, el uso industrial y otros presentan valores de 0,4 y 0,5 respectivamente.

Finalmente, se estimó el caudal de uso efectivo de aguas subterráneas en la región, aplicando el Factor de Uso sobre el caudal de derecho (Tabla 3-8). Los máximos valores de caudal de uso de aguas subterráneas corresponden a agua potable y doméstico, con un total de 4.882 L/s.

El segundo uso en importancia corresponde a riego, alcanzando 905 L/s. Considerando además las captaciones que tienen más de un uso, se tiene finalmente que 5.340 L/s se destinan a Agua Potable, y 1.036 L/s a riego.

Tabla 3-7. Factores de uso determinados en base al catastro

<b>Uso</b>	<b>Factor de Uso</b>
Agua Potable y Doméstico	0,7
Riego	0,2
Industrial	0,4
Otro	0,5

Tabla 3-8. Caudal de uso de agua subterránea

<b>Uso</b>	<b>Pozos Someros</b>		<b>Pozos Profundos</b>		<b>Sin Información de Profundidad</b>		<b>Total</b>	
	<b>Q de derecho (L/s)</b>	<b>Q de uso (L/s)</b>	<b>Q de derecho (L/s)</b>	<b>Q de uso (L/s)</b>	<b>Q de derecho (L/s)</b>	<b>Q de uso (L/s)</b>	<b>Q de derecho (L/s)</b>	<b>Q de uso (L/s)</b>
Agua Potable y Doméstico	1.536	1.075	3.356	2.349	1.924	1.347	6.816	4.771
Agua Potable/Riego	258	232	296	267	31	28	585	527
Agua Potable/Otro	92	92	26	26	2	2	119	120
Riego	1.069	214	3.097	619	359	72	4.525	905
Otros	198	99	98	49	22	11	318	159
Industrial	55	22	1.165	466	47	19	1.267	507
<b>Total</b>	<b>3.207</b>	<b>1.734</b>	<b>8.038</b>	<b>3.776</b>	<b>2.384</b>	<b>1.478</b>	<b>13.630</b>	<b>6.988</b>

## 4 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

### 4.1 SISTEMAS DE DRENAJE

La zona de estudio está definida en base a las cuencas delimitadas por la DGA: cuenca del río Imperial, cuenca del río Toltén y las cuencas costeras Lago Budi, Río Queule y costera entre río Budi y río Toltén.

Para caracterizar el sistema de drenaje se delimitaron las cuencas hidrográficas en base a un modelo de elevación digital de terreno (DEM SRTM, <http://srtm.csi.cgiar.org/>), con celdas de tamaño 90 x 90 metros. Esta información fue validada con el trazado oficial de las cuencas provisto por la DGA.

De acuerdo a la configuración hidrográfica, las cuencas del río Toltén y del río Imperial están subdivididas en subcuencas. Estas se presentan en la Figura 4-1, con su respectivo código DGA. Se muestra además la ubicación del centro de gravedad de cada una.

Las características morfológicas de las cuencas y sus respectivas hipsometrías se presentan en la Tabla 4-1 y Tabla 4-2.

Tabla 4-1: Hipsometría cuenca Río Imperial y cuenca Río Toltén

<b>Área (km<sup>2</sup>) en bandas de elevación (msnm)</b>	<b>Río Imperial (Código DGA 091)</b>	<b>Río Toltén (Código DGA 094)</b>
Área Total (km <sup>2</sup> )	12.652,9	8.446,5
Altura media (msnm)	423,6	659,4
Altura media centroide (msnm)	223	628
Pendiente media (%)	12,3	20,8
Perímetro (km)	695,9	622,9
Longitud Cauce Principal (km)	209	196

Tabla 4-2: Hipsometría cuencas costeras

<b>Área (km<sup>2</sup>) en bandas de elevación (msnm)</b>	<b>Río Queule (Código DGA 095)</b>	<b>Río Budi (Código DGA 092)</b>	<b>Costeras entre Río Budi y Río Toltén (Código DGA 093)</b>
Área Total (km <sup>2</sup> )	698,0	495,9	162,6
Altura media (msnm)	184,2	72,6	48,3
Altura media centroide (msnm)	171	43	34
Pendiente media (%)	18,0	9,4	5,3
Perímetro (km)	135,9	117,1	92,0
Longitud Cauce Principal (km)	70,0	7,0	9,0

A continuación se describe el sistema de drenaje para cada cuenca y sus respectivas subcuencas.

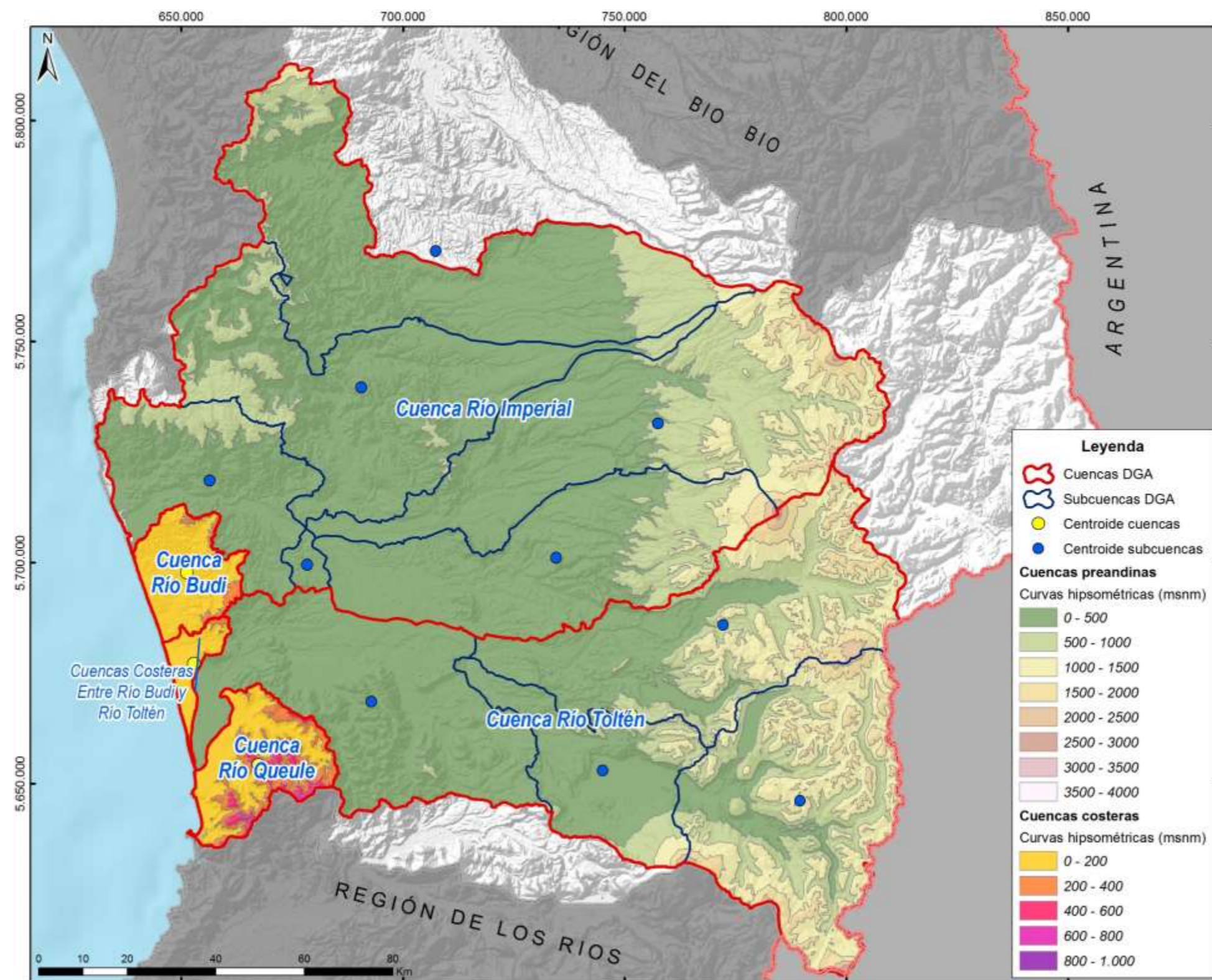


Figura 4-1: Curvas hipsométrica cuencas de estudio

**Cuenca del río Imperial:** La cuenca del río Imperial abarca una superficie de 12.652,9 km<sup>2</sup> y se desarrolla al occidente de la cuenca alta del río Biobío. Es una cuenca de tipo preandina, ya que el drenaje no nace en el cordón divisorio andino.

Los principales cauces presentes en esta cuenca son los ríos Cautín, Quepe, Cholchol, Lumaco e Imperial, conformando 6 subcuencas (Figura 4-2 y Tabla 4-3).

El río Imperial se forma por la unión de los ríos Cholchol que proviene del norte y Cautín que llega del oriente. Su curso es aproximadamente de 55 km y desemboca cerca de Puerto Saavedra.

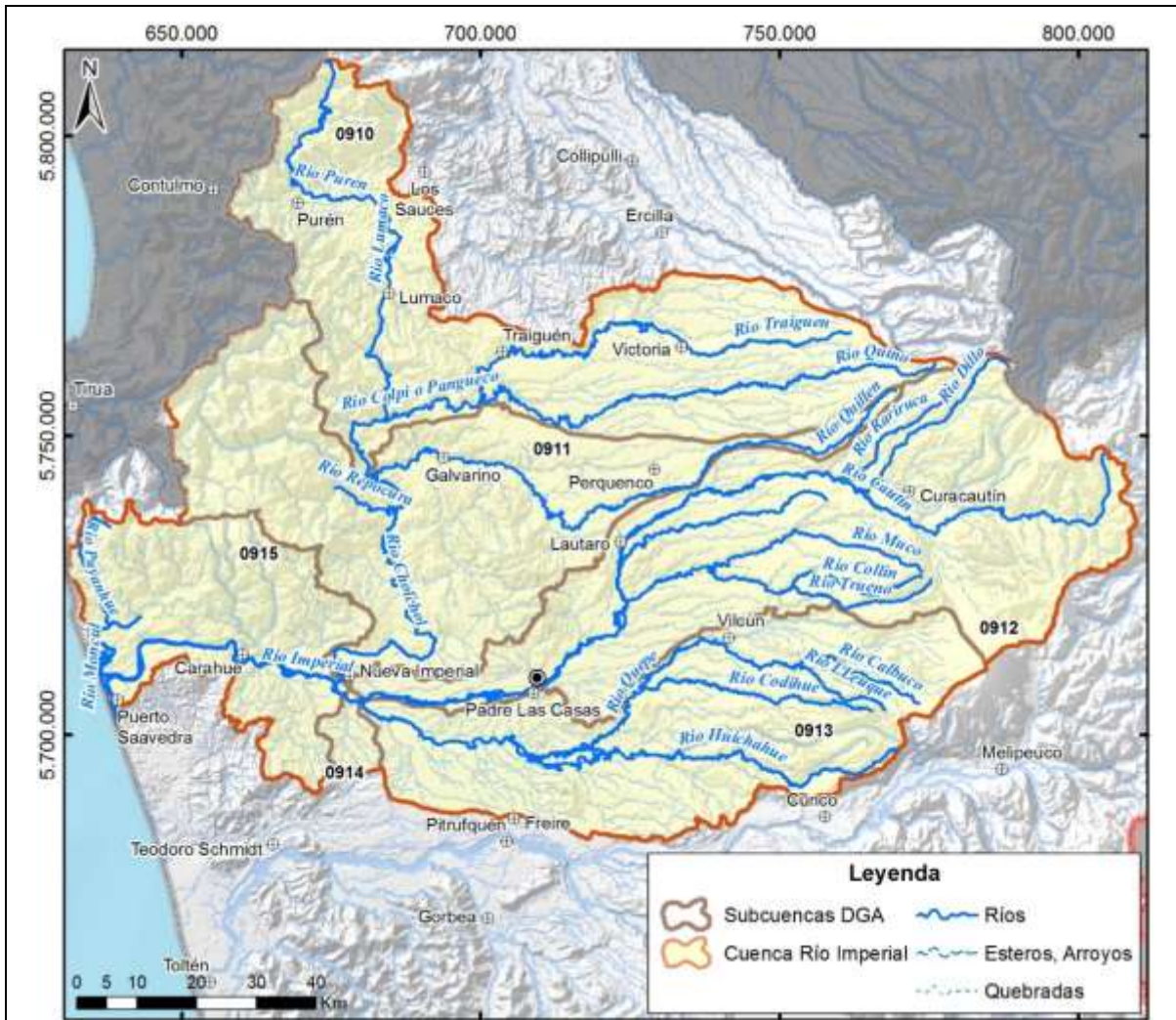


Figura 4-2: Cuenca del río Imperial y subcuencas

Tabla 4-3: Características morfológicas Subcuencas de Río Imperial

<b>Información</b>	<b>Río Lumaco</b>	<b>Río Cholchol</b>	<b>Cautín Alto (hasta antes junta río Quepe)</b>	<b>Río Quepe</b>	<b>Río Cautín entre río Quepe y río Cholchol</b>	<b>Río Imperial</b>
Código DGA	0910	0911	0912	0913	0914	0915
Área (km <sup>2</sup> )	2.984,6	2.703,1	3.223,2	2.302,0	91,5	1.348,5
Altura media (msnm)	368,7	282,9	697,1	404,5	74,3	231,8
Altura media centroide (msnm)	253	233	524	298	76	123
Pendiente (%)	10,9	12,4	15	10,3	5,1	12,4
Perímetro (km)	406,9	413,8	378,9	281,4	46,0	242,6
Longitud cauce principal (km)	111,0	157,0	160,0	93,0	13,0	50,0
Estaciones Fluviométricas*	7	4	5	3	1	0

\*Número de estaciones fluviométricas con más de 130 datos (equivalente a 10 años de registro)

**Cuenca del río Toltén:** La cuenca del río Toltén presenta una superficie total de 8.446,5 km<sup>2</sup>. En la parte alta de esta cuenca hay numerosos lagos, que en general son de origen glacial. En el margen occidental del lago Villarrica nace el río Toltén, el cual, aguas abajo, recibe el aporte del río Allipén. La longitud del río Toltén, aproximadamente, es de 123 km, desembocando en el mar, al norte de la punta Nilhue.

La Tabla 4-4 presenta la información de las 4 sub cuencas que conforman al río Toltén, mientras que en la Figura 4-3 se presenta la cuenca del río Toltén y sus subcuencas.

Tabla 4-4: Características Subcuencas de Río Toltén

<b>Información</b>	<b>Río Allipén</b>	<b>Río Pucón</b>	<b>Lago Villarrica y Toltén Alta</b>	<b>Toltén Bajo</b>
Código DGA	0940	0941	0942	0943
Área (km <sup>2</sup> )	2.585,3	2.383,8	1.134,5	2.342,8
Altura media (msnm)	847,7	1.063,3	433,9	149,3
Altura media centroide (msnm)	870	1.228	215	175
Pendiente (%)	24,5	32,9	11,4	8,9
Perímetro (km)	320,6	244,6	208,8	313,6
Longitud cauce principal (km)	108,0	88,0	70,0	84,0
Estaciones Fluviométricas*	3	3	2	4

\*Número de estaciones fluviométricas con más de 130 datos (equivalente a 10 años de registro)

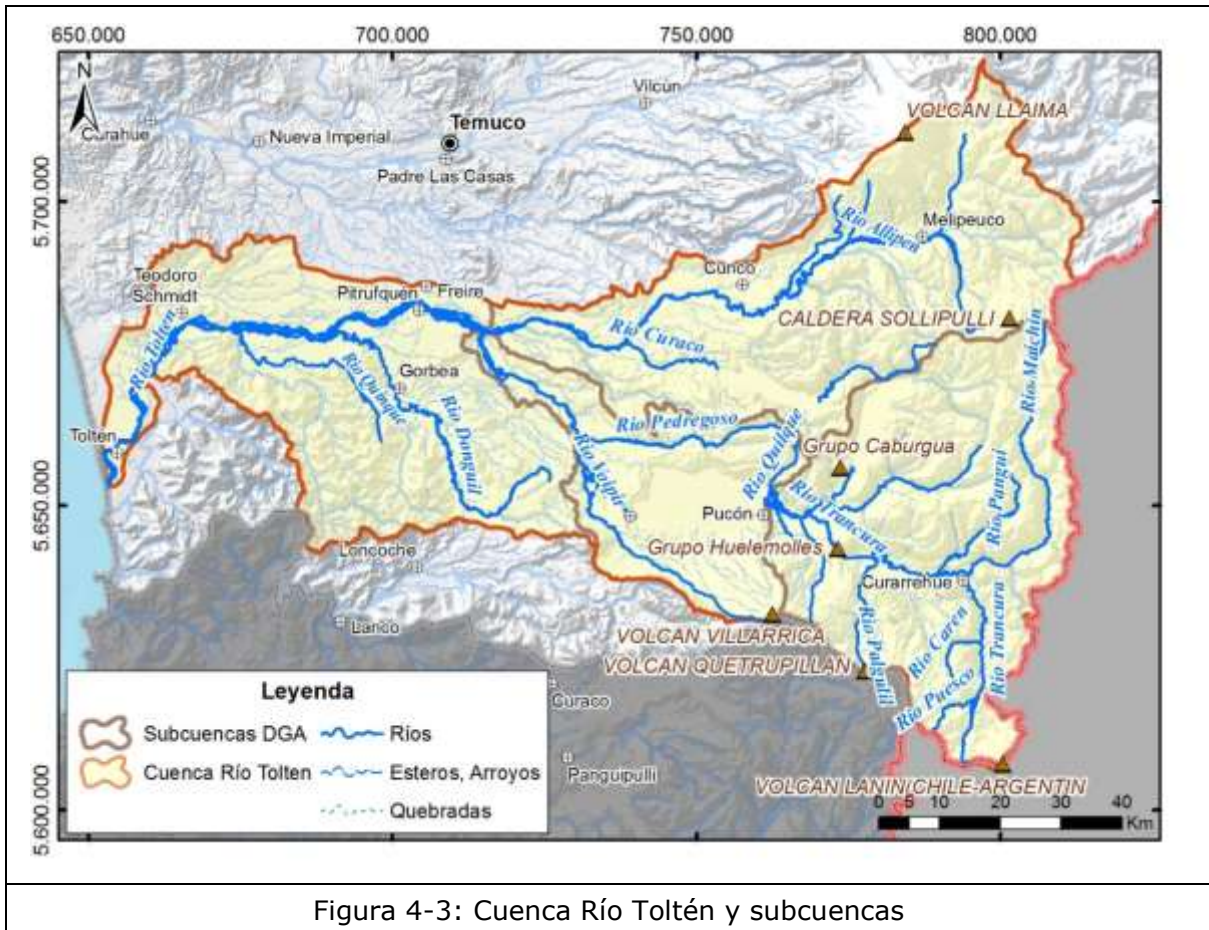


Figura 4-3: Cuenca Río Toltén y subcuencas

**Cuenca del río Budi:** La cuenca del río Budi (Figura 4-4) es una cuenca de tipo costera, exorreica. Se desarrolla al sur de la subcuenca Río Imperial. Su superficie asciende a 494,9 km<sup>2</sup>, de la cual el 13% lo ocupa el lago Budi (64 km<sup>2</sup>).

En el extremo norponiente del lago se genera el río Budi, de 7 km de longitud, el cual desemboca en el mar a menos de 1 km al sur de la desembocadura del río Imperial. A través del río, el lago periódicamente presenta interacción con el océano Pacífico. Sin embargo, gran parte del año esta desconectado por una barrera de sedimentos que separa el río del mar, la cual se ve sobrepasada por las crecidas de invierno.

El lago Budi, de aguas salobres, corresponde a una depresión litoral generada por hundimiento tectónico. Se localiza entre 5 y 8,5 msnm y es el nivel de base para las aguas superficiales y subterráneas que provienen de la Cordillera de la Costa. Por todo el contorno oriental, norte y sur el lago es alimentado por diversos esteros. Esta cuenca no cuenta con control fluviométrico.

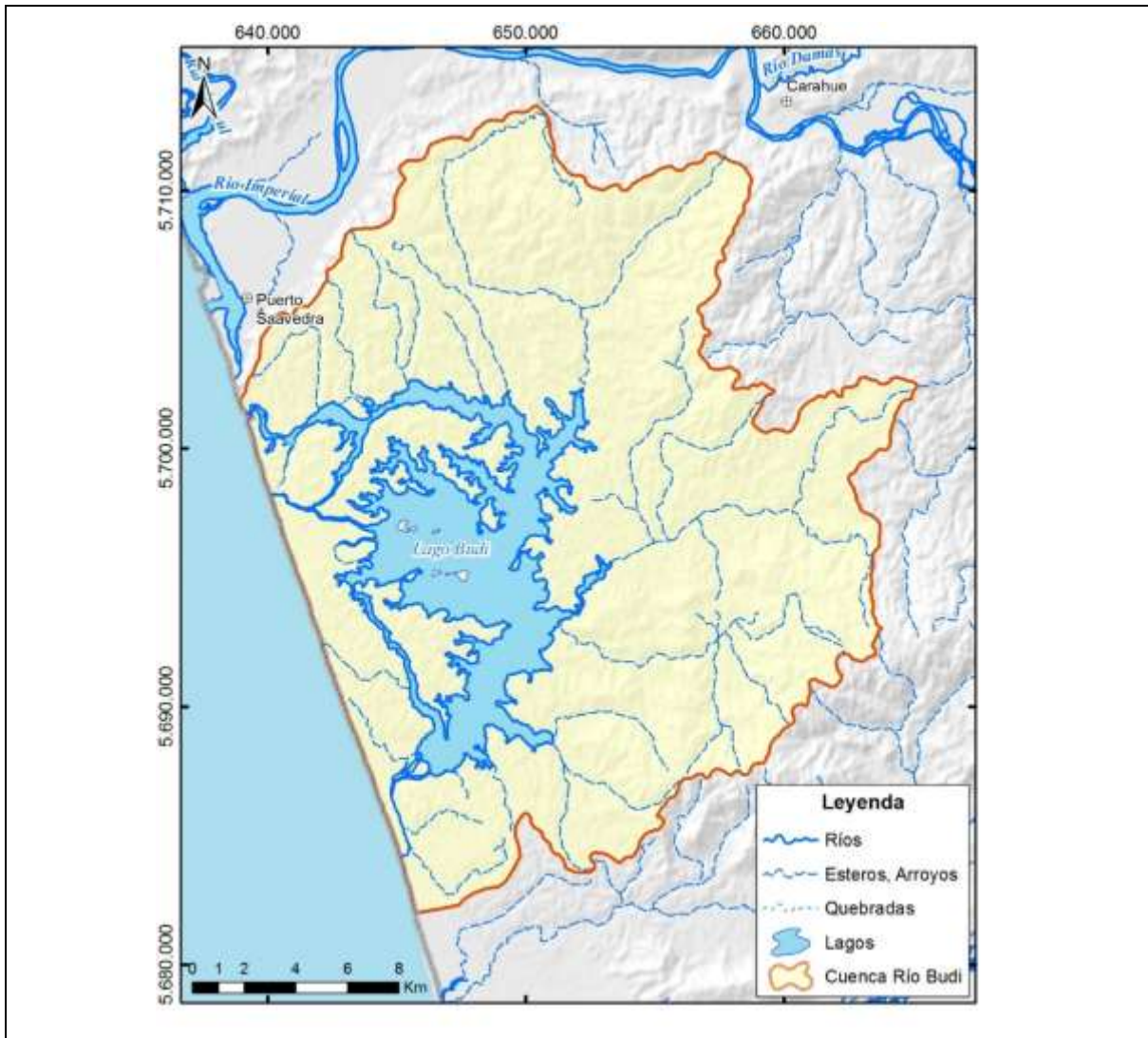


Figura 4-4: Cuenca Río Budi

**Cuenca Costera entre río Budi y río Toltén:** Esta cuenca presenta un área de 161,4 km<sup>2</sup> y corresponde a una cuenca de tipo costera, exorreica (Figura 4-5). Se conforma por el drenaje naciente de la Cordillera de la Costa, donde destaca, por el norte, el estero Chelle y por el sur, los esteros Puyehue y Pidinco, los cuales después de su confluencia alimentan a la laguna Puyehue y finalmente desagua al mar. No hay estaciones fluviométricas en esta cuenca.

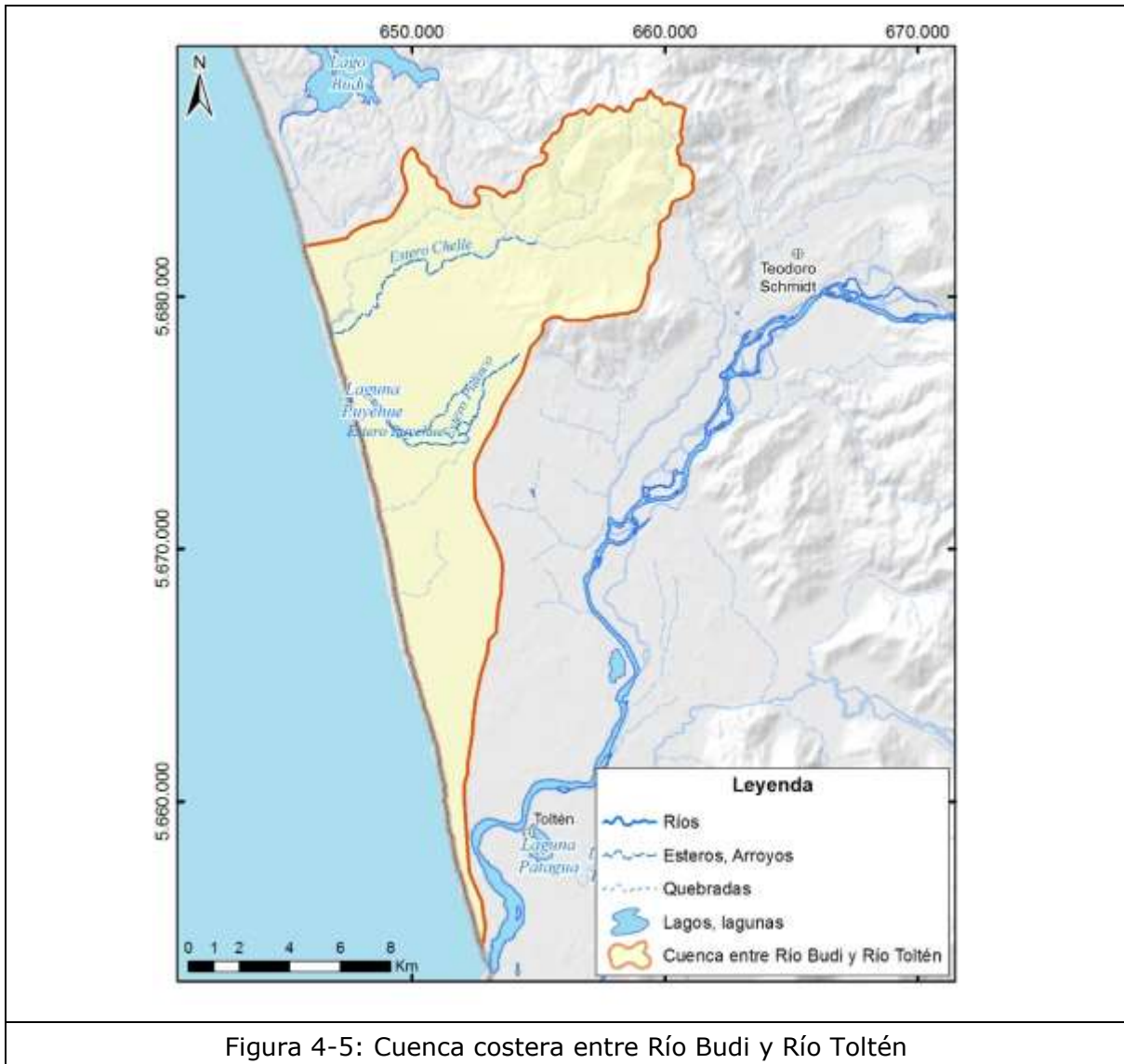


Figura 4-5: Cuenca costera entre Río Budi y Río Toltén

**Cuenca río Queule:** Esta cuenca se desarrolla al sur del curso inferior del río Toltén. Presenta un área de 693,8 km<sup>2</sup> y corresponde a una cuenca de tipo costera, exorreica (Figura 4-6). El curso principal que la caracteriza es el río Queule el cual nace desde el flanco norte de la cordillera de Polcura y toma rumbo al norte y noroeste, y luego de 30 km gira hacia el suroeste con un curso de muy escasa pendiente, desembocando finalmente en el extremo sur de la bahía Queule.

En su transcurso se alimenta de variados esteros nacies de los flancos de cerros de la cordillera de la Costa, sin embargo, su principal afluente es el río Boroa, el cual tiene un curso al noroeste y en su última parte al oeste. Esta cuenca cuenta con una estación fluviométrica (Río Santo Domingo en Rinconada de Piedra)

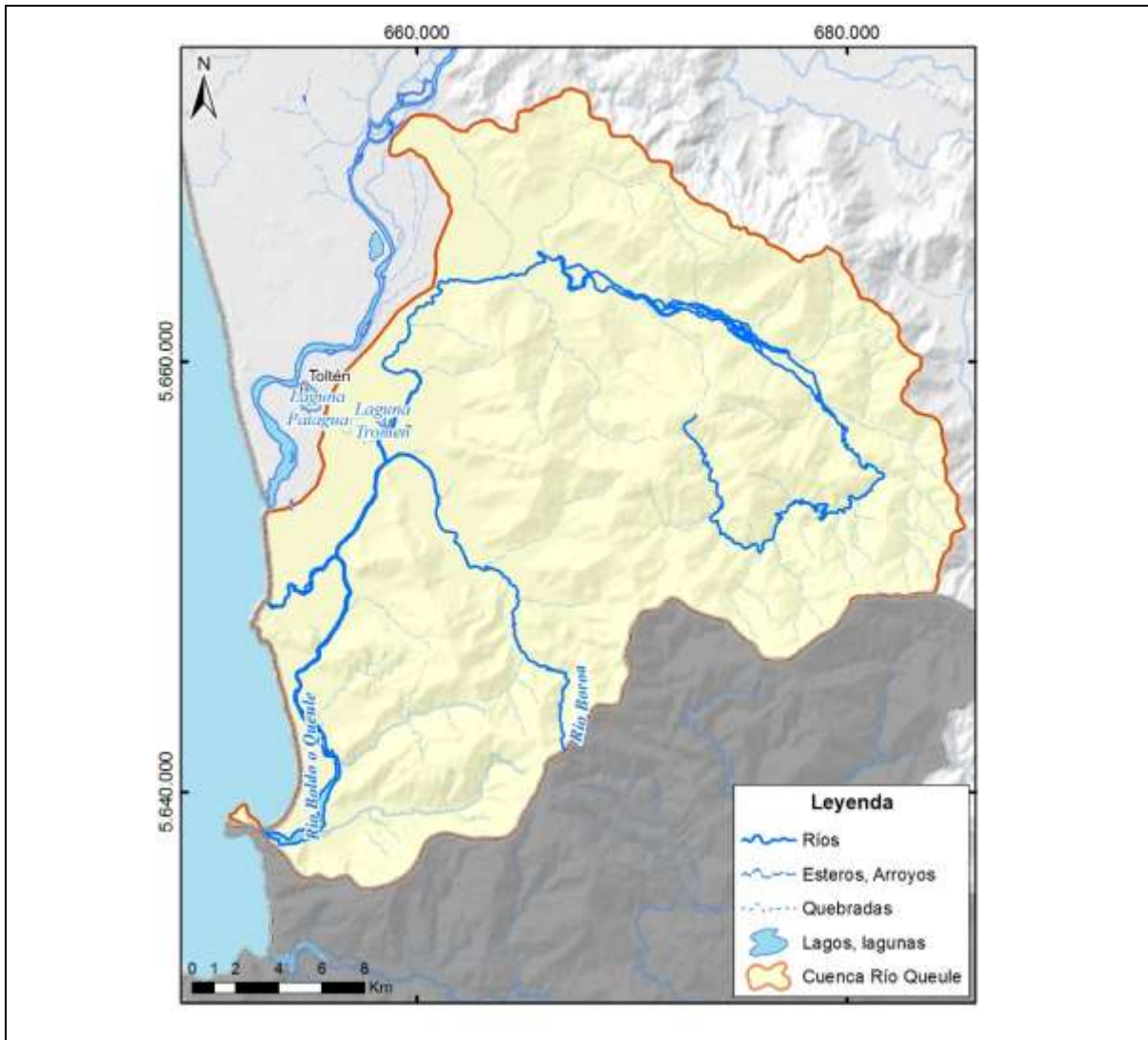


Figura 4-6: Cuenca Río Queule

## 4.2 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CUENCAS

El objetivo de esta actividad es caracterizar hidrológicamente la región en cuanto a la precipitación, flujos superficiales y evaporación, ésta última caracterizada directamente a través de la evaporación de tanque y estimada a partir de la temperatura media.

**Análisis pluviométrico:** Se caracterizó la lluvia en la región, ya que es la principal fuente de recarga de los sistemas subterráneos, para lo cual se estimó el valor de la precipitación mensual, estacional y anual, para distintos puntos de la región a través de isoyetas.

En el área de estudio existen 76 estaciones pluviométricas, la red se encuentra ampliamente distribuida en toda la región, y es adecuada para caracterizar las precipitaciones a escala regional. Del total de estaciones disponibles, se seleccionaron 47 estaciones en base a la longitud de su registro y a su ubicación espacial.

Se generaron curvas isoyetas (isolínea que une puntos de igual precipitación en un plano cartográfico) de precipitaciones anuales y estacionales sobre el área de estudio. Los datos de precipitación analizados muestran que las mayores precipitaciones ocurren entre abril y septiembre, que son en promedio un 74% de las lluvias anuales. Las mayores precipitaciones ocurren en la cordillera de los andes. Los promedios de lluvias anuales varían entre 852 y 3.333 mm, variando poco respecto de su promedio.

Existe una alta correlación espacial de la información dentro de la región. Esto significa que la precipitación se puede estimar de buena manera a partir de una relación lineal con las estaciones vecinas. Considerando la correlación espacial existente se puede concluir que las lluvias puntuales son un buen índice de las lluvias en un radio del orden de 100 km.

**Análisis fluviométrico:** Además de su importancia dentro del balance hídrico, el estudio de comportamiento de los caudales es relevante para entender su relación con el acuífero.

Se consideraron 40 estaciones fluviométricas con más de 10 años en su registro. Del total de estaciones, 14 presentan más de 50 años de extensión. Las estaciones se encuentran bien distribuidas espacialmente dentro de la red fluvial de la región.

Los datos de caudales muestran un comportamiento pluvial, con mayores caudales en los meses de invierno que en los de verano, lo que es coincidente con el comportamiento de las precipitaciones.

Los promedios de los caudales anuales varían entre 3 y 552 m<sup>3</sup>/s. Los coeficientes de variación de los caudales anuales resultaron ser bajos (menores a 0,36), esto indica que el valor del caudal anual varía poco en relación a su promedio.

Se calcularon las producciones específicas (caudal por unidad de área de una cuenca) de las cuencas aportantes a cada estación fluviométrica. Las mayores producciones ocurren en las cuencas de cabecera, con valores mayores a 80 l/s/Km<sup>2</sup>. La producción específica y la altura del centroide de las cuencas aportantes presentan una buena correlación, de manera que las cuencas de cordillera son las que presentan una mayor producción específica. Esto se explica porque la precipitación en la cordillera es mayor y además porque la zona de cordillera presenta suelos de roca, que son menos permeables, lo que produce una menor infiltración y una mayor escorrentía superficial.

**Análisis de la evaporación:** El objetivo de esta caracterización es contar con un conocimiento de la evaporación en toda el área de estudio, tanto a nivel mensual, estacional y anual, dado que es un componente relevante del balance hídrico. En términos generales, las estaciones que miden evaporación mediante taque evaporímetros, se encuentran ubicadas en puntos específicos y periféricos de la región, mientras que la zona media no presenta estaciones. Conforme a lo anterior, la red no es lo suficientemente extensa y bien distribuida para caracterizar la evaporación en toda la región a partir de mediciones directas. Producto de esto la caracterización se llevó a cabo a través de mediciones directas de tanques evaporímetros e indirectamente a través de su estimación a través de la temperatura media.

La red sólo permite caracterizar la evaporación local en un radio cercano a las estaciones consideradas. Asimismo, realizar interpolaciones en la zona media de la región no se considera fiable, ya que el número y la ubicación de las estaciones consideradas deja amplios márgenes de esta zona sin información registrada, conforme a lo anterior

Como es de esperar los mayores valores de evaporación ocurren durante los meses de verano, mientras que la evaporación de abril a septiembre es en promedio un 23% de la evaporación anual. Los valores de evaporación anual promedio son similares a los presentados de evaporación de embalse en el Balance Hidrológico Nacional Regiones VII, IX y X. Los promedios de la evaporación de tanque anual varían entre 688 y 1264 mm.

Respecto a la evaporación es posible señalar que no se observa una relación clara entre altura y evaporación de tanque. Respecto a su variación geográfica, las mayores evaporaciones ocurren en las estaciones que se ubican al norte del área de estudio, mientras que las menores se observan en las estaciones ubicadas en la parte sur.

Se analizaron las correlaciones de las series de cada estación con el resto de las estaciones para los valores mensuales. Los resultados muestran una correlación local importante entre las estaciones ubicadas al norte de la región, que se encuentran agrupadas entre sí a menos de 50 km. La correlación va empeorando con las estaciones ubicadas hacia el sur.

En las cuencas de la región de la Araucanía existe una cantidad importante de estaciones con registros de temperatura que se encuentran bien distribuidas espacialmente dentro de la región. La cantidad y ubicación de las estaciones consideradas permite establecer la distribución de la temperatura en la cuenca, ya que las estaciones están como máximo a 50 Km entre sí.

Como es esperable, los datos muestran mayores valores de temperatura durante los meses de verano. Los promedios de la temperatura anual varían entre 8,6 y 14,0 °C. Los resultados muestran una correlación importante de la información mensual entre todas las estaciones de la región. También se observa que la temperatura disminuye levemente con la altura de la estación.

Para determinar la evapotranspiración a partir de la temperatura se utilizaron el método de Blaney-Criddle, el método de Blaney-Criddle modificado por Doorenbos y Pruitt y el de Thornthwaite. En particular el método de Blaney-Criddle fue utilizado dado que solo requiere datos de temperatura, estimando con ello la humedad, de las horas de sol y del viento. En el área de estudio se consideró este método como el más adecuado, debido a la escasez de información meteorológica. Se calculó la evapotranspiración anual media a partir de la temperatura anual media según estas ecuaciones.

Con la ecuación de Blaney-Criddle la evapotranspiración calculada resulta mayor a la obtenida a partir de los otros métodos. Por el contrario, las variables climatológicas son consideradas por el método de Blaney-Criddle modificado por Doorenbos y Pruitt, que obtiene resultados similares a los obtenidos por el método de Thornthwaite.

La similitud entre estos dos métodos es mayor para las estaciones con temperaturas medias anuales menores a 10°C. El método de Blaney-Criddle modificado por Doorenbos y Pruitt obtiene resultados con órdenes de magnitud similares a la evapotranspiración anual media del Balance Hídrico Nacional Regiones VIII, IX y X (1983) con valores entre 400 y 700 mm, con lo que se valida el método utilizado.

---

## **5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA**

La modelación hidrológica es una herramienta que tiene diversos objetivos, siendo uno de los más importantes contribuir en la comprensión del funcionamiento del sistema hidrológico superficial de la región, aportar en la definición del modelo conceptual del sistema y en particular estimar la recarga de los acuíferos. Con ello fue posible disponer de una herramienta que permitió cuantificar la respuesta hidrológica de las cuencas en distintos puntos del sistema.

La modelación hidrológica se plasmó en un modelo de simulación continuo, a nivel mensual, desarrollado en el programa ExtendSim.

### **5.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio se ha dividido en tres sistemas hidrológicos para efectos de su modelación: i) cuenca del río Imperial, ii) cuenca del río Toltén y iii) cuencas costeras. Cada sistema hidrológico se dividió, a su vez, en zonas de riego las que constituyen las unidades desagregadas de modelación.

Para realizar la sectorización por zonas de riego, se agruparon los distritos agro censales del Censo Agropecuario (2007), con la finalidad de representar y formar las subcuencas y subsubcuencas que conforman las cuencas estudiadas.

La cuenca del río Imperial fue dividida en 20 zonas de riego, mientras que la cuenca del río Toltén fue dividida en 11 zonas de riego. Las cuencas costeras se modelaron como una única zona de riego. Estas se definen considerando las subcuencas y subsubcuencas de la DGA. La división se realizó agrupando los distritos agro-censales con criterios hidrológicos, a fin de representar las subcuencas y subsubcuencas presentes en el área de estudio.

Fue necesario realizar un análisis hidrológico adicional, específicamente para la modelación de la hidrología de superficie, este trabajo estuvo orientado principalmente a la estimación de la disponibilidad hídrica en zonas sin información y a la segregación de las componentes hidrológicas para una mayor comprensión y validación del sistema.

Por ello, una primera etapa de la modelación hidrológica consideró las siguientes actividades:

- Relleno de información faltante para contar con la estadística completas del periodo comprendido entre abril de 1980 y febrero de 2013 (~34 años).
- Separación del caudal en flujo base y escorrentía directa a fin de favorecer la comprensión de la hidrología de superficie, utilizando el algoritmo presentado por Chapman y Maxwell (1996).
- A partir del método de transposición de caudales a partir de las áreas que drenan a cada punto de interés y la precipitación media, para estimación de caudales en zonas sin información

### **5.2 DESCRIPCIÓN MODELO HIDROLÓGICO**

La modelación hidrológica consistió en el desarrollo de un modelo de simulación continua a nivel mensual, que mediante relaciones de balance hídrico de masa y propagación de

caudales, transforma la estadística de precipitaciones y caudales en una representación del sistema hidrológico en el largo plazo.

El modelo hidrológico desarrollado fue implementado en la plataforma ExtendSim, software que se caracteriza por una programación orientada a objetos o módulos, de forma tal que cada uno de estos representa un algoritmo que resuelve un proceso hidrológico determinado. La conexión entre los módulos se realiza mediante conexiones directas o trazos que permiten concatenar las salidas y entradas de información entre los distintos módulos de forma tal de representar el sistema hídrico en estudio.

La aplicación del modelo está orientada a la estimación del balance hídrico en el largo plazo por zonas de riego, el cual se simplificó de acuerdo a la siguiente ecuación,

$$P_p + Q_i = EvT + Q_s + R + \eta + \Delta S$$

donde  $P_p$  es la precipitación mensual;  $Q_i$ , caudal de ingreso a la zona de riego;  $EvT$ , la evapotranspiración que depende del uso del suelo;  $Q_s$ , el caudal de salida de la zona de riego;  $R$ , recarga por precipitaciones al almacenamiento subterráneo;  $\eta$ , las pérdidas o ganancias del sistema no consideradas, como discrepancia del modelo; y  $\Delta S$  las variaciones en el almacenamiento.

Cada unidad de modelación o zona de riego se representó mediante tres módulos que agrupan y representan todos los movimientos del agua. El primer módulo es Tramo de río, que representa los cauces de la zona de riego y puede agregar o restar caudal, para representar las pérdidas o ganancias que tiene el río en su recorrido. El módulo Bocatoma agrupa las extracciones de caudales superficiales realizadas en la zona de riego y el módulo ZonaR representa los procesos del ciclo hidrológico que se producen en cada zona de riego.

El módulo ZonaR está representado por una zona de riego directo (ZRD) y una zona de riego indirecto (ZRI). La zona de riego directo corresponde al área con plantaciones de cualquier tipo de cultivos que son regadas directamente por el ser humano, mientras que la zona de riego indirecto combina las áreas con cultivos de secano (que no reciben riego), las praderas, matorrales, bosques, zonas urbanas, terrenos estériles y las montañas.

Finalmente, la interacción entre los distintos módulos se llevó a cabo considerando como base la escala de las distintas zonas de riego planteadas en el estudio, adecuadas en su escala para la construcción del modelo y su representación regional. En cada una de estas zonas se plantea una ecuación de balance de agua.

La Figura 5-1 representa esquemáticamente los procesos que ocurren dentro de cada módulo de ZonaR.

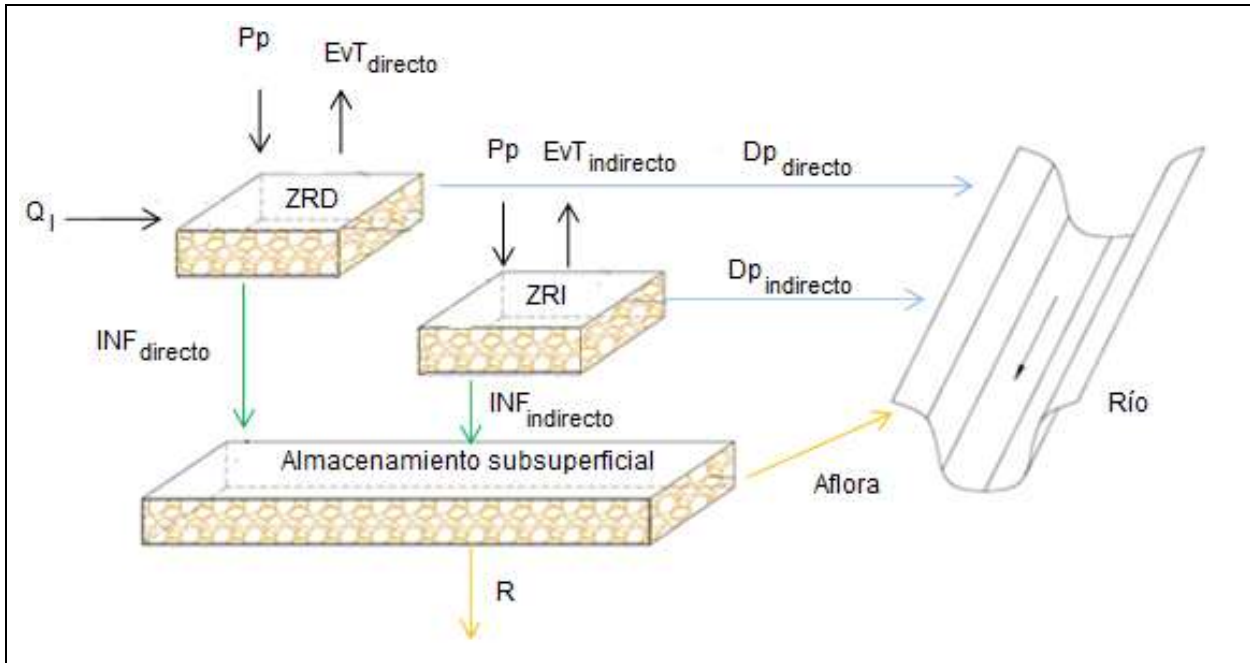


Figura 5-1: Vista esquemática de los procesos que ocurren en un módulo de ZonaR

Ambas zonas de riego tiene un algoritmo de solución similar con algunas diferencias en las entradas y uso hídrico en cada una. Ambas reciben una precipitación  $P_p$  en donde a través de un coeficiente de escorrentía ( $C_e$ , parámetro del modelo) determina el agua que escurre directamente ( $D_p = P_p \cdot C_e$ ). Luego el agua que no escurre está disponible para evapotranspirar ( $EvT$ ) estimada a través del método de Blaney-Cridell (Doorenbos y Pruitt, 1977)

$$EvT \left( \frac{mm}{mes} \right) = K_c \cdot p \cdot (0,46 \cdot T_m + 8,13)$$

,donde  $p$  es el porcentaje de horas de horas de luz (como un porcentaje del total anual) que depende de la latitud ( $38,6^\circ$  de latitud sur para la zona de estudio),  $T_m$  es la temperatura media mensual ( $^\circ C$ ) y  $K_c$  es el coeficiente de cultivo. Para la zona de riego directo  $K_c$  es un vector que depende de los cultivos y que se ingresa como valor de entrada al modelo, y para la zona de riego indirecto el  $K_c$  se considera igual a 1.

Esta demanda hídrica de cultivo para la zona de riego directa es satisfecha por la precipitación si hay disponible a través de la capacidad de campo ( $CC$ , parámetro del modelo). Si no, se extrae del aporte del canal ( $Q_i$ ) que proviene desde el módulo Bocatoma. En caso de no ser suficiente, se genera un déficit hídrico superficial ( $DefH$ ).

Todo lo que no haya escurrido ni evapotranspirado, se infiltra al volumen subsuperficial (INF). Desde este puede aflorar hacia el río (flujo base,  $FB$ ) o infiltrar hacia el acuífero (recarga,  $R$ ). Ambos vaciamientos se consideran como un embalse lineal, donde el caudal de salida ( $FB$  o  $R$ ) es modelado de acuerdo a la ecuación:

$$FB(R) = \frac{VolS_t}{Ka(Kr)}$$

, donde  $VolS$  es el volumen almacenado en el tiempo  $t$ , y  $Ki$  factor de reacción del embalse para el caudal de salida  $i$ .

Este vaciamiento tiene una distribución en el tiempo dado por la ecuación:

$$f_a(t) = (e^{1-Ka} - 1) \cdot e^{-\frac{1}{Ka}(35-t)}$$

$$f_r(t) = (e^{1-Kr} - 1) \cdot e^{-\frac{1}{Kr}(71-t)}$$

, donde los número 35 o 71, limitan el tiempo máximo (36 o 72 meses) que una gota de agua tiene para salir del volumen como afloramiento al río o recarga al acuífero.

En la Figura 5-2 se representan esquemáticamente las unidades de proceso hidrológicos representados en ExtendSim a través de los módulos explicados anteriormente en el modelo hidrológico.

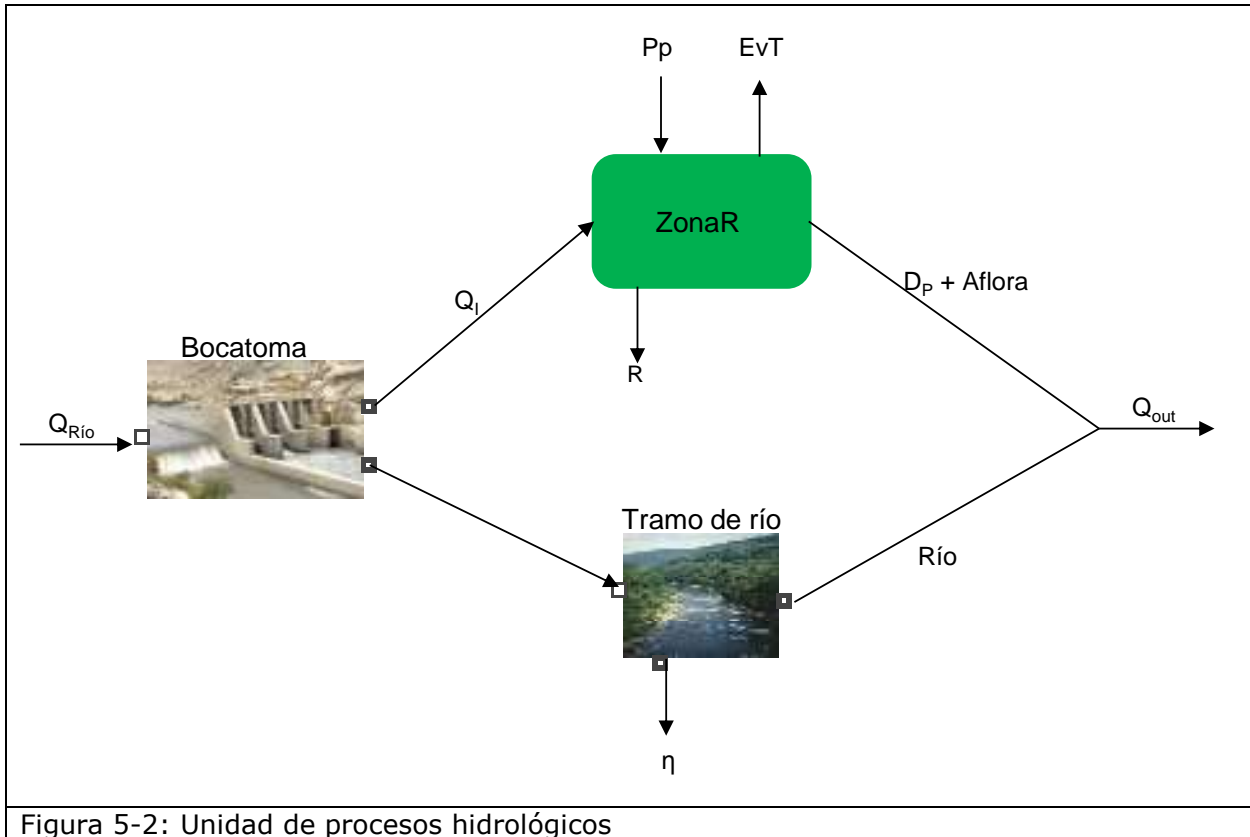


Figura 5-2: Unidad de procesos hidrológicos

De forma posterior al proceso de construcción del modelo hidrológico, se llevó a cabo la calibración del mismo, de modo de representar, tanto los caudales registrados en las estaciones fluviométricas, así como los flujos bases medidos y estimados en las estaciones presentes en la cuenca del río imperial. El proceso de calibración se llevó a cabo modificando los parámetros de la cuenca (Figura 5-1), minimizando la diferencia entre el caudal medido y el modelado, para cada serie de caudales medidos y modelados.

La calibración fue satisfactoria, a modo de ejemplo en la Figura 5-3 se presenta el resultado de la calibración del caudal medio mensual observado (Obs) y simulado (Sim) para la estación Río Cautín en Almagro. Se observa que el modelo es capaz de reproducir el comportamiento estacional y también los máximos observados.

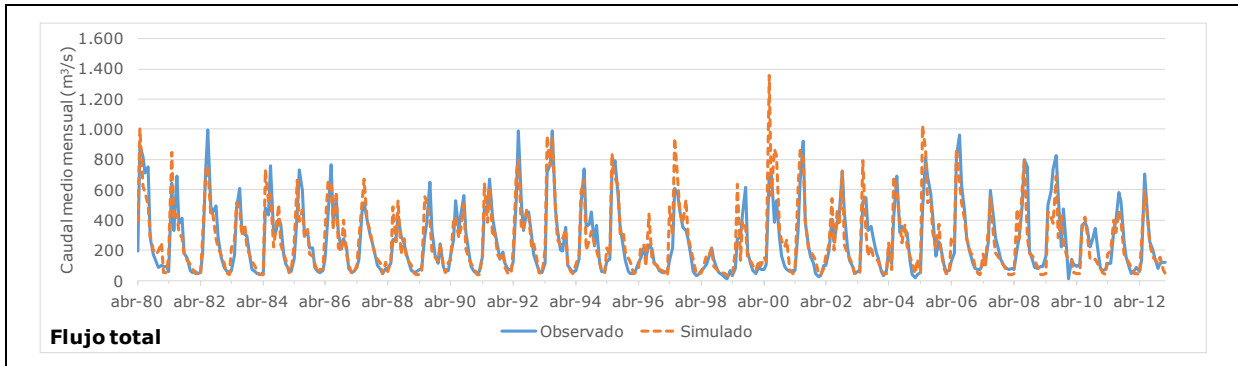


Figura 5-3: Calibración estación Río Cautín en Almagro

De forma posterior al proceso de calibración, se llevó a cabo la validación del modelo hidrológico, el que se realizó en la cuenca del río Toltén ya que está formado por una red hídrica más sencilla y con una disponibilidad hídrica fluvial mayor, por lo que la calibración de parámetros que influyen en el balance hídrico a partir de las precipitaciones, es minoritaria y por ende menos precisa. A través de los estadígrafos y comparando visualmente los caudales se concluye que el modelo simula correctamente las series de caudales, validando así los parámetros ajustados anteriormente.

Se utilizaron cuatro estaciones Q29 (Río Allipén en Melipeuco), Q30 (Río Allipén en Los Laureles), Q36 (Río Toltén en Coipue) y Q40 (Río Toltén en Teodoro Schmidt) para validar la generación de caudales históricas a partir de la modelación.

En las Figura 5-4 y Figura 5-5 se grafican, a modo de ejemplo, los caudales observados y simulados para las estaciones Q29, Q36 y Q40, tanto para el flujo total como para el flujo base. A través de los estadígrafos y visualmente se observa que el modelo simula correctamente las series de caudales, validando así los parámetros ajustados anteriormente y permitiendo su utilización para estimación y caracterización de las componentes hidrológicas del sistema.

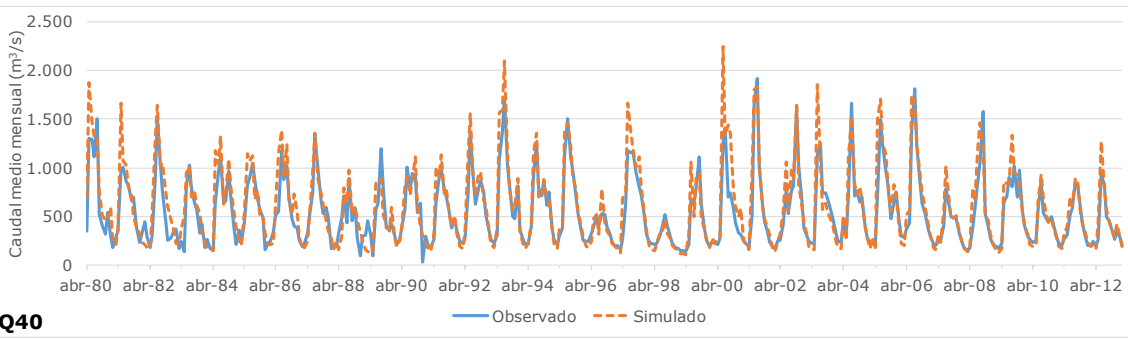
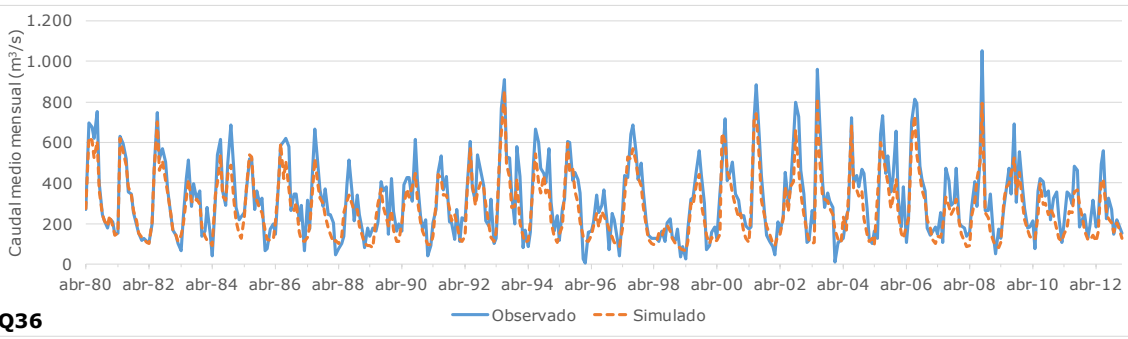
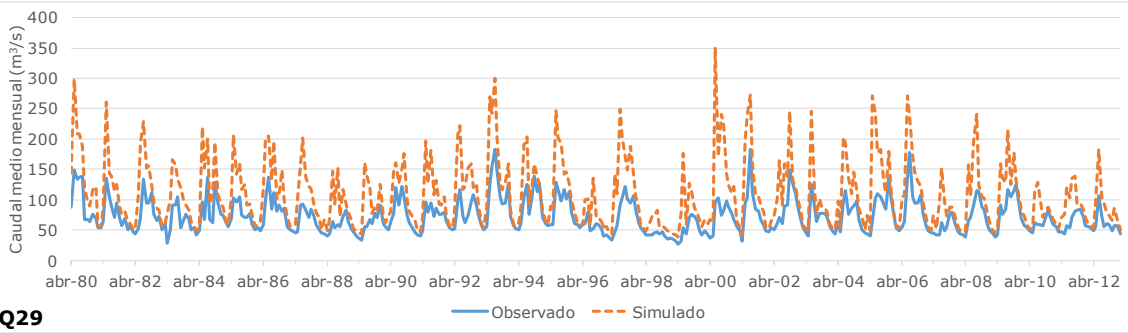


Figura 5-4: Validación del flujo total

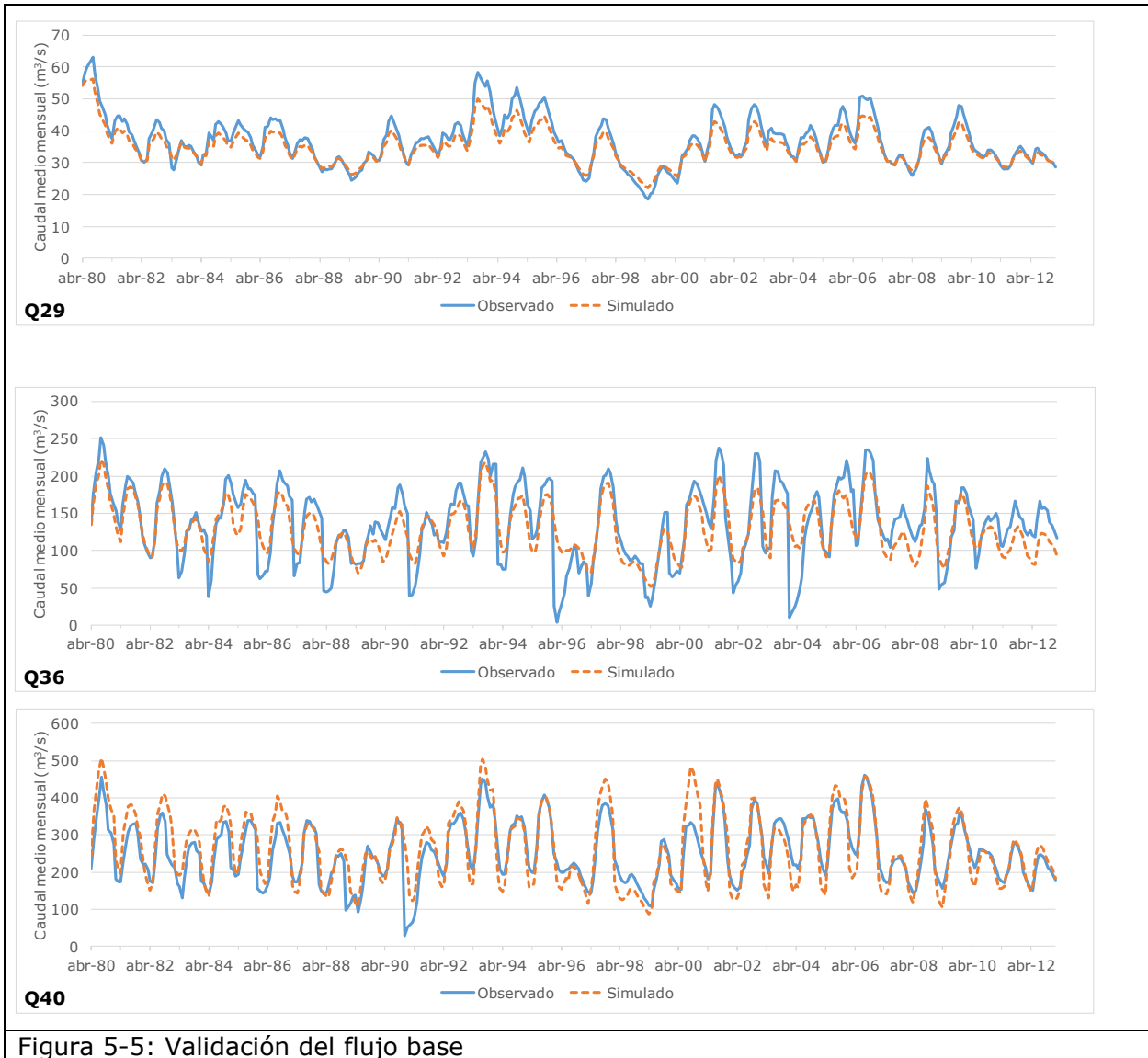


Figura 5-5: Validación del flujo base

Se concluye que en promedio la modelación hidrológica tiene un error mensual de 36% para el caso del flujo total y de 22% para el caso del flujo base. Este último es un valor razonable dado los objetivos y diseño del modelo, lo que sirve para validar la calibración.

### 5.3 APLICACIÓN DEL MODELO

El modelo fue utilizado para estimar el balance hídrico por zonas de riego, para las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, así como también para las cuencas costeras. Con la aplicación del modelo se calculó el porcentaje de recarga con respecto a la precipitación para cada zona de riego, estimando un valor medio de 3,1 y 4,3 %, equivalente a 20,6 m<sup>3</sup>/s y 30,7 m<sup>3</sup>/s para las cuencas del río Imperial y Toltén respectivamente. Si bien los porcentajes parecieran ser valores bajos para zonas con clima templado lluvioso, se

explica por la saturación de los sistemas subterráneos que favorecen la escorrentía superficial.

La estimación de recarga al acuífero por precipitaciones obtenida se compara con aquella obtenidas del estudio de DGA (2014), que corresponde a la última estimación realiza para la región, aunque utiliza una escala espacial menos desagregada que el presente estudio.

El estudio de la DGA estima una recarga regional un 30% mayor que la estimada en el presente estudio (70 m<sup>3</sup>/s versus 54 m<sup>3</sup>/s) y una precipitación media un 9% mayor (1.491 m<sup>3</sup>/s versus 1.373 m<sup>3</sup>/s). En las cuencas de los ríos Cautín (Imperial) y Toltén Alto (Toltén), es donde se producen las mayores diferencias en la estimación de recarga. En estas cuencas, las precipitaciones son mayores en más del 23% en el estudio de la DGA, lo que sumado al nivel agregado de estas cuencas, podrían explicar las discrepancias.

La Tabla 5-1, Tabla 5-2 y Tabla 5-3 resumen los resultados del balance hídrico para las cuencas del río Imperial, Tolten y para la región completa, respectivamente.

Tabla 5-1: Estimación de recarga en la cuenca del río Imperial dividido por subcuencas\*

Cuenca	Pp m <sup>3</sup> /s	EvT m <sup>3</sup> /s	R m <sup>3</sup> /s	R mm/a	Q <sub>i</sub> m <sup>3</sup> /s	Q <sub>o</sub> m <sup>3</sup> /s	η m <sup>3</sup> /s	R/Pp %
Lumaco	145,0	86,3	4,2	39,8	19,8	77,3	-3,0	2,9
Cholchol	118,6	72,6	2,5	29,3	80,0	140,2	-16,4	2,1
Cautín Alto	176,9	81,2	6,8	72,3	56,5	157,4	-12,0	3,8
Quepe	145,9	67,5	5,6	73,2	27,4	106,2	-6,0	3,9
Imperial	55,4	34,6	1,5	34,0	403,8	422,5	-0,2	2,6

\*Descripción de parámetros ver página 37.

Tabla 5-2: Estimación de recarga en la cuenca del río Toltén dividido por subcuencas\*

Cuenca	Pp m <sup>3</sup> /s	EvT m <sup>3</sup> /s	R m <sup>3</sup> /s	R mm/a	Q <sub>i</sub> m <sup>3</sup> /s	Q <sub>o</sub> m <sup>3</sup> /s	η m <sup>3</sup> /s	R/Pp %
Allipén	169,6	74,5	7,3	94,1	98,0	216,3	-30,5	4,3
Pucón	252,1	93,9	14,0	160,4	101,0	245,3	0,0	5,5
Lago Villarrica y Toltén Alto	69,2	30,4	3,2	100,8	248,6	284,2	0,0	4,6
Toltén Bajo	164,3	77,3	6,3	74,7	550,3	611,1	20,0	3,8

\*Descripción de parámetros ver página 37.

Tabla 5-3: Balance hídrico para las cuencas costeras de la región de la Araucanía\*

Cuenca	Pp m <sup>3</sup> /s	EvT m <sup>3</sup> /s	Q <sub>s</sub> m <sup>3</sup> /s	R m <sup>3</sup> /s	R mm/a	R/Pp %
Río Budi	19,1	11,1	7,4	0,56	35,7	2,9
Costeras entre río Budi y río Toltén	8,4	4,4	3,7	0,28	55,6	3,4
Río Queule	48,3	20,8	25,5	1,94	93,0	4

\*Descripción de parámetros ver página 37.

## 6 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y GEOLÓGICA

Se presenta en este capítulo una descripción de la geomorfología y geología de superficie y subsuperficie del área de estudio. Se incluye una caracterización estructural y una descripción del contexto hidrogeológico en el cual se desarrollan las cuencas en estudio.

### 6.1 MARCO GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

La región de la Araucanía presenta, de este a oeste, las siguientes unidades morfoestructurales: (1) Cordillera de los Andes; (2) Depresión Intermedia, (3) Cerros de Ñielol; (4) Cordillera de la Costa y 5) Llanuras Fluviomarinas. La distribución geográfica de estas unidades se presentan en la Figura 6-1.

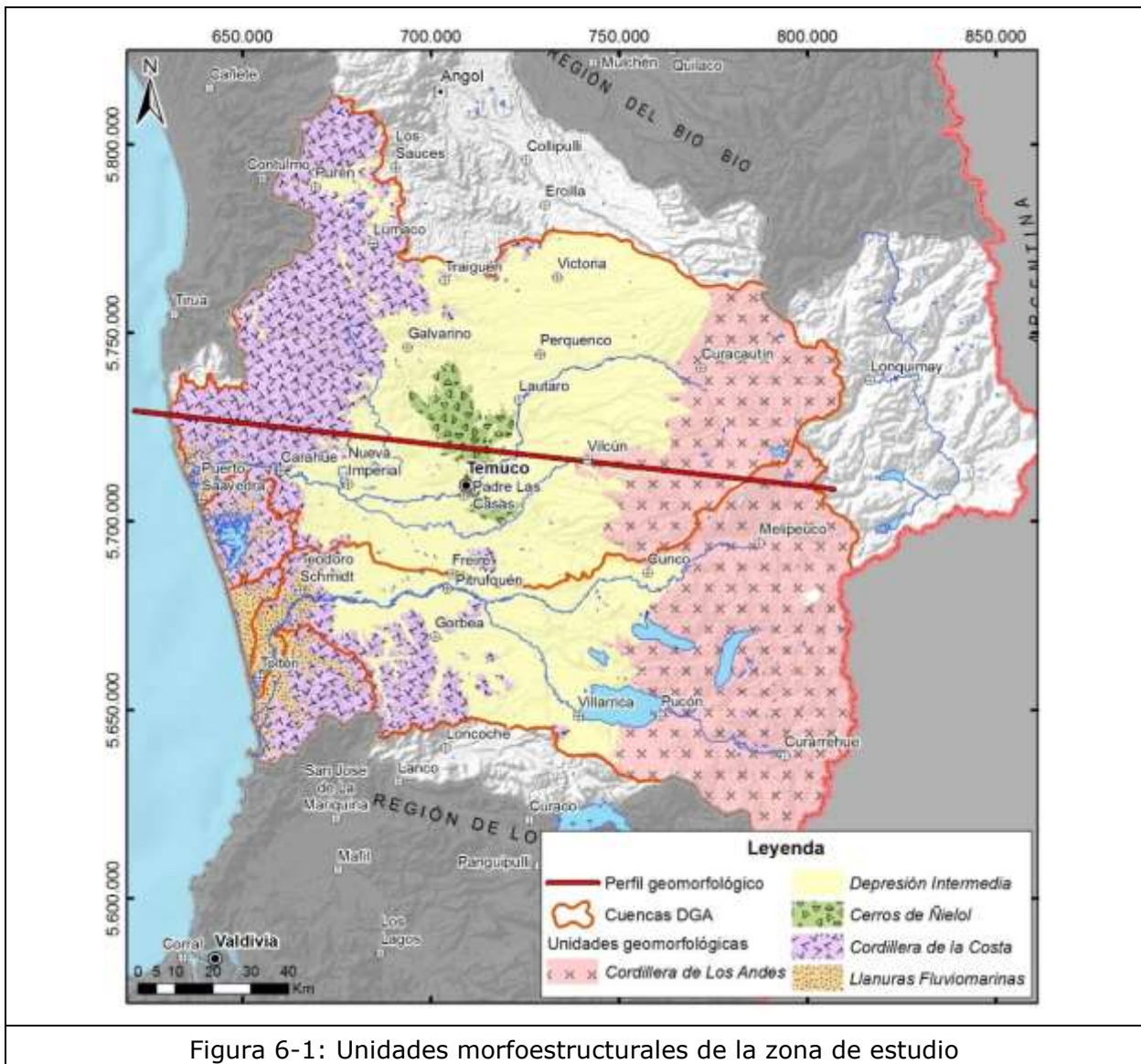


Figura 6-1: Unidades morfoestructurales de la zona de estudio

## 6.2 GEOLOGIA DE SUPERFICIE

Se caracterizó las unidades geológicas reconocidas en las cuencas de los ríos Toltén, Imperial y las cuencas costeras de la región de la Araucanía, además del contexto geológico regional en que se desarrollan. Este trabajo se realizó en base a la información geológica disponible (principalmente, mapas geológicos del Sernageomin). Conforme a estos antecedentes se elaboró el primer mapa integrado de geología superficial en la región, a escala 1:400.000, el que se presenta en la Figura 6-2.

La región se caracteriza por presentar unidades geológicas que abarcan desde el Devónico-Carbonífero (Paleozoico) al presente. Las unidades más antiguas corresponden a los complejos metamórficos Serie Oriental (Pz4b) y Bahía Mansa (PzTrbm) y al Batolito Costero del Sur (Pzg).

En la Cordillera de la Costa, destaca por su extensión superficial el Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM). Estas unidades evidenciarían procesos de acreción por subducción en el margen suroccidental de Pangea (Gondwana occidental) durante el Paleozoico superior-Triásico. Estas unidades constituyen el basamento de las unidades del Mesozoico y Cenozoico que yacen sobre ellas.

En la Depresión Intermedia, se dispone sobreyaciendo al CMBM, secuencias compuestas por areniscas, lutitas y conglomerados cuarcíferos de la formación Llafquentué-Huimpil (Tr), asociados con ambientes fluviales y lacustres que ocurrieron durante el Triásico Superior. Estas rocas son parte de sistemas sedimentarios asociados a una cuenca continental, de orientación NO-SE, abierta hacia el NO, con influencia marina y clima estacional lluvioso.

Durante el Jurásico Temprano comienza el ciclo Andino, el cual se caracteriza por la reanudación de la subducción y desarrollo del arco magmático jurásico temprano. Hacia el noreste de la región de la Araucanía, se depositaron secuencias sedimentarias marinas y volcánicas, representado por la formación Nacientes del Biobío (Jnb). Esta formación representa los depósitos generados durante la evolución de una cuenca de trasarco desarrollada en el Jurásico al Cretácico Temprano, cuyo depocentro se extiende hacia el este en Neuquén (Argentina).

Sobre todas las secuencias descritas anteriormente, se habría desarrollado el arco magmático del Cretácico, organizado en franjas longitudinales y caracterizado por cuerpos intrusivos (Kg) y secuencias volcánicas (KTvc), localizados principalmente en la Cordillera Principal.

Posteriormente, en el Paleoceno, sobre este basamento plutónico-volcánico, se desarrollaron cuencas intramontañas, en donde se depositaron lavas andesíticas y brechas volcánicas con intercalaciones de rocas sedimentarias, que caracterizan a los Estratos de Relicura (KTvc).

Además, se desarrollaron una serie de cuencas de intrarco, bajo condiciones extensionales, que comenzó en el Eoceno Superior con la depositación de sedimentos clásticos de la Formación Temuco (EMt). Esta sedimentación clástica continua en el Oligoceno inferior y comienza un volcanismo andesítico riolítico depositándose la Formación Pilmahue (OMp). Los centros activos de estas cuencas de intrarco se localizaron sobre una estructura mayor de orientación NO-SE, denominada Zona de Falla Lanahue (ZFL).

Durante el Oligoceno superior-Mioceno se depositaron en estas cuencas depósitos de lavas andesíticas y brechas volcánicas, además de cuerpos subvolcánicos, representados por la Formación Curamallín (OMcm). La subsidencia en la cuenca y el volcanismo se

prolongaría hasta el Mioceno inferior, pero el mayor desarrollo de la cuenca ocurrió en el Mioceno medio, periodo que se caracteriza por un mayor desarrollo del volcanismo en la Cordillera Principal, y un evento transgresivo marino, depositándose las unidades geológicas Estratos de Huinchahue y Formación Cholchol (Mch).

El magmatismo orogénico entre el Eoceno (Egc) y Mioceno (Mg) se ve reflejado por los grupos plutónicos Granitos Curacalco (Egc), Granitoides Carhuello, Grupo Plutónico Melipeuco, Granitoides Trancura, Diorita Tres Horquetas, Granitos y granodioritas Las Peinetas y Complejo Intrusivo Huerquehue (Mg), asociados genéticamente al régimen transpresivo de la zona de falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO). La intensa erosión glacial iniciada en el Plioceno habría favorecido la exhumación del arco plutónico en conjunto con el régimen de transpresión imperante.

Los movimientos compresivos que invirtieron la cuenca eocena-miocena durante el Mioceno superior y Plioceno, está registrado por la depositación en la Depresión Intermedia de sedimentos clásticos gruesos (unidades Conglomerado Paillal y Conglomerado Raluncoyán (PPI)). Paralelamente, se depositaron secuencias volcánicas de las formaciones Malleco y Curarrehue (PPIIm) producto del volcanismo del Plioceno-Pleistoceno inferior y alzamiento de la Cordillera Principal. Desde el arco volcánico se generaron potentes abanicos aluviales y lahares en dirección a la Depresión Intermedia, que dieron origen a la unidad Abanico Volcanoclástico de Muco (PPIImu) y también a depósitos de la Formación Malleco (PPIIm).

Durante el Pleistoceno, el área de estudio estuvo marcada por sucesivas glaciaciones, denominadas glaciaciones Río Llico (480-338 ka), Santa María (260-132 ka) y Llanquihue (73-14 ka). Producto de éstas, se generaron depósitos morrénicos (Plm) y glaciofluviales (Plgf) que se depositaron desde la Cordillera Principal hasta la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, ocupando gran parte de la Depresión Intermedia. Durante el último interglaciar, en la costa se depositaron arenas estratificadas (Plfe) en un ambiente fluvial, estuarino y marino de disposición horizontal a subhorizontal que se caracterizan morfológicamente como amplias terrazas.

El magmatismo del Pleistoceno (Plv) y Holoceno (Hv) y los depósitos piroclásticos (PIHdp) y laháricos (Hlh), están asociados a los depósitos de volcanes antiguos y actuales: Volcán Villarrica, Quetrupillán, Nevados de Sollipulli, volcán Quinquilil, Llaima, Lonquimay, Tolhuaca y Sierra Nevada.

Los depósitos no consolidados del holoceno, se distribuyen a través de los cursos de ríos, esteros y quebradas (Hfa, Hf), en las playas (Hep), en las llanuras de inundación, los deltas de ríos y cabeceras de valles asentados en cerros con laderas de alta pendiente (Hal) y en laderas de cerros (Hrm y Hc).

El área presente una serie de estructuras de carácter regional que controlan la disposición del basamento de la cuenca y el contacto entre unidades. La principal estructura corresponde a la zona de Falla Lanalhue que se extiende desde la península de Arauco (lago Lanalhue) hasta las cercanías de Temuco.

Cabe destacar además la Zona de Fallas Liquiñe-Ofqui que definen un sistema estructural de intraarco que se extiende por casi 1.200 km entre los 38 y 46°S, sin embargo estas estructuras controlan el volcanismo reciente ubicado más al este de la zona de mayor interés hidrogeológico.



### **6.3 GEOLOGÍA DE SUBSUPERFICIE**

A partir de la información proporcionada por los trabajos de la ENAP, de perfiles geológicos interpretados y presentados en las diferentes cartas geológicas del Sernageomin, y de la información estratigráfica de pozos (APR, DGA, Expedientes DGA y pozos perforados en el marco de este estudio), se analizó la geología subsuperficial en la cuenca del río Imperial, cuenca del río Toltén y cuencas costeras. La mayor parte de la información se obtuvo a partir de los expedientes de solicitud de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas (Figura 6-3).

Cabe destacar que las descripciones estratigráficas de estos pozos son de pobre calidad, por lo cual se agruparon estratos que presentaron litologías de similar granulometría. Si bien la distribución de estos tipos granulométricos se observa, en general, a lo largo de toda el área de estudio, no es posible establecer una continuidad lateral de estos tipos litológicos dentro de la región.

Cabe destacar que el presente trabajo es el primer estudio hidrogeológico que se realiza en la región, por lo que toda la información recopilada y analizada es de gran valor. En el caso de este proyecto, como es de escala regional, se han considerado las grandes unidades tanto geológicas como hidrogeológicas, por lo que el estudio de detalle sólo fue utilizado como referencia para la creación de los modelos hidrogeológicos conceptual y numérico.

Sin perjuicio de lo anterior, se presenta una serie de información estratigráfica y geológica de detalle, que es de gran utilidad en el caso que se requiera construir modelos hidrogeológicos locales, o bien como fuente de información para futuros trabajos a escala más acotada dentro de la región.

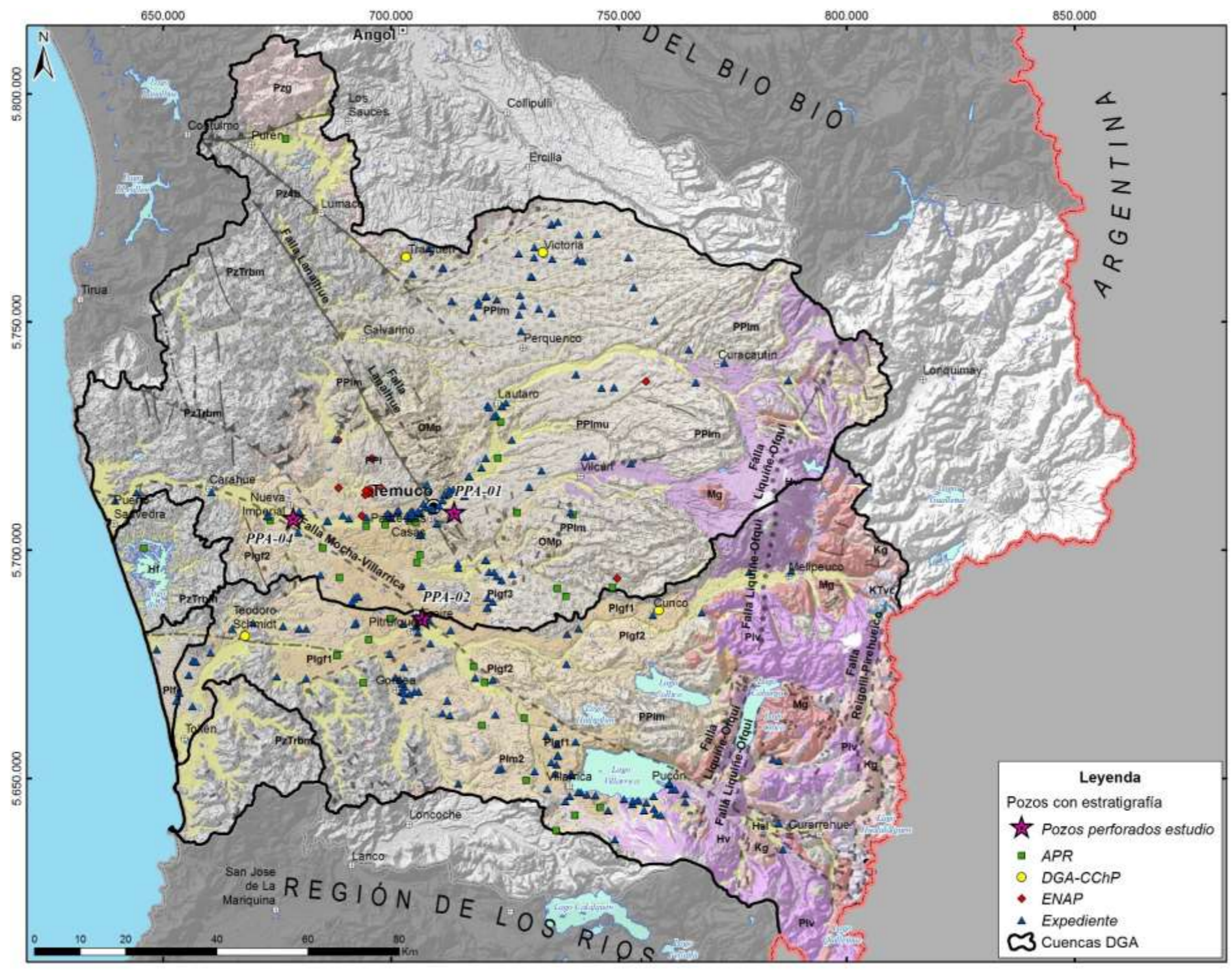


Figura 6-3: Distribución de Pozos con estratigrafía en el área de estudio

---

## **7 TRABAJOS EN TERRENO - GEOFÍSICA, POZOS DE EXPLORACIÓN Y PRUEBA DE BOMBEO**

El estudio geofísico consideró sendas campañas de Transiente Electromagnético (TEM) y Gravimetría. Se realizó 450 TEM y 680 estaciones gravimétricas, las que se describen a continuación. Adicionalmente y en el contexto de prospecciones hidrogeológicas, se perforaron y habilitaron como piezómetros 3 pozos, y se realizaron 25 pruebas de bombeo, 22 de ellas en pozos existentes y las 3 restantes, en los nuevos pozos.

### **7.1 CAMPAÑA GRAVIMÉTRICA**

La campaña de gravimetría tuvo por objetivo principal identificar y limitar unidades geológicas en subsuperficie. El método se basa en mediciones de gravedad que se relacionan con la densidad local del subsuelo, lo que permite diferenciar de buena forma los depósitos sedimentarios de las rocas más densas, y así caracterizar la geometría del basamento rocoso.

En este proyecto, la campaña gravimétrica comprendió el levantamiento de información en 680 estaciones, con un intervalo de separación entre 1 a 2,5 km, formando una malla de 176 x 176 km, que cubre un área aproximada de 30.976 km<sup>2</sup>. La información generada fue reprocesada, lo que permitió obtener un mapa de profundidades del basamento, utilizando un modelo de inversión "tipo cuenca".

Se tomaron muestras de roca para medición de su densidad en distintas zonas de la región, sin embargo, dada la complejidad para la interpretación de los datos levantados considerando distintas densidades de roca, se optó por utilizar un valor promedio para todas las rocas de la cuenca.

Así, el modelo de cuenca consta de dos unidades de densidad uniforme: la unidad superior representa un promedio de los sedimentos, mientras que la inferior corresponde al basamento. De acuerdo a valores de densidad en muestras de sondajes profundos (Pozos ENAP), e información de otros estudios gravimétricos en la región, se consideró un contraste de densidad de -0.5 gr/cc, resultante de densidades de 2.1 y 2.6 gr/cc para los sedimentos y el basamento, respectivamente. Este contraste debe ser considerado como un promedio representativo de toda el área de estudio y de carácter regional.

La Figura 7-1 presenta los mapas de Profundidad y Elevación del Basamento, resultantes del procedimiento de inversión aplicado. Los resultados obtenidos fueron calibrados con el contacto roca/relleno reportado en los pozos de ENAP y con aquellas estaciones emplazadas en afloramientos superficiales de roca.

La elevación corresponde a la topografía SRTM menos la profundidad del basamento. Se observan profundidades de basamento de hasta 2.700 m aproximadamente. El color amarillo indica alrededor de 650 m; el color celeste alrededor de 1300 m. Es muy importante considerar que los resultados en los sectores sin datos (zonas sin puntos de la Figura 7-1) corresponden a una interpolación numérica que ayuda a dar continuidad a la información y a visualizar el conjunto.

Del mismo modo, el resultado de las interpolaciones realizadas es una buena aproximación a escala regional, pero en ningún caso pueden considerarse valores cuantitativamente exactos; es decir, el resultado de las interpolaciones es una buena aproximación cualitativa de las profundidades del basamento, pero los valores absolutos son variables en toda el área estudiada.

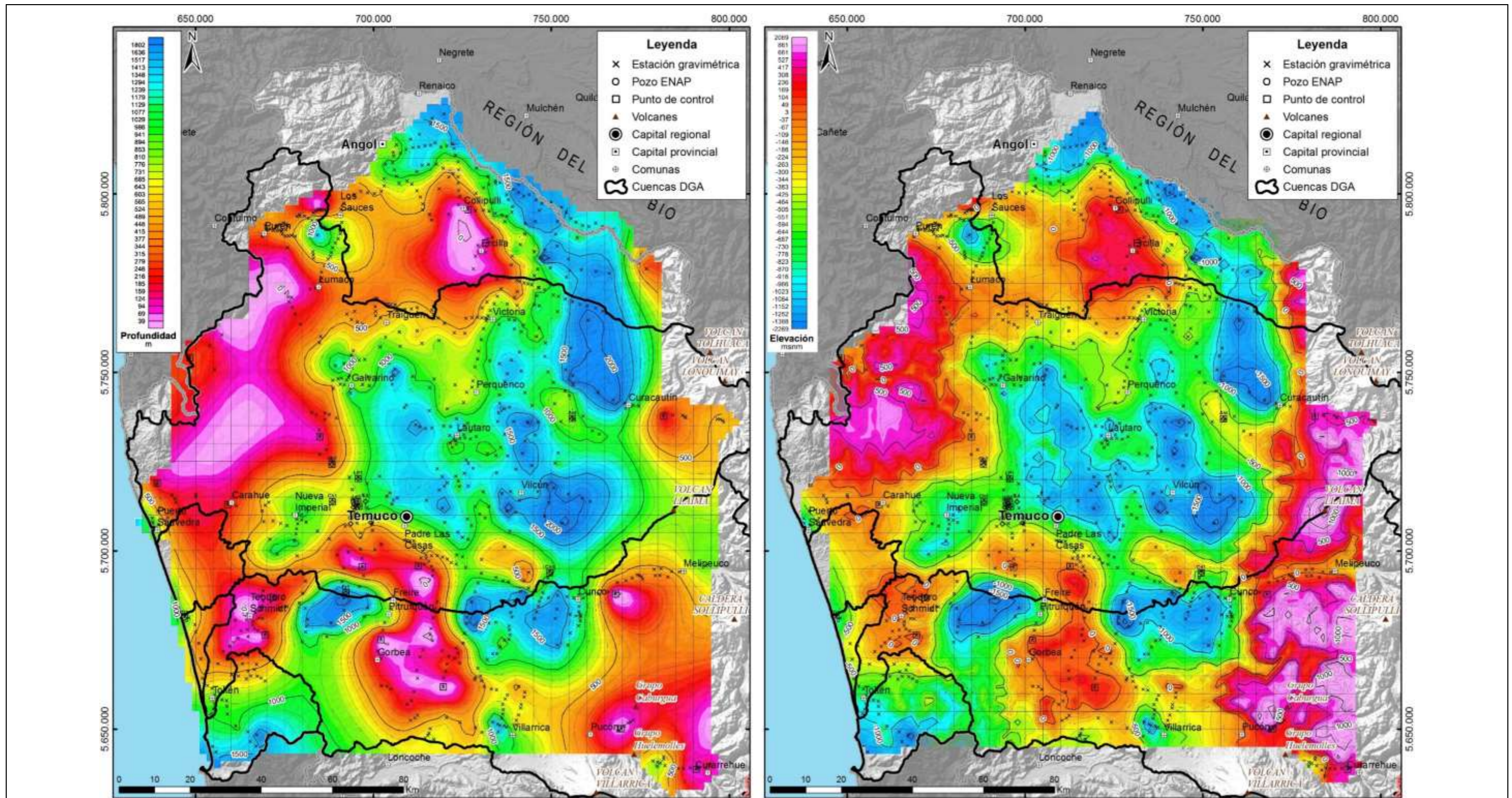


Figura 7-1: Mapas de profundidad y elevación de basamento

## **7.2 CAMPAÑA GEOFÍSICA TEM**

La campaña TEM tuvo como objetivo caracterizar geoelectricamente el subsuelo, identificando zonas saturadas o drenadas (secas), tipos de relleno y eventualmente, zonas de debilidad estructural o fallas. Las secciones TEM permiten complementar los resultados de la campaña gravimétrica; sin embargo, su objetivo principal es determinar la profundidad de niveles saturados y, eventualmente, la conexión o desconexión hidrogeológica con los cauces superficiales. Se realizó una "calibración" directa con pozos, correlacionando las unidades geoelectricas identificadas con la estratigrafía local y la ubicación del nivel freático y zonas saturadas.

La exploración TEM consistió en la medición inicial de 466 estaciones, de las cuales 297 fueron realizados con tamaño de espira de 25 m de lado, 156 con espira de 50 m de lado y los 13 restantes con espiras de 100 m de lado. Estas 466 estaciones fueron complementadas posteriormente con 15 estaciones adicionales con loop de 200x200 m.

La Figura 7-2 muestra la distribución de las estaciones TEM levantadas en terreno y los perfiles representativos que se incluyen en el cuerpo principal del informe.

Como observación general a la interpretación de los perfiles resistivos, gran parte de los modelos muestran una caída sostenida de las resistividades en profundidad sin contraste resistivo. Sin embargo, observaciones de estratigrafía de pozos, no muestran similitud en los cambios de litología con este cambio de resistividad. Este cambio resistivo tampoco muestra tener relación con el nivel del agua subterránea. Por ello se infiere que en muchos casos, las bajas resistividades mostradas por la inversión matemática en profundidad podrían ser debido a la pérdida de la señal recibida, lo que limita su aplicabilidad en la delimitación de la geometría de las unidades hidrogeológicas definidas. Esta pérdida de señal en profundidad usualmente se debe a la presencia de estratos muy conductivos, los que impiden reconocer capas a mayores profundidades.

Debido a que toda la información de los perfiles TEM fue utilizada para la construcción del modelo hidrogeológico 3D, en el capítulo correspondiente a la conceptualización hidrogeológica se analiza con más detalle los resultados de los perfiles TEM y geometría obtenida de las unidades geológicas o hidrogeológicas.

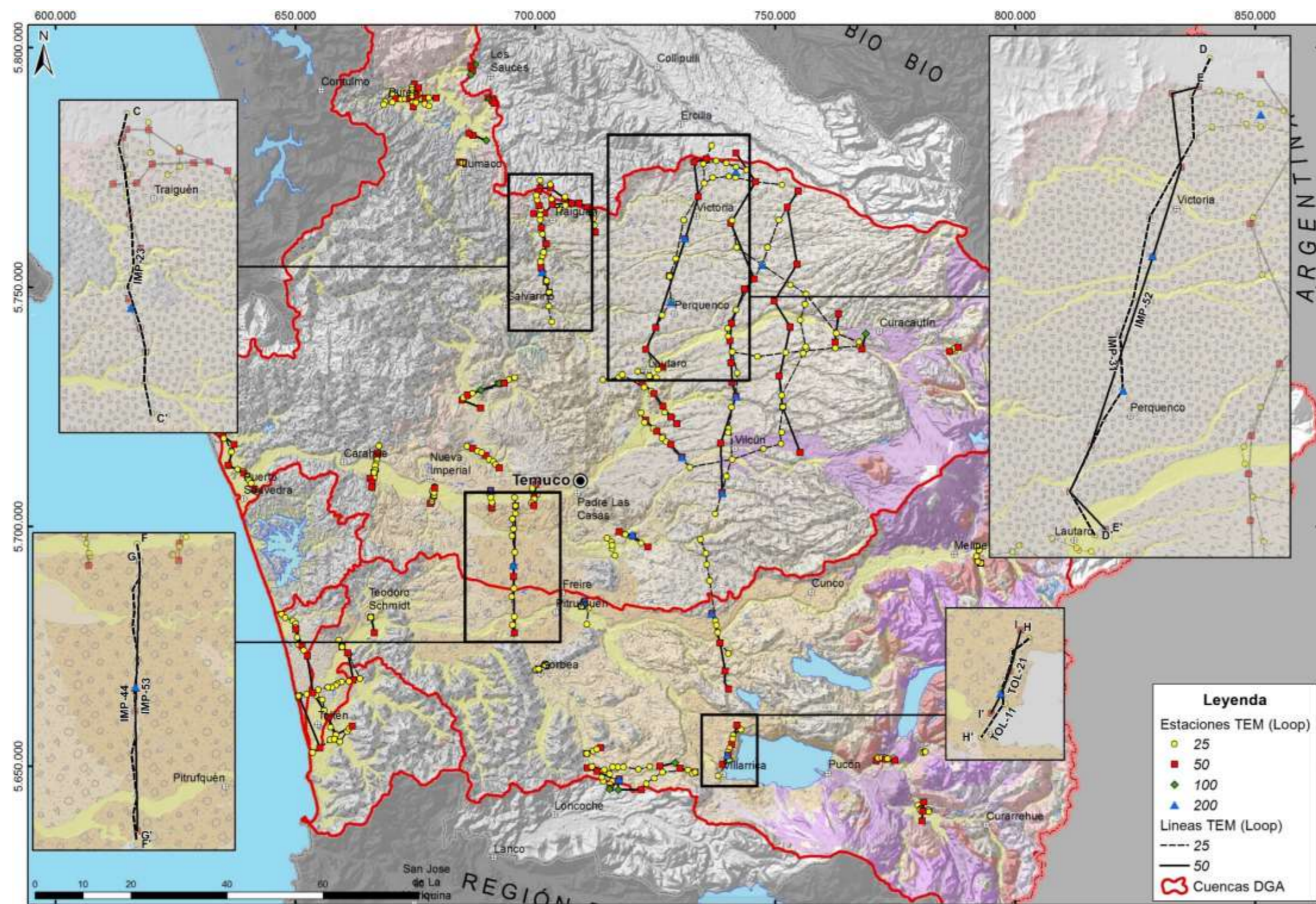


Figura 7-2: Ubicación de estaciones TEM y perfiles representativos interpretados

### 7.3 POZOS DE EXPLORACIÓN Y PRUEBAS DE BOMBEO

Con la finalidad complementar la información hidrogeológica, se perforaron 4 sondajes, de nominados PPA-01, PPA-02, PPA-03 y PPA-04, en los sectores de Padre Las Casas, Freire, Villarrica y Nueva Imperial, respectivamente. Estos pozos fueron perforados entre los meses de noviembre de 2014 y septiembre del año 2015, alcanzando profundidades de 101,78 m (PPA-01), 150 m (PPA-02), 49 m (PPA-03) y 100 m (PPA-04). Los pozos fueron habilitados como piezómetros para el monitoreo del nivel freático. La Figura 7-3 muestra la ubicación de los pozos.

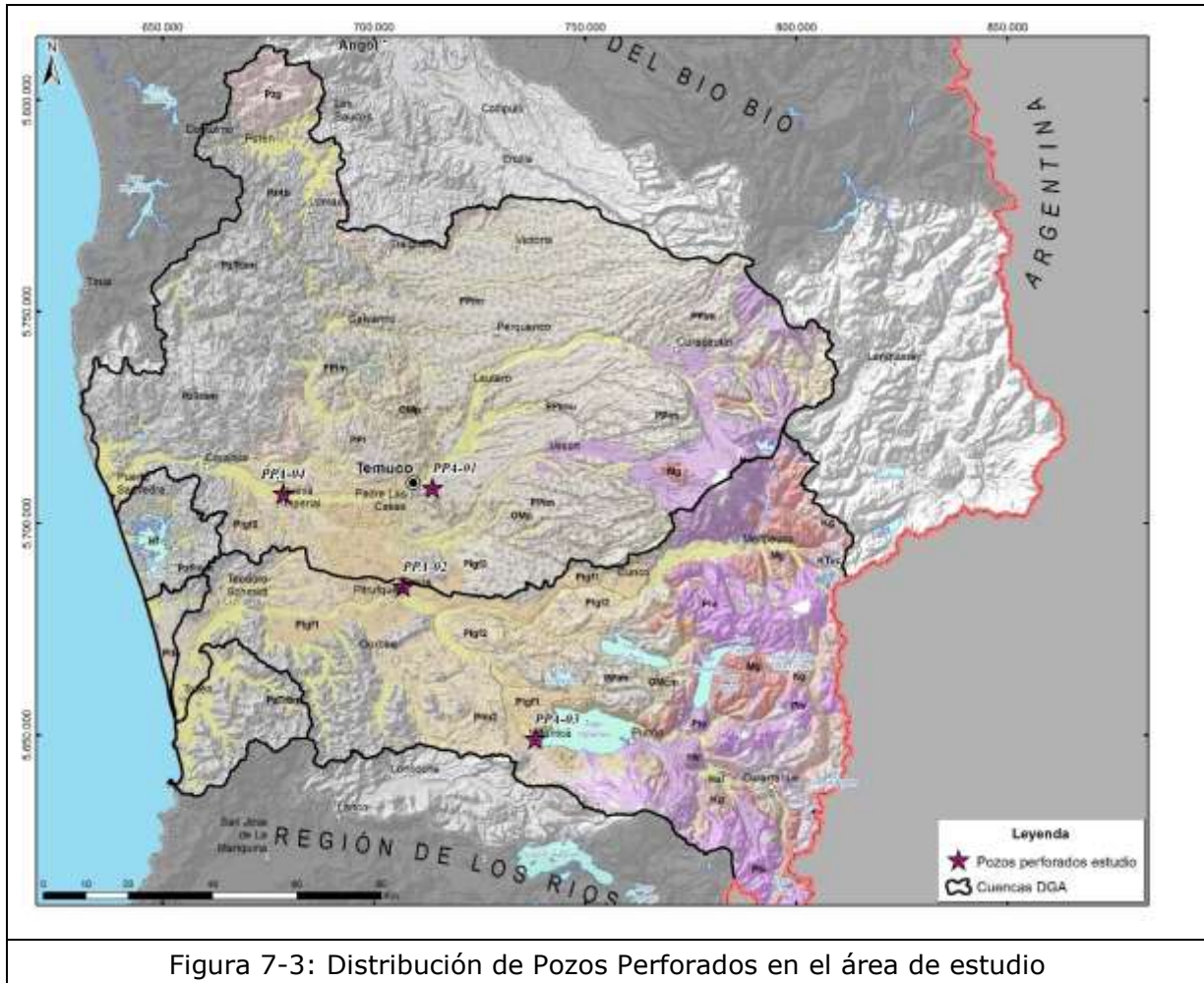


Figura 7-3: Distribución de Pozos Perforados en el área de estudio

Adicionalmente, durante los meses de Septiembre y Octubre de 2015 se efectuaron 25 pruebas de bombeo en las cuencas del río Imperial y Toltén. El objetivo de estas pruebas fue determinar parámetros hidráulicos del acuífero, para apoyar la construcción y calibración del modelo numérico. La Figura 7-4 muestra la ubicación de los pozos donde se realizó las pruebas de bombeo, lo que permite tener una idea de su distribución espacial.

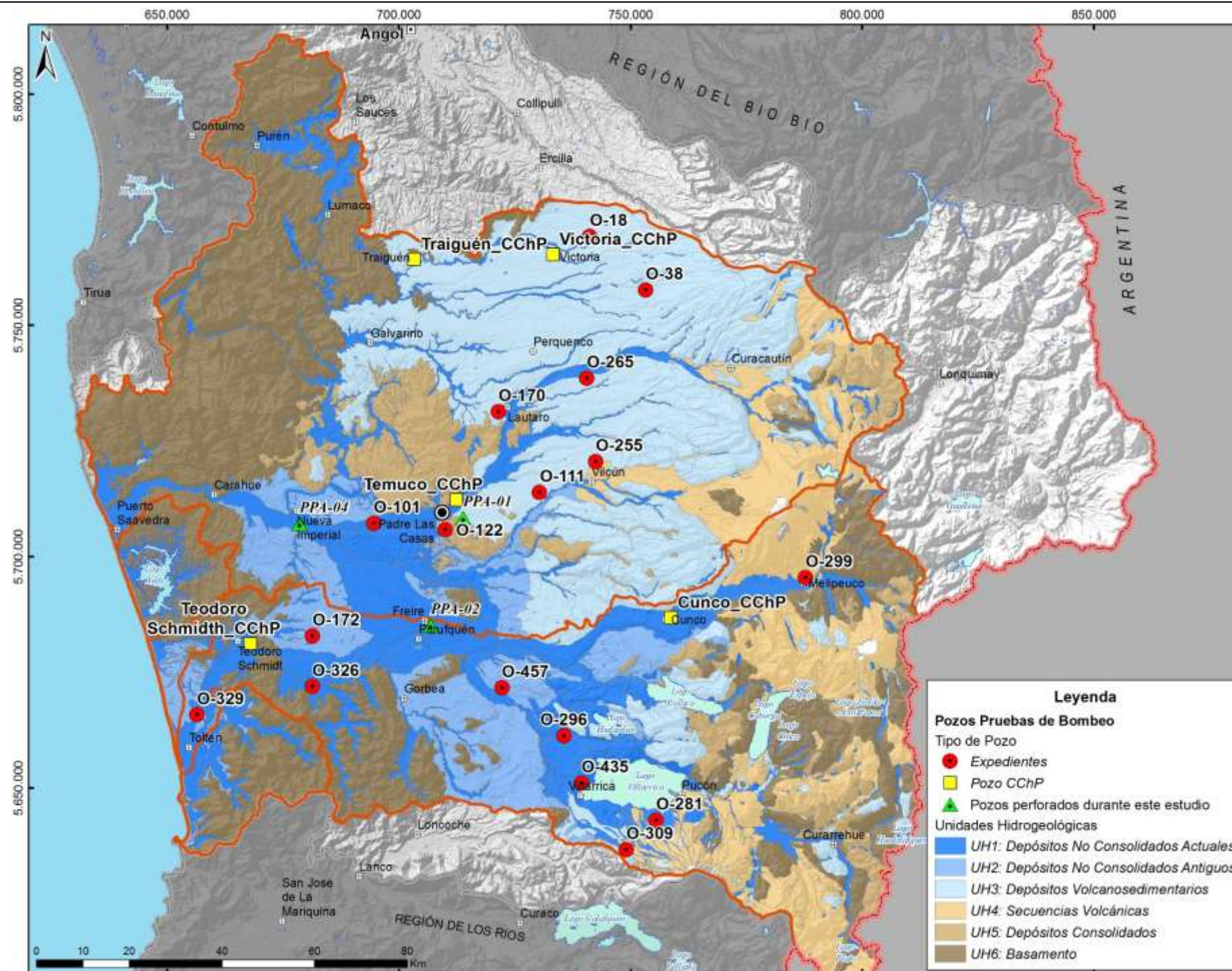


Figura 7-4: Ubicación de pozos con pruebas de bombeo efectuadas para este estudio

---

## 8 CONCEPTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Se presenta la conceptualización hidrogeológica del área de estudio, la que incluye la definición de unidades hidrogeológicas, la caracterización de las propiedades hidráulicas y de la hidroquímica de los acuíferos, el análisis de los niveles de la napa subterránea, los modelación de la geometría acuífera 3D, entre otros aspectos.

### 8.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Las unidades geológicas reconocidas en las cuencas en estudio, se pueden agrupar en seis unidades hidrogeológicas (UH). La Figura 8-1 presenta el mapa hidrogeológico con la distribución y ubicación de estas unidades, las que se describen a continuación.

**Depósitos No Consolidados Actuales (UH 1):** Agrupa a todos los depósitos no consolidados que abarcan desde el Pleistoceno Superior al Holoceno. Esta unidad presenta diferentes orígenes, que abarcan desde depósitos morrénicos y glaciofluviales de la glaciación Llanquihue (Plm1, Plgf1), Fluviales antiguos y actuales (Hfa y Hf), Laháricos históricos y actuales (Hlh), Remoción en masa (Hrm), Coluviales (Hc), Aluviales y deltaicos (Hal), de playas lacustres, eólicos y litorales (Hep).

Presenta un espesor variable, desarrollándose principalmente en los valles y en los cauces de ríos y faldas de cerros. Corresponde al acuífero principal reconocido en el área a estudio, dado el carácter no consolidado de estos depósitos que ocupan las actuales superficies de erosión.

**Depósitos No Consolidados Antiguos (UH 2):** Está formada por depósitos no consolidados a semiconsolidados de origen glaciario y glaciofluvial, con edades que abarcan desde el Pleistoceno Medio a Pleistoceno Superior.

Incluyen los depósitos morrénicos y glaciofluviales de la glaciación Río Llico (Plm3, Plgf3), Santa María (Plm2, Plgf2) y los depósitos fluvioestuarinos (Plfe).

Se caracteriza por depósitos compuestos por gravas y arenas, con diferentes porcentajes de finos en la matriz. Presenta intercalaciones locales de limos y arcillas, lo que podría conferir a esta unidad un carácter de acuífero tipo multicapa. En general, los depósitos morrénicos (Plm2, Plm3) presentan más porcentaje de finos que los depósitos glaciofluviales (Plgf3 y Plgf2).

Esta unidad hidrogeológica ocupa gran parte de la Precordillera y Depresión Intermedia de la cuenca del Río Toltén. Se observa también en el flanco este de la Cordillera de la Costa entre los ríos Imperial y Toltén. Ocupa además gran parte de las cuencas costeras entre río Budi y río Toltén, subyaciendo a la unidad hidrogeológica de Depósitos No Consolidados. Podría alcanzar espesores variables entre 50 y 200 m.

**Depósitos Volcano-sedimentarios (UH 3):** Agrupa depósitos volcanosedimentarios de carácter semi consolidados a consolidados, con edades que comprenden entre el Plioceno-Pleistoceno hasta el Holoceno. Integran esta unidad secuencias volcánicas de la Formación Malleco/Curarrehue (PPlm) constituida por una alternancia de brechas volcánicas gruesas, conglomerados de origen lahárico, tobas ignimbríticas y lavas de composición basáltica, andesítica a dacíticas.

Incluye depósitos del Abanico Volcanoclástico de Muco (PPI<sub>mu</sub>), consistente en depósitos fluviales y flujos piroclásticos y de lahares, semiconsolidados. Por último, la integran además depósitos piroclásticos posglaciales, de flujo y caída con escasas intercalaciones de lavas, de la unidad geológica depósitos piroclásticos posglaciales (PIH<sub>dp</sub>).

Superficialmente ocupa gran parte de la depresión intermedia y precordillera de la cuenca del río Imperial y afloramientos aislados en la precordillera y cordillera de la cuenca del río Toltén. Esta unidad puede alcanzar profundidades del orden de 300-400 m y puede corresponder a la actual superficie de erosión o subyacer a la unidad hidrogeológica Depósitos No Consolidados Antiguos.

**Secuencias Volcánicas (UH 4):** Está formada por lavas con intercalaciones de rocas volcanoclásticas, pertenecientes al período comprendido entre el Pleistoceno Inferior y Holoceno (Pl<sub>v</sub> y Hv). Corresponde a los depósitos de los principales volcanes del área de estudio (principalmente, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica, Quetrupillán y Sollipulli).

La estratigrafía de captaciones de aguas subterráneas ubicados en esta unidad describen litologías de tipo ripio y arenas volcánicas limpias o con distintas proporciones de arcilla. En ocasiones se describen niveles de lavas intercaladas, sin embargo, en su mayor parte esta unidad corresponde a rocas.

**Depósitos Consolidados (UH 5):** Se agrupan dentro de esta unidad depósitos consolidados y antiguos que abarcan desde el Triásico hasta el Pleistoceno. Está formada por rocas sedimentarias antiguas de las formaciones Llafquentué-Huimpil (Tr) y Nacientes del Biobío (Jnb (Ip)); tobas, brechas volcánicas y lavas andesíticas del Complejo Viscacha-Cumilao/Estratos de Relicura (KT<sub>vc</sub>); conglomerados y depósitos volcanoclásticos de la Formación Temuco (EM<sub>t</sub>); depósitos sedimentarios y volcánicos de la Formación Pilmahue (OM<sub>p</sub>); tobas, areniscas, brechas volcánicas y lavas andesíticas de la Formación Curamallín (OM<sub>cm</sub>); areniscas y lutitas fosilíferas marinas de los Estratos de Huinchahue y Formación Cholchol (Mch) y Conglomerados Raluncoyén y Paillal (PPI).

Superficialmente estas unidades afloran principalmente en el centro de la cuenca del río Imperial y en afloramientos aislados de la Cordillera de los Andes. Estos sedimentos conforman los primeros depósitos de las cuencas en estudio que sobreyacen la unidad de basamento e infrayacen a las unidades UH-2, UH-3 y UH-4.

Subsuperficialmente, esta unidad podría alcanzar espesores máximos de más de 1.000 m en el sector de los Cerros de Ñielol, tal como se observa en el perfil hidrogeológico A-A', y espesores del orden de 300-400 m, en la mitad noroeste del perfil B-B' en la cuenca del río Toltén (Figura 8-1).

**Basamento (UH 6):** Esta unidad hidrogeológica está formada principalmente por los Complejos Metamórficos del Paleozoico Serie Oriental (Pz<sub>4b</sub>) y Bahía Mansa (Pz<sub>Trbm</sub>) y el Batolito Costero del Sur (Pzg) que conforman la Cordillera de la Costa. Esta unidad integra además, todos los cuerpos plutónicos de edades Jurásico Superior-Cretácico (Kg), Eoceno (Egc) y Mioceno (Mg).

Su extensión superficial abarca el macizo metamórfico de la Cordillera de la Costa, mientras que en la Cordillera de los Andes, aflora mayormente en la cuenca del río Toltén, como extensos cuerpos intrusivos. En subsuperficie, se estima que alcanza

profundidades mayores a los 1.000 m, según lo registrado en pozos profundos en los alrededores de Temuco.

La litología asociada a las unidades geológicas que lo componen (rocas de origen metamórfico e intrusivo) típicamente tiene baja a muy baja conductividad hidráulica. Si bien no se cuenta con análisis de pruebas de bombeo en esta unidad, se estima una permeabilidad menor a  $10^{-5}$  m/d (Domenico y Schwartz, 1998). Sin embargo, estas unidades en algunos sectores podrían tener una mayor permeabilidad, localmente, en un medio fracturado (0,001 a 25 m/d, Domenico y Schwartz, 1998).

## 8.2 PROPIEDADES HIDRÁULICAS

El estudio de las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, a saber Transmisividad (T), Conductividad hidráulica (K) y Coeficiente de almacenamiento (S), se realizó en base a 75 pruebas de bombeo obtenidas de expedientes DGA y 25 pruebas de bombeo realizadas, en el marco este estudio, en pozos existentes. Los análisis de cada prueba de bombeo se presentan en el cuerpo principal del informe. La Tabla 8-1 y la Tabla 8-2 resumen los resultados obtenidos.

Los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de las pruebas analizadas fueron asignados a las unidades hidrogeológicas definidas. Las unidades UH1, UH2 y UH3 son las que presentan mayor cantidad de datos de pruebas de bombeo. La Figura 8-2 muestra la distribución espacial de conductividad en el área de estudio. Los rangos son prácticamente los mismos para las unidades UH-2 y UH-3, mientras que la UH-1 presenta valores mayores de conductividad hidráulica que las otras dos unidades.

Tabla 8-1: Propiedades Hidráulicas para pozos en la cuenca del río Imperial

Unidades	datos	T (m <sup>2</sup> /d)			K (m/d)			q (L/s/m)		
		Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio
UH-1	21	6,28	7905,60	842,66	0,09	309,17	27,87	0,29	73,97	8,34
UH-2	1	101,19	101,19	101,19	2,26	2,26	2,26	0,77	0,77	0,77
UH-3	24	0,10	5002,78	353,56	0,06	50,53	6,11	0,05	12,92	2,33
UH-4	2	32,02	164,99	98,50	0,39	3,53	1,96	0,45	0,75	0,60
UH-5	2	12,46	74,41	43,43	0,26	0,74	0,50	0,19	0,63	0,41
UH-6	1	59,59	59,59	59,59	1,42	1,42	1,42	0,95	0,95	0,95

Tabla 8-2: Propiedades Hidráulicas para pozos en la cuenca del río Toltén

Unidades	datos	T (m <sup>2</sup> /d)			K (m/d)			q (L/s/m)		
		Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio
UH-1	24	10,95	3845,63	721,68	0,19	99,24	21,40	0,17	53,19	7,04
UH-2	15	29,11	1270,51	369,58	0,46	52,62	10,61	0,42	18,29	3,99
UH-3	1	12,65	12,65	12,65	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
UH-4	3	158,11	3870,75	1436,58	2,52	146,07	50,89	0,88	105,26	27,55

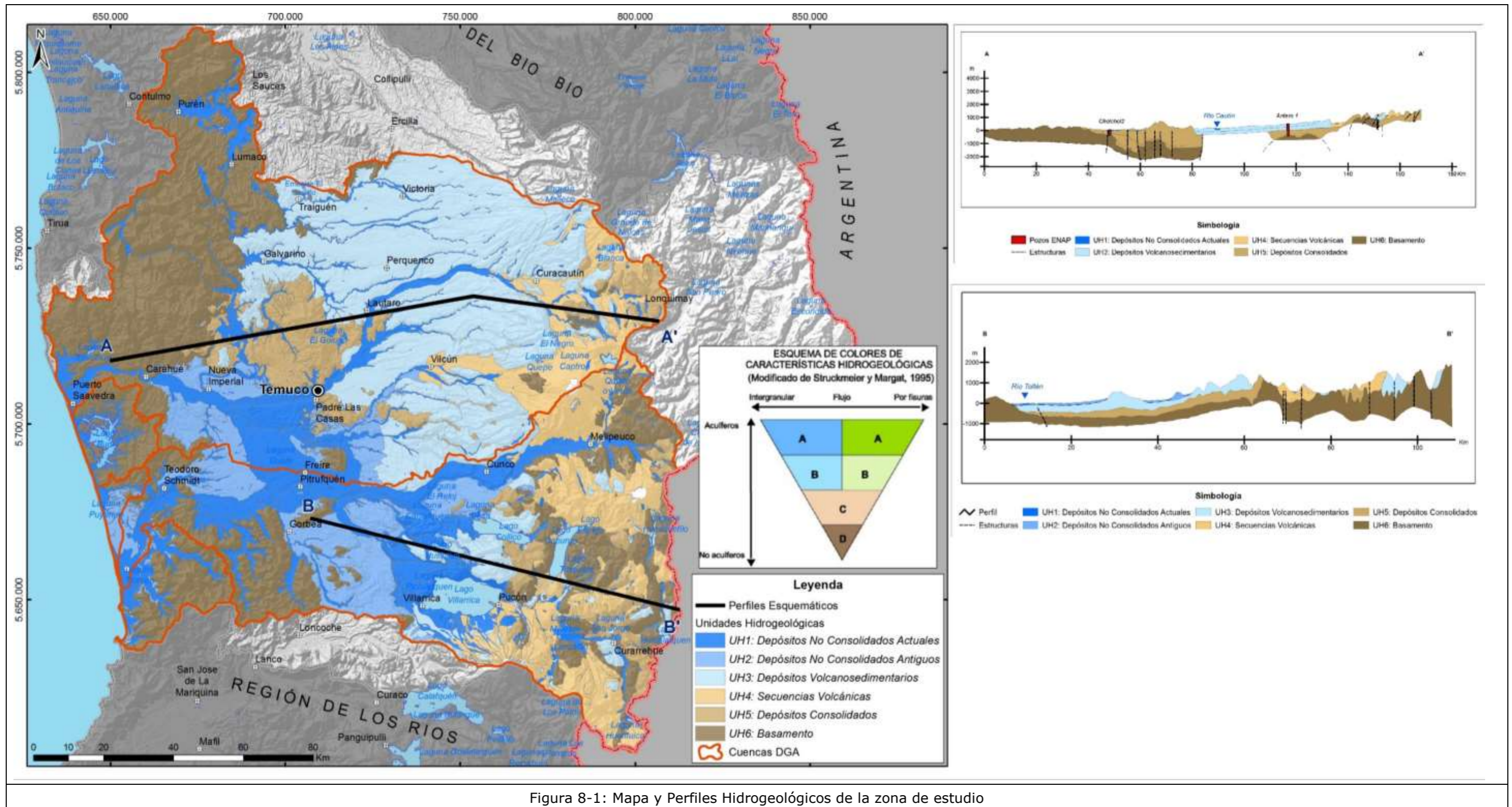


Figura 8-1: Mapa y Perfiles Hidrogeológicos de la zona de estudio

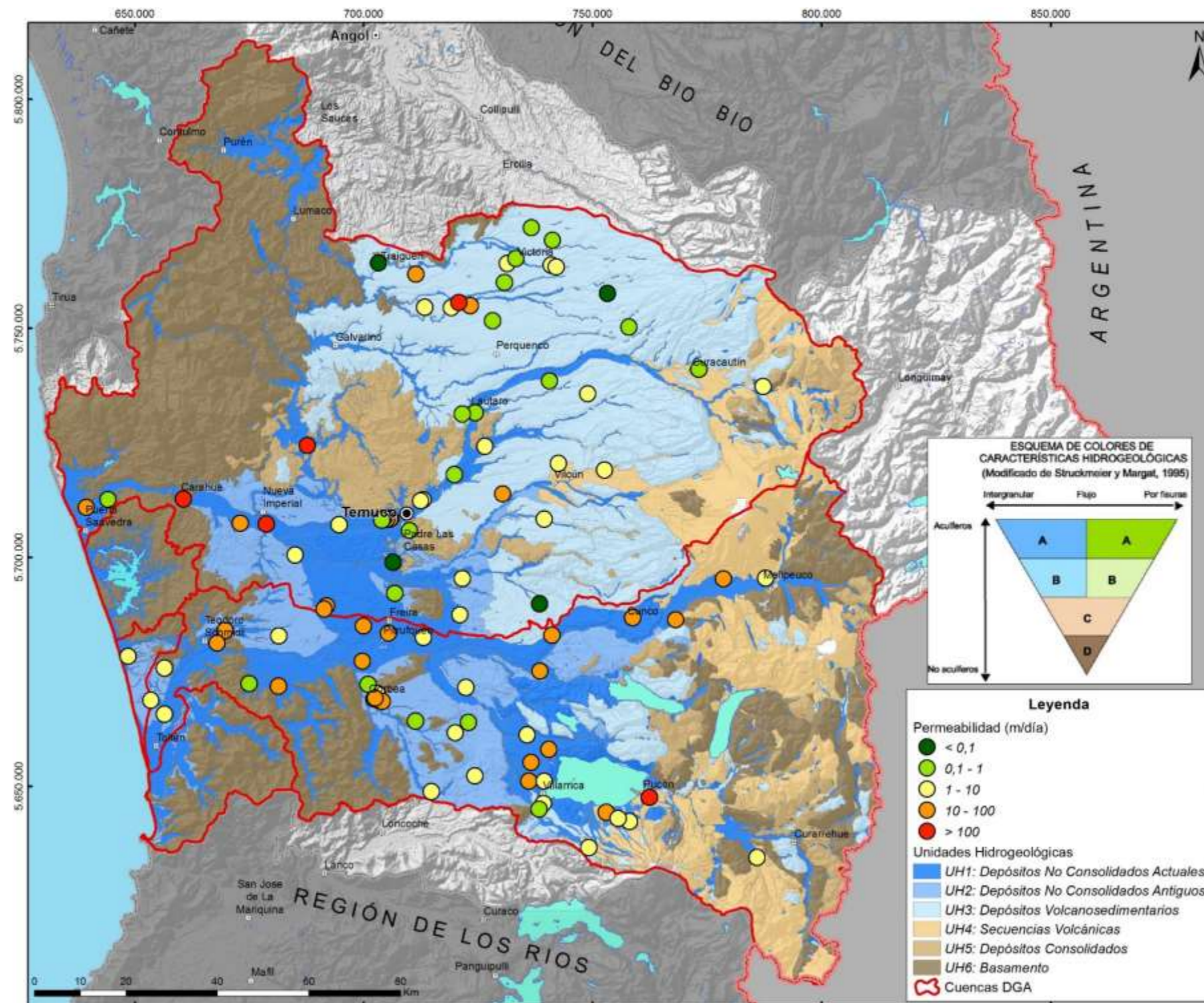


Figura 8-2: Distribución espacial de la permeabilidad en el área de estudio

### 8.3 NIVELES Y PIEZOMETRÍA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Se llevó a cabo el catastro de 2.569 captaciones de aguas subterráneas (pozos y norias) en toda el área. De todas estas, en 1.813 captaciones se obtuvieron medidas de nivel estático o dinámico. Para el análisis de niveles se excluyeron pozos con mediciones de nivel dinámico, y aquellos que se ubicaron en roca, lo que da un total de 1.557 captaciones con medidas válidas para el análisis. Para analizar la información, se separó la base de datos en niveles de captaciones someras (norias y pozos con profundidades menores a 20 m) y de captaciones profundas (pozos con profundidades mayores a 20 m). De acuerdo a esta subdivisión se confeccionaron 2 mapas piezométricos, sugiriendo la existencia de al menos dos acuíferos a nivel regional, uno somero y otro profundo, localmente con distintos niveles de presión. Para estimar la cota topográfica de los puntos catastrados, se utilizó como referencia la elevación entregada por una imagen STRM, de 90 m de resolución.

**Pozos Profundos:** Se dispone de 159 captaciones con más de 20 m de profundidad. La Figura 8-3 muestra la superficie piezométrica estimada para los pozos profundos del área de estudio. Se observa un flujo general hacia el oeste, en dirección al mar, en que la mayor parte de los ríos reciben agua desde el acuífero. En el centro de la cuenca del río Imperial, se observa un flujo en dirección norte, donde parte de la recarga producida en los cerros de Ñielol, alimenta al estero Perquenco. El río Cautín muestra zonas en que no hay interacción río-acuífero, y otras zonas, donde el acuífero aporta agua al río. Estos últimos sectores corresponden a: 1) la parte alta del río Cautín, 2) desde Lautaro hasta Temuco, y 3) desde el oeste de Temuco hasta Nueva Imperial. El río Imperial continúa recibiendo aportes desde el acuífero, hasta antes de su cruce de la Cordillera de la Costa.

Uno de los rasgos más notables de la Figura 8-3 es la interacción que se produce entre la cuenca del río Toltén y la cuenca del río Imperial, en que existe un flujo entrante desde Toltén al Imperial, y luego uno saliente desde Imperial al Toltén. El río Toltén recibe aportes desde el acuífero desde su nacimiento en el lago Villarrica hasta su confluencia con el río Allipén. Aguas abajo, en la ribera sur del río se produce la entrada de agua desde el acuífero al río, mientras que en su ribera norte se produce la salida de agua hacia el acuífero. Parte de este flujo saliente del río toma dirección a la cuenca vecina del río Imperial. Este comportamiento se observa hasta antes de que el río Toltén cruce la cordillera, en donde el río ahora recibe aportes desde el acuífero en sus dos riberas, hasta su desembocadura al mar.

**Pozos Someros.** Se dispone de 1.398 captaciones que presentan menos de 20 m de profundidad. La Figura 8-4 muestra la superficie piezométrica realizada para los pozos someros del área de estudio. Al igual que lo observado en la piezometría de los pozos profundos, el flujo general del agua subterránea es hacia el oeste y además las aguas superficiales reciben aportes desde el acuífero. Importante destacar que la forma de las isopiezas es similar a las curvas topográficas, dado que la mitad de las captaciones presentan profundidades menores a 5 m. La Figura 8-4 no muestra la interacción entre las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, tal como fue observada en los pozos profundos.

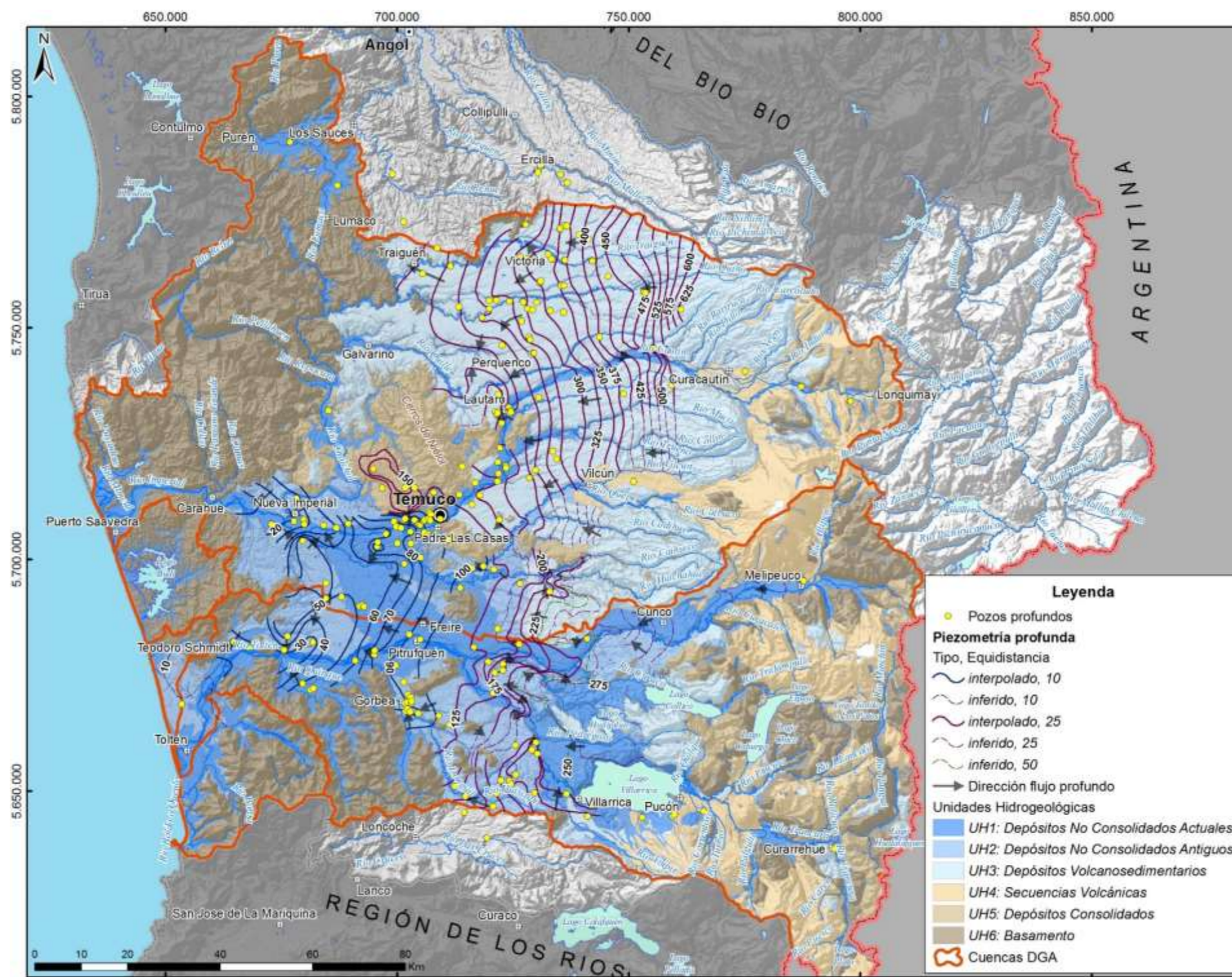


Figura 8-3: Superficie piezométrica para pozos Profundos

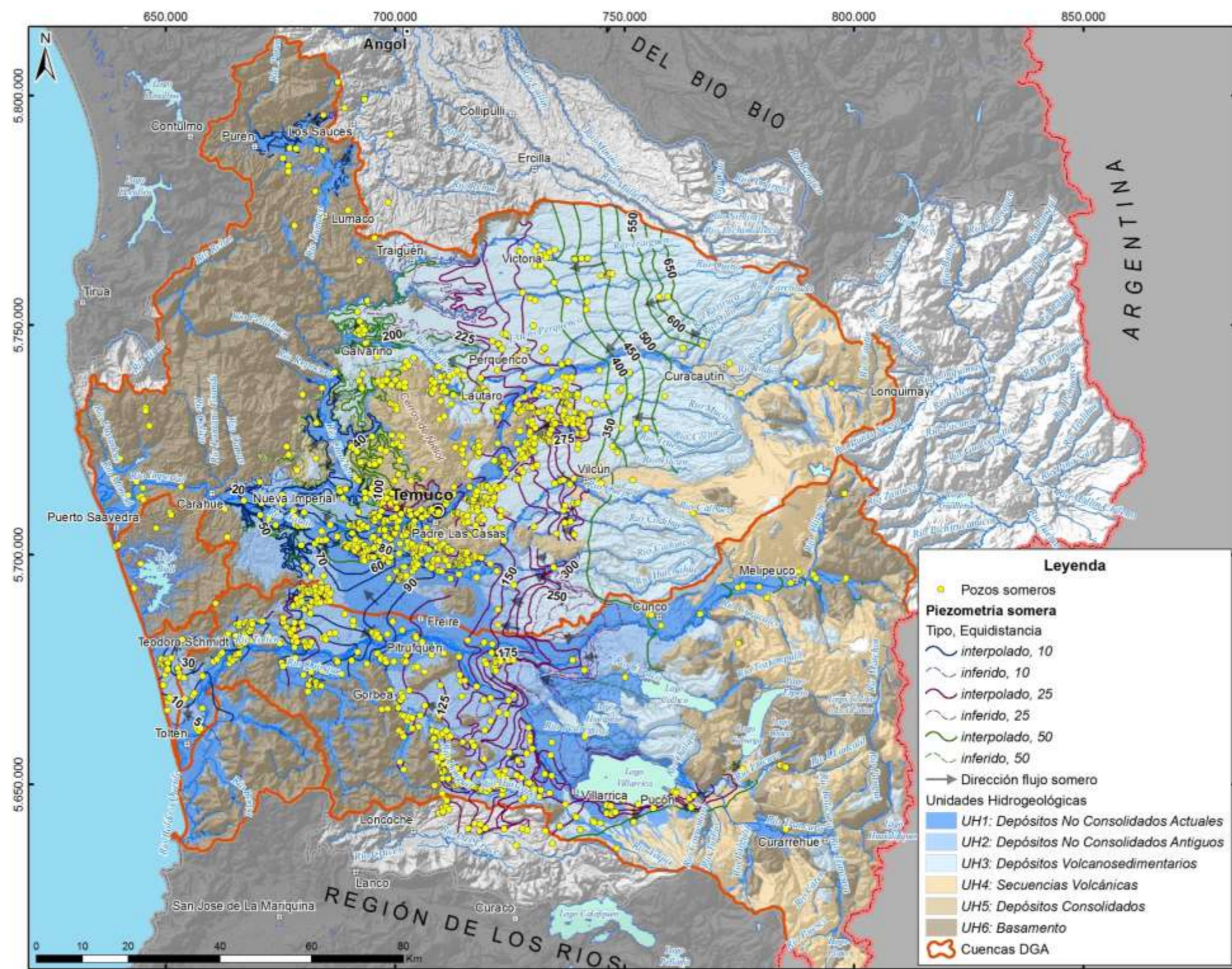
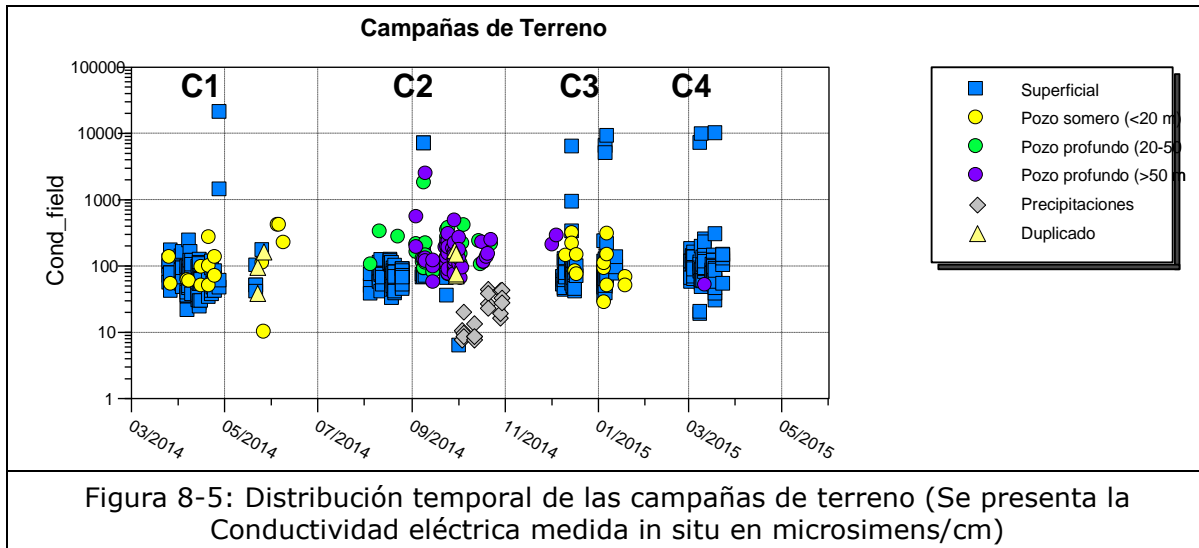


Figura 8-4: Superficie piezométrica para pozos Someros

## 8.4 HIDROQUÍMICA

Se presenta los principales resultados obtenidos en las cuatro campañas hidroquímicas realizadas durante el año 2014 y parte del 2015 (campaña 1: marzo – junio 2014; campaña 2: agosto- octubre 2014; campaña 3: diciembre 2014– enero 2015; campaña 4: marzo 2015), de modo de cubrir un ciclo hidrológico anual (Figura 8-5). Se realizó un muestreo de aguas superficiales, subterráneas y de precipitaciones. Los puntos de muestreo de aguas subterráneas fueron seleccionados según la profundidad del pozo, considerando pozos someros (< 20 m) y pozos profundos (> 20 m). Los pozos profundos se dividieron a su vez entre aquellos que tienen menos y más de 50 m.



Los análisis realizados en los distintos puntos corresponden a datos hidroquímicos e isotópicos. Se utilizaron los mismos puntos de muestreo de aguas superficiales en las cuatro campañas. Los pozos someros de la campaña 1 se volvieron a muestrear en la campaña 3 siempre que fue posible. Los pozos profundos sólo se muestrearon en la campaña 2.

La Tabla 8-3 sintetiza la información de muestras tomadas en cada campaña, según el tipo de punto de muestreo y el tipo de muestra, en este caso HQ (hidroquímica) e isótopos. En total se recolectaron 512 muestras para análisis hidroquímico, isotópico y muestras de cloruro durante las cuatro campañas de muestreo.

La Figura 8-6 presenta ubicación de las muestras tomadas en las cuatro campañas, que consisten en 369 muestras de aguas superficiales, 31 de pozos someros y 86 de pozos profundos. Se tomaron 7 muestras de duplicados y se analizaron las concentraciones de Cl en 19 muestras de precipitaciones.

Se tomó muestras para análisis isotópicos en aguas superficiales en 74 punto, cuya ubicación se presenta en la Figura 8-7. En pozos someros no se tomaron muestras de isótopos, mientras que en los pozos profundos se tomaron en 43 puntos para análisis isotópicos. Además se tomaron muestras para isótopos en 19 estaciones de precipitaciones.

Los resultados muestran que la composición química de las aguas superficiales y subterráneas de las cuencas estudiadas corresponde en su mayoría a aguas frescas del

tipo bicarbonatado intermedio. En las aguas superficiales se distingue un claro aumento de la salinidad y una tendencia clorurada sódica en las aguas del sector costero, que afecta también a las aguas subterráneas someras, pero de manera más sutil.

Tabla 8-3: Cantidad y tipo de muestras tomadas en cada campaña

Tipo de punto de muestreo	Tipo de análisis	Campañas de muestreo				Nº muestras por tipo de punto de muestreo
		C1	C2	C3	C4	
Superficiales	HQ	98	90	91	90	369
	isótopos	0	32	0	42	74
Pozos someros	HQ	16	0	15	0	31
	isótopos	0	0	0	0	0
Pozos profundos	HQ	0	86	0	0	86
	isótopos	0	43	0	0	43
Precipitaciones	Cl	0	19	0	0	19
	isótopos	0	19	0	0	19
Duplicados	HQ	3	4	0	0	7
	HQ	117	180	106	90	493
Total por campaña	isótopos	0	94	0	42	136
	Cl	0	19	0	0	19

En el interior de la región, no se aprecian diferencias importantes en la composición de las aguas, siendo éstas también bicarbonatadas intermedias con pequeñas variaciones en las proporciones de Ca y Na, sin reflejar cambios composicionales asociados a litología ni a unidades geomorfológicas. En cuanto a factores antrópicos, estos sí podrían influir en leves cambios de concentración que se observan aguas abajo de centros poblados como Temuco principalmente, y en menor medida en los sectores de Victoria, Traiguén y Freire.

Por su parte, las aguas subterráneas profundas presentan un leve aumento en la concentración de iones, especialmente bicarbonato. En los cationes mantienen generalmente una composición intermedia. La composición de las aguas subterráneas entre 20 y 50 m, comparadas con las obtenidas en pozos de más de 50 m, son de composición similar y representarían un mismo sistema acuífero. Las aguas de este acuífero se mantienen con una composición homogénea a nivel regional, y sólo parecen estar sujetas a cambios composicionales de origen antrópico en los sectores de Temuco y Victoria.

En general, en las aguas subterráneas de pozos profundos se aprecia un aumento en la concentración de iones que se atribuye a la interacción agua-roca. Adicionalmente la mayor proporción de bicarbonato de las aguas subterráneas respecto a las superficiales, se atribuye a la disolución de CO<sub>2</sub> del suelo. Además, se observa una buena correlación entre el Ca y el HCO<sub>3</sub> en el acuífero, de lo que se infiere que una parte de estos iones podría estar asociada a la disolución de carbonato de calcio.

En cuanto a la calidad de las aguas, según las normas para agua potable y agua de riego, las concentraciones de los distintos analitos se ubican dentro del rango permitido con la excepción de Fe y en menor medida Mn. También se observa valores de Coliformes Fecales y Coliformes Totales excedidos en distintos puntos distribuidos en toda el área de estudio, probablemente asociado a la actividad ganadera y a los centros poblados.

Utilizando la concentración de cloruros en las aguas se realizó una estimación de la recarga, obteniendo rangos según la permeabilidad de cada tipo de unidad, resultando como promedio una tasa de recarga estimada entre 2 y 7% de la precipitación, lo que es consistente con el valor estimado en el modelo hidrológico. Además se concluye que la recarga ocurre tanto localmente como en zonas más elevadas, debido a la correlación de isotopos  $\delta^{18}O$  y el  $\delta^2H$  (‰) con la altura.

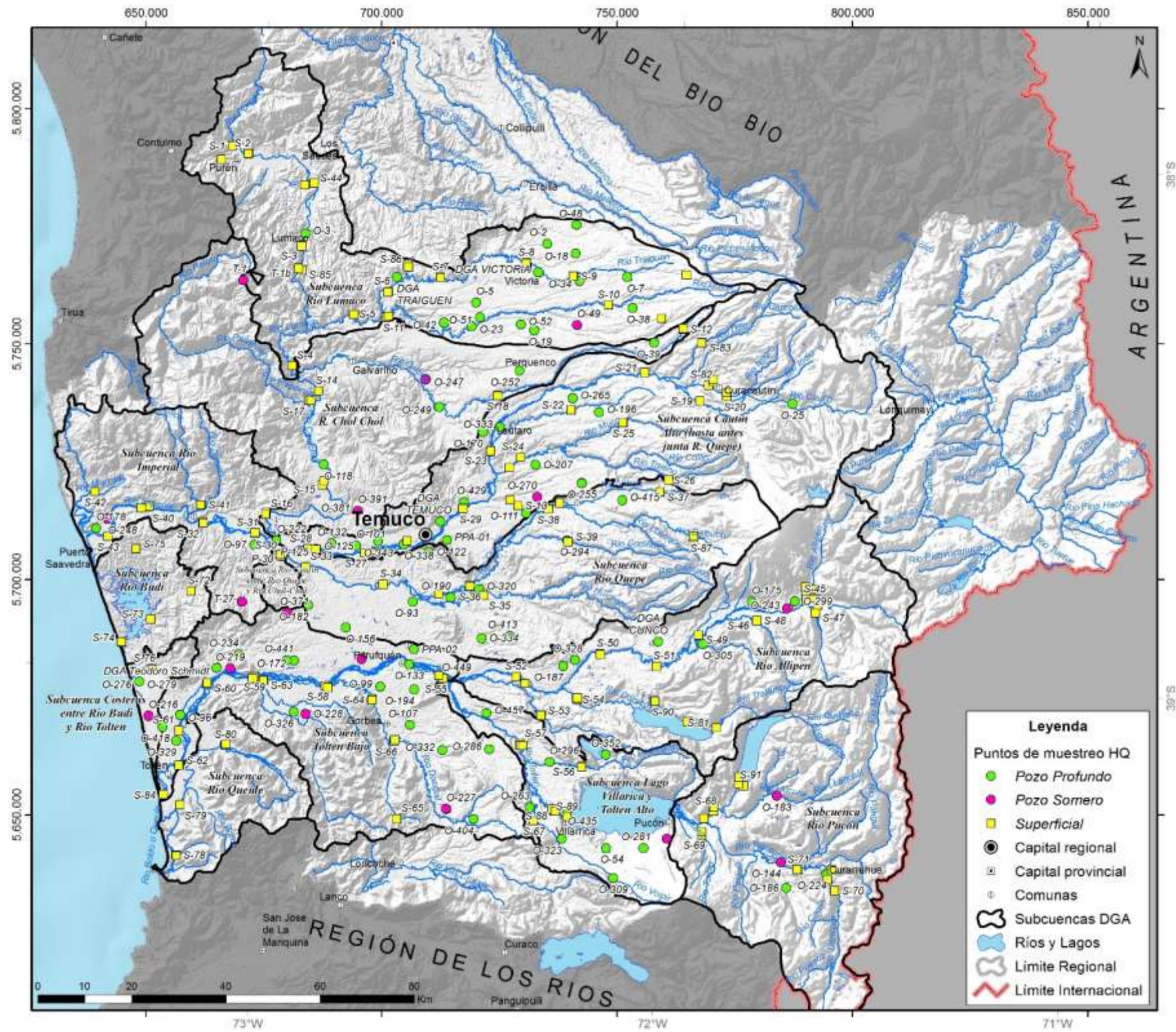


Figura 8-6: Mapa con puntos de muestreo hidroquímico

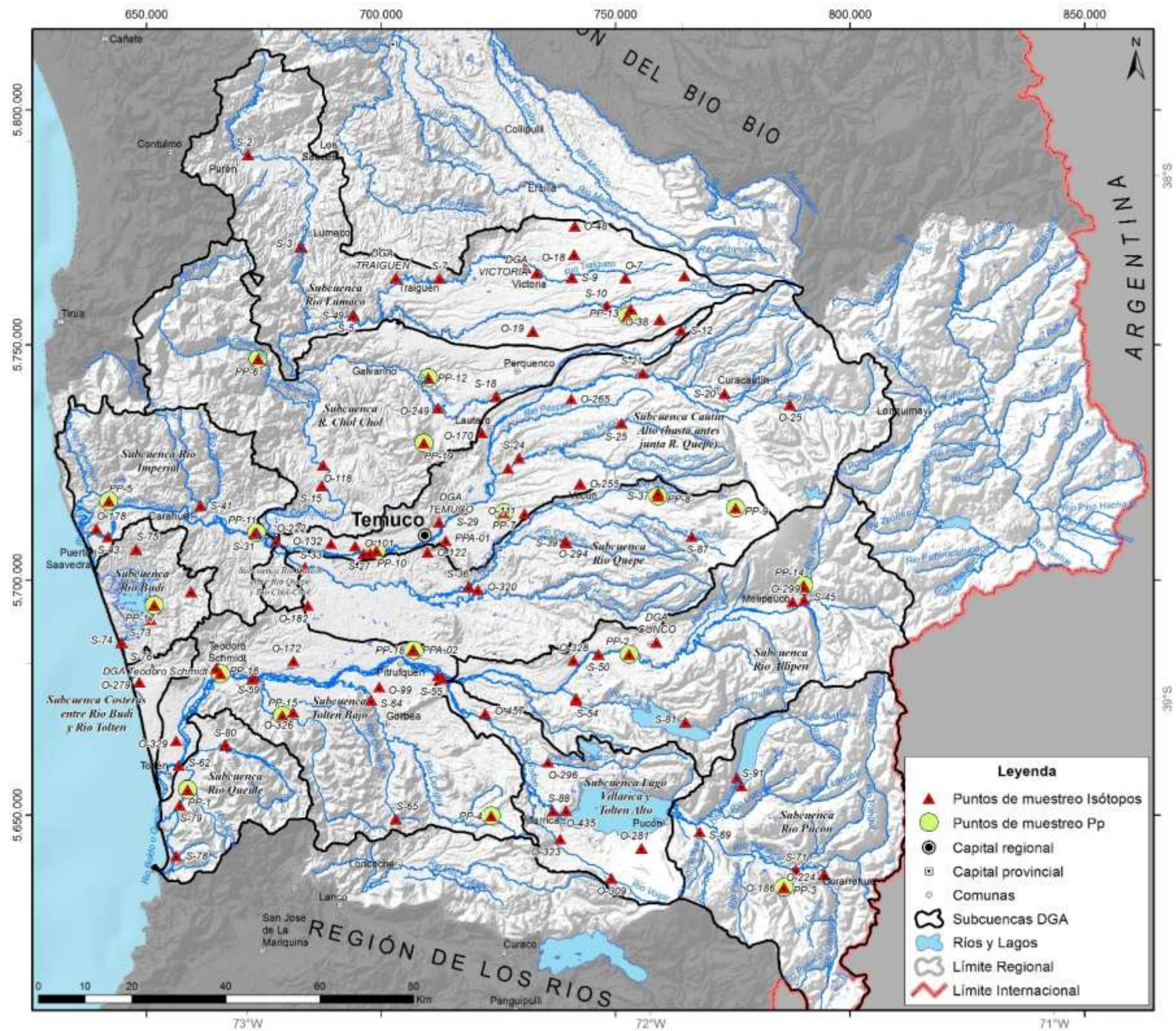


Figura 8-7: Mapa con puntos de muestreo isotópico

## **8.5 CONCEPTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA**

Se realizó una conceptualización hidrogeológica del área de estudio, basada en las descripciones geológicas tanto de superficie, como de subsuperficie, presentadas en los acápite precedentes. La conceptualización incluye una descripción de las unidades hidrogeológicas considerando su litología. De forma adicional, se construyó un modelo hidrogeológico en 3D en base a la geología e subsuperficie como de las campañas geofísicas (TEM y gravimetría). En este mismo sentido, se conceptualizó la piezometría del área de estudio para captaciones someras (menor a 20 m de profundidad) y profundas (mayor a 20 m de profundidad) y se realizó una síntesis de las propiedades hidráulicas de cada unidad en base al análisis de pruebas de bombeo.

Las unidades geológicas reconocidas en las cuencas en estudio, se pueden agrupar en seis Unidades Hidrogeológicas (UH) principales, según sus propiedades hidrogeológicas. Estas unidades son: Basamento e Intrusivos (UH6), Depósitos Consolidados (UH5), Rocas Volcánicas (UH4), Secuencias Volcanosedimentarias (UH3), Depósitos no consolidados antiguos (UH2) y Depósitos no consolidados Actuales (UH1) (Figura 8-8 y Figura 8-9). Los perfiles representados en la Figura 8-9 muestran de forma esquemática la geometría en subsuperficie de estas UH, para las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, respectivamente.

## **8.6 MODELO HIDROGEOLÓGICO 3D**

El objetivo del modelo hidrogeológico 3D es obtener la geometría del sistema acuífero regional que sustenta al modelo numérico que describe su funcionamiento. Por esto razón se privilegió realizar un trabajo de detalle en la zona central de la cuenca de los ríos Imperial y Toltén (zona activa del modelo numérico), mientras que hacia los márgenes (zonas inactivas o fuera del modelo numérico) se realizó un análisis más grueso.

El modelo hidrogeológico en 3D se implementó en el software Leapfrog Hydro, en base las unidades hidrogeológicas ya definidas y fundamentalmente apoyado en la información estratigrafía de pozos. Esta se complementó con la gravimetría y TEM, con la finalidad de caracterizar de mejor manera la geometría en profundidad de las unidades hidrogeológicas definidas. La Figura 7-2 muestra los perfiles de se usaron e interpretaron para definir las geometrías de las unidades hidrogeológicas.

Las geometrías de las seis unidades hidrogeológicas definidas fueron construidas mediante interpolaciones realizadas con la información primaria y secundaria disponible (Figura 8-8). La mayoría de los pozos disponibles son poco profundos, lo que no permite precisar el contacto entre unidades.

La geometría de la UH6, que representa al basamento hidrogeológico, fue construida realizando interpolaciones entre la información gravimétrica, que estima la profundidad del basamento, y la información de contactos geológicos superficiales de esta unidad. La máxima profundidad que se observa la UH6 es aproximadamente -1500 mbnm (metros bajo el nivel del mar), en la zona de la depresión central, elevándose hacia las cordilleras de los Andes y de la Costa, lugares donde la UH6 aflora en superficie.

Sobre el basamento se localiza la UH5, que corresponde a los depósitos consolidados indiferenciados. Al igual que para la UH6, hay muy pocos pozos perforados en esta

unidad, por lo que no es posible determinar su extensión con exactitud, ni determinar el contacto entre esta unidad y el relleno que la sobreyace.

La UH4, que representa a las secuencias volcánicas, limita su extensión al sector oriental de la zona de estudio. Esta unidad se deposita sobre UH5 y UH6, y subyace en partes a las unidades UH3 y UH2. Su potencia máxima, de aproximadamente 1600 m, coincide con la ubicación de los principales volcanes de la zona de estudio. En general, las tres unidades mencionadas, UH4, UH5 y UH6, presentan una baja permeabilidad primaria, y pueden considerarse en su conjunto como el basamento hidrogeológico del sistema acuífero a nivel regional.

Los depósitos volcanosedimentarios, agrupados en la UH3, se extienden principalmente en la zona nororiental del área de estudio (cuenca del Río Imperial), donde afloran en superficie sobreyaciendo principalmente a la UH5. También se localizan en la cuenca del Río Toltén, depositados sobre la UH5 y subyaciendo a los depósitos no consolidados de la UH2.

La geometría de esta unidad en profundidad se obtuvo mediante el análisis de pozos perforados en ella, y de los perfiles TEM descritos anteriormente. La UH2, depósitos no consolidados antiguos, se dispone sobreyaciendo a UH3 y UH5, en el sector suroccidental de la zona de estudio (cuenca del Río Toltén). Al igual que UH3, esta unidad fue reconocida tanto en pozos como en perfiles TEM. Finalmente, los depósitos no consolidados actuales, agrupados en la UH1, se disponen en toda el área de estudio, principalmente en los cauces fluviales actuales y en el centro de la cuenca del río Toltén. La potencia máxima de éstos es cercana a los 100 m en la zona media de la cuenca del Río Toltén.

En virtud de la información hidráulica analizada, sumado a la descripción de las unidades hidrogeológicas definidas, es posible reconocer similitudes en los comportamientos hidráulicos de dos o más unidades. Por ejemplo, al menos estadísticamente, la unidad UH2 y UH3 presentan un patrón similar en cuanto a su conductividad hidráulica. Además, la imposibilidad de definir con claridad en profundidad los contactos entre ellas, sumado a su similitud granulométrica, permite la unión de estas dos unidades.

Esto implica que las 6 unidades hidrogeológicas definidas en la modelo conceptual, se reducen a 3 capas para efectos de la modelación numérica. Además, al tratarse de un modelo a escala regional, el agrupamiento y simplificación de unidades hidrogeológicas es la mejor opción considerando la cantidad de información hidráulica con que se cuenta.

La Figura 8-9 resume entonces las unidades hidrogeológicas que se modelarán numéricamente.

Por otro lado, el análisis de los niveles estáticos del agua subterránea sugiere la existencia de dos superficies piezométricas, una somera y otra profunda. Esto podría deberse a la existencia de capas de menor conductividad hidráulica que permita el confinamiento o semiconfinamiento del agua subterránea en algunos sectores de la región.

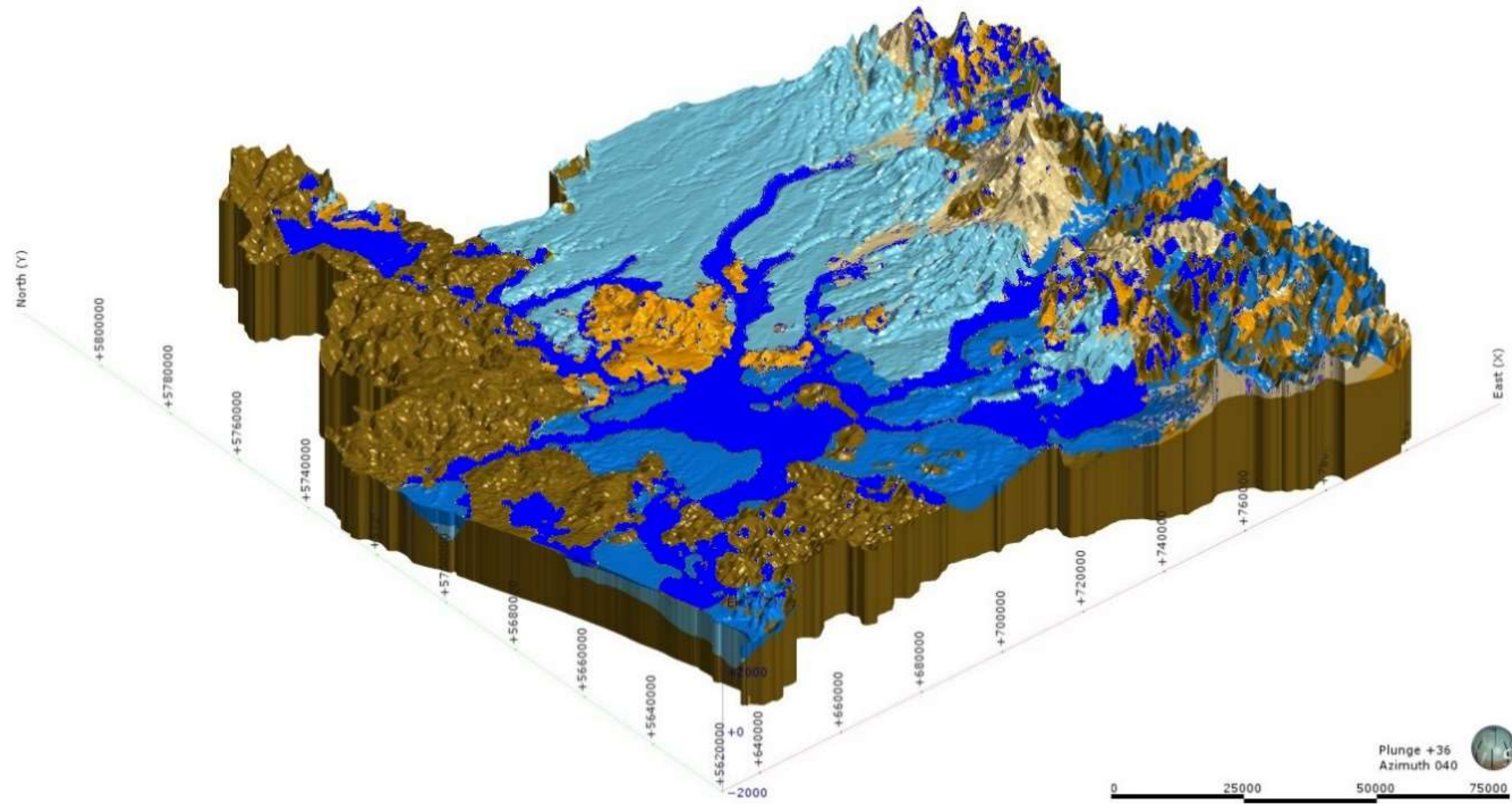


Figura 8-8: Modelo hidrogeológico 3D de la zona de estudio



## 8.7 RED DE MONITOREO PROPUESTA

A la fecha, la DGA cuenta en la región con 7 pozos de monitoreo construidos en los sectores de Angol, Victoria, Traiguén, Temuco, Cunco, Teodoro Schmidt y Lonoche. De estos, sólo 5 se ubican en el área específica de este estudio (Victoria, Traiguén, Temuco, Cunco y Teodoro Schmidt).

Adicionalmente, en el marco del presente estudio, se perforaron 3 nuevos pozos en la región, denominados como PPA-01, PPA-02 y PPA-04, emplazados en las localidades de Padre las Casas, Freire y Nueva Imperial, los que se suman a los pozos disponibles dentro de la red de monitoreo de la DGA, completando así un total de 8 pozos en el área de estudio y 10 en la región.

Considerando lo anterior, se definió 10 nuevos sectores que permitirán complementar la cobertura actual de monitoreo de niveles y calidad de aguas en la región. Estos sectores se orientan a disponer de información de los acuíferos más profundos, tanto en sectores de cabeceras de cuencas, cierres o salidas de las mismas, que no cuentan con registros tanto de niveles como de calidad de aguas. Asimismo, se proponen otros sectores, emplazados en partes medias de las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, pero que se consideran de interés debido a su cercanía con centros poblados. Los puntos propuestos se presentan en la Figura 8-10.

Respecto a las características de los sondajes, se propone una profundidad de perforación de 80 metros, con un diámetro mínimo de 10"-12" y una habilitación de 6"-8", de forma tal que sea posible utilizar bombas de pequeño diámetro para pruebas y/o toma de muestras de agua.

Asimismo, se considera prudente una longitud de tramo con sistema captante de 20 metros como mínimo, cuya ubicación definitiva se debe definir de acuerdo a la estratigrafía. Dentro de las características de los pozos, se propone una habilitación con cañerías de acero carbono y cribas de acero inoxidable, considerando una construcción de sello sanitario y brocal de hormigón entre la superficie y los 5 metros de profundidad.

En cada uno de estos sectores se propone, además, la perforación de piezómetros de observación de 4" de diámetro y 20 m de profundidad, los que permitirán además, evaluar la componente somera de los acuíferos y su posible interacción con ríos o cuerpos de agua circundantes.

Respecto a los parámetros críticos considerados para el muestreo hidroquímico, se pueden desglosar según dos criterios.

- Parámetros que contribuyen a la caracterización hidroquímica de las aguas: elementos mayores (Na, Mg, Ca, Cl, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub>) parámetros físico químicos (TDS, pH, alcalinidad) y datos in situ (CE, pH, T<sup>o</sup>, OD).
- Parámetros que influyen en la calidad de las aguas según usos: potable y riego (parámetros considerados por NCh 1333 y para NCh 409).
- Isotopos: la información isotópica obtenida en este informe da cuenta de aguas sin fraccionamiento isotópico en la región, por lo que no se recomienda su inclusión en el plan de monitoreo, salvo en caso de algún evento que modifique la configuración actual del sistema hidrogeológico.

Respecto a la frecuencia de medición de niveles, se propone una frecuencia mensual en el caso de los niveles. En lo que respecta al monitoreo hidroquímico, debido a la

escasa variabilidad estacionaria que arrojaron los resultados durante las distintas campañas, se recomienda un monitoreo semestral.

Considerando las características antes indicadas, se estiman costos de los sondajes y su monitoreo de la siguiente forma:

- Costos perforación de pozos: \$ 590.000.000
- Costo perforación Piezómetros someros: \$ 120.000.000
- Costo muestreo semestral: \$ 4.000.000

Para la valorización de los análisis correspondientes al muestreo semestral, se consideró 81 parámetros.



Figura 8-10: Red de monitoreo propuesta

---

## 9 MODELO NUMÉRICO – CUENCAS RÍO IMPERIAL Y TOLTÉN

Conforme a los objetivos del estudio, se construyó un modelo de flujo que abarca las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, que sirve como herramienta apoyo a la administración y gestión de los recursos hídricos subterráneos en las citadas cuencas.

El modelo numérico se desarrolló en MODFLOW-USG, siendo esta la versión más reciente y potente en términos de capacidades de modelación, empleando Groundwater Vistas 6 como interfaz gráfica de pre- y post- procesamiento. Además se ha empleado el software Groundwater Desktop 2 (S.S. Papadopoulos & Associates) para generar visualizaciones 3D del modelo y ArcGIS/QGIS para la generación de mapas.

El modelo se calibró en régimen permanente e incluyen las zonas de relleno formadas por las Unidades Hidrogeológicas Depósitos no consolidados Actuales UH-1, Depósitos no consolidados antiguos UH-2 y Secuencias Volcanosedimentarias UH-3. La geometría del modelo se ha realizado con base en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual en Leapfrog Hydro.

A partir de la modelación en régimen permanente, se realizaron simulaciones en régimen transiente en las cuales se aumentaron los caudales de bombeo en el sector para evaluar la respuesta del sistema y estudiar la disponibilidad de recursos para constituir nuevos derechos de agua subterránea.

### 9.1 DOMINIO, DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

Para la definición del límite y orientación de la caja del modelo numérico que representa a los sistemas de flujos asociados a los ríos Imperial y Toltén, se han tenido en consideración 3 factores: la conceptualización hidrogeológica (direcciones de flujo subterráneo, delimitación del relleno, etc.), la posibilidad de definir condiciones de borde con base en mediciones y que éstas no se basen en estimaciones indirectas y lograr una ejecución eficiente del modelo numérico tanto para la calibración como para las simulaciones.

De esta forma los límites definitivos (en planta) del dominio modelo están determinados por las siguientes coordenadas planas, según el Datum Geodésico WGS84 UTM Huso 18S:

- Vértice SO : 658.041,00 E 5.645.472,00 N
- Vértice SE : 762.923,85 E 5.645.472,00 N
- Vértice NE : 762.923,85 E 5.777.089,69 N
- Vértice NO : 658.041,00 E 5.777.089,69 N

La Figura 9-1 presenta el dominio del modelo, el cual tiene dimensiones aproximadas de 104,8 KM en el eje X (Este-Oeste) y 131,6 Km en la dirección Y (Norte-Sur). Se muestra el trazado de celdas inactivas, que corresponde a todas aquellas celdas donde se identifica la presencia de roca/basamento (UH-4 a UH-6), excepto en la capa 1 donde se mantuvieron activas aquellas celdas que son intersectadas por el río Cholchol. Además, se inactivaron aquellas zonas de relleno de muy bajo espesor, las cuales dentro del contexto regional no tienen interés hidrogeológico.

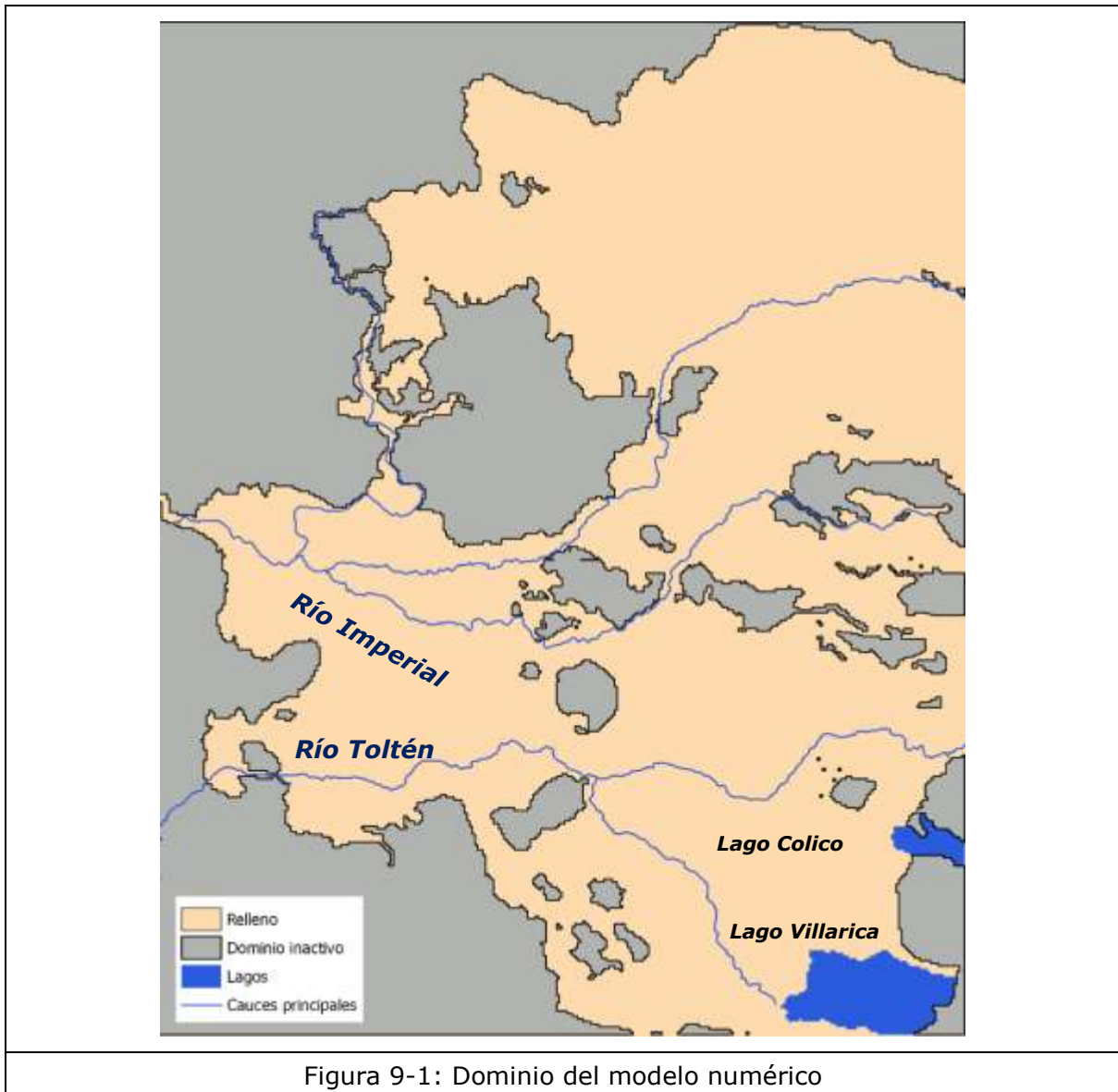


Figura 9-1: Dominio del modelo numérico

En planta en modelo se discretizó empleando una grilla cuadrada, que incluye refinamientos en zonas donde existe mayor intercambio de agua (mayor gradiente hidráulico). Inicialmente el dominio fue discretizado con celdas 342,75 m, generado una grilla de 384 filas y 306 columnas, es decir, un total de 352.512 celdas, para las tres capas consideradas. Posteriormente, el dominio fue refinado en torno a los cauces principales (ríío Imperial, ríío Toltén, ríío Cautín, ríío Allipen, Ríío Cholchol, etc.), a los pozos de bombeo cuya capacidad de extracción efectiva fuera mayor a 40 L/s, condiciones de borde de flujo subterráneo, entre otras.

El número total de celdas es 722.502, de las cuales 559.675 se encuentran activas (77%), lo que se considera razonable para un modelo de estas dimensiones y características. La Figura 9-2 muestra la discretización general en planta.

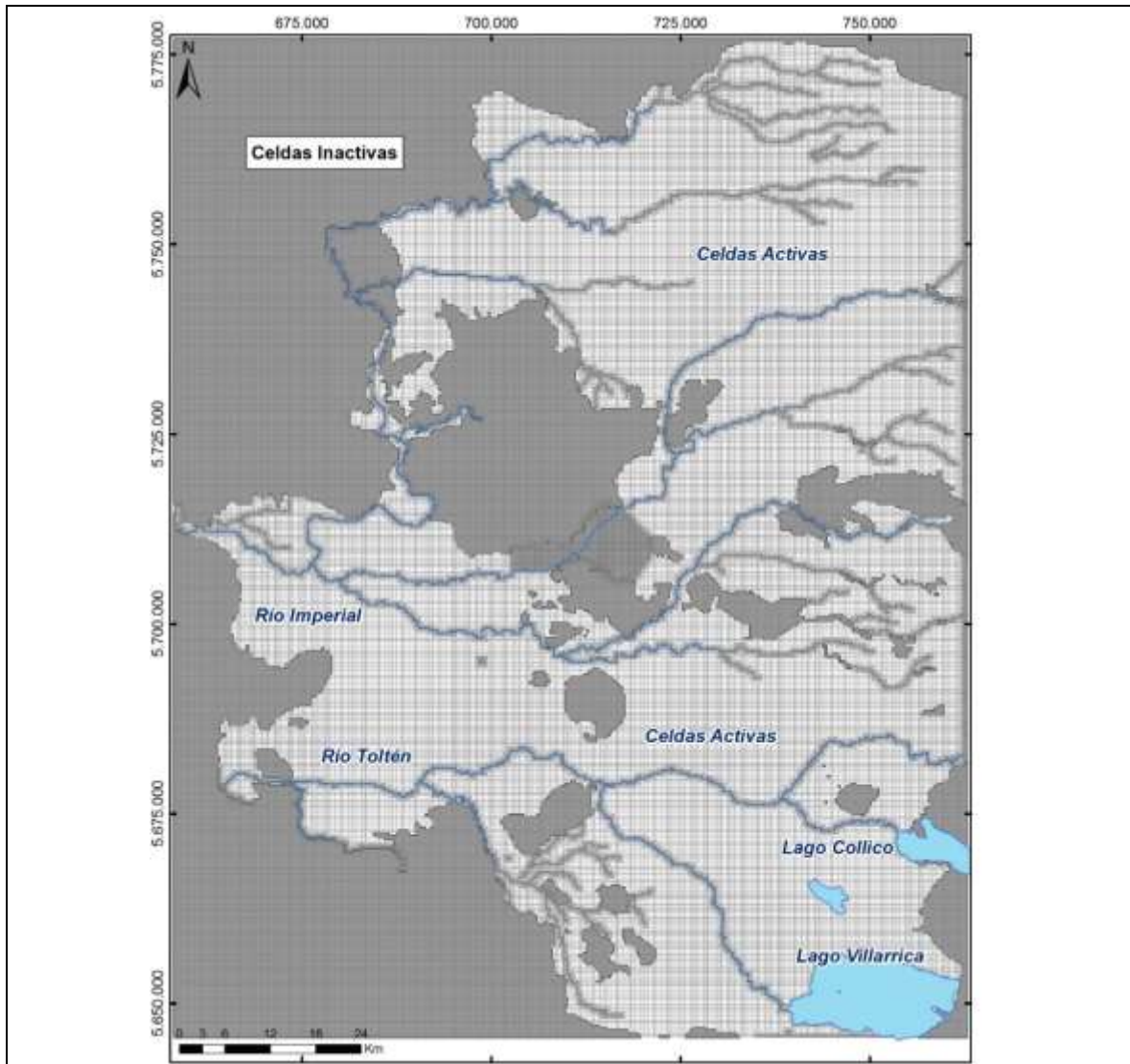


Figura 9-2: Discretización espacial en planta – vista general

Para construir la discretización vertical en tres capas se partió con un modelo formado por una sola capa, que se extiende desde la topografía hasta el fondo del relleno, y cuya representación geométrica simplificada se obtuvo desde Leapfrog Hydro con celdas de 342,75 m. A partir de este modelo se subdividió la capa inicial en tres capas. La capa 1 representa la UH-1, y se ha introducido en el modelo con un espesor de 20 m. La capa 3 está formada por la UH-2 y la UH-3, y presentan un espesor correspondiente al espesor desde el fondo de la capa 2 hasta el fondo del relleno. La capa 2 presenta 10 m de espesor y representa una unidad intermedia que separa los dos acuíferos presentes en el sector.

De esta forma, el primer acuífero (acuífero somero) está representado por la capa 1 (UH-1), y el acuífero profundo está formado por la UH-2 y UH-3. La unión de la UH-2 y UH-3 en una sola capa se debe a que presentan un patrón similar en cuanto a su conductividad hidráulica y a la imposibilidad de definir con claridad los contactos entre

ellas en profundidad, considerando la calidad de la información litológica disponible. El objetivo de la discretización vertical en tres capas es la obtención de las piezometrías de los dos acuíferos presentes en el sector según la información de niveles, la cual muestra que en determinados sectores existen gradientes hidráulicos verticales entre ambos acuíferos. Por tanto, la capa 2 actúa como acuitardo en aquellos sectores donde se observan diferencias en la piezometría de los dos acuíferos.

La elección de la escala de tiempo con la que se trabaja en el modelo numérico busca definir un paso de tiempo adecuado para representar las variaciones temporales tanto de las variables forzantes (recargas y descargas) como de las variables de estado (niveles y flujos). Considerando que las mediciones de niveles son la principal fuente de información que será empleada para calibrar el modelo (dada su amplia cobertura espacial), se ha optado por desarrollar una simulación de régimen permanente, la que apunta a representar condiciones de equilibrio de largo plazo (incluyendo las extracciones actuales del sistema), suponiendo que éstas son representativas de la superficie freática que fue construida en base al monitoreo de niveles del catastro.

De esta forma, todas las variables de entrada/salida al/del modelo (condiciones de borde) son definidas buscando representar las condiciones hidrológicas que más se asemejen a las condiciones de largo plazo, por ejemplo, en el caso de los caudales en ríos, esto se refiere a estimar condiciones representativas del flujo base.

Esta elección se hace considerando que la información de niveles disponible con cobertura areal suficiente para calibrar el modelo no tiene continuidad temporal.

## **9.2 PROPIEDADES HIDRÁULICAS**

Inicialmente la distribución espacial y los valores de las propiedades hidráulicas se tomaron forma a partir de la definición hecha en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual, en relación a la distribución en superficie de las unidades de relleno: UH-1, UH-2 y UH-3, empleando isotropía horizontal ( $K_x=K_y$ ) y asumido una relación  $K_z/K_x$  de 0,1.

Durante el proceso de calibración del modelo se tiene en la capa 1 un valor de conductividad hidráulica que varía en el rango de 0,125 y 25 m/día, en la capa 2 en el rango 0,01 y 25 m/día, y en la capa 3 entre 0,1 y 100 m/día (Figura 9-3).

El proceso de calibración para llegar a los parámetros hidráulicos definitivos del modelo tuvo en cuenta que la capa 2 debe presentar una menor conductividad hidráulica, en los sectores donde el acuífero somero presenta diferencias de nivel con el acuífero profundo.

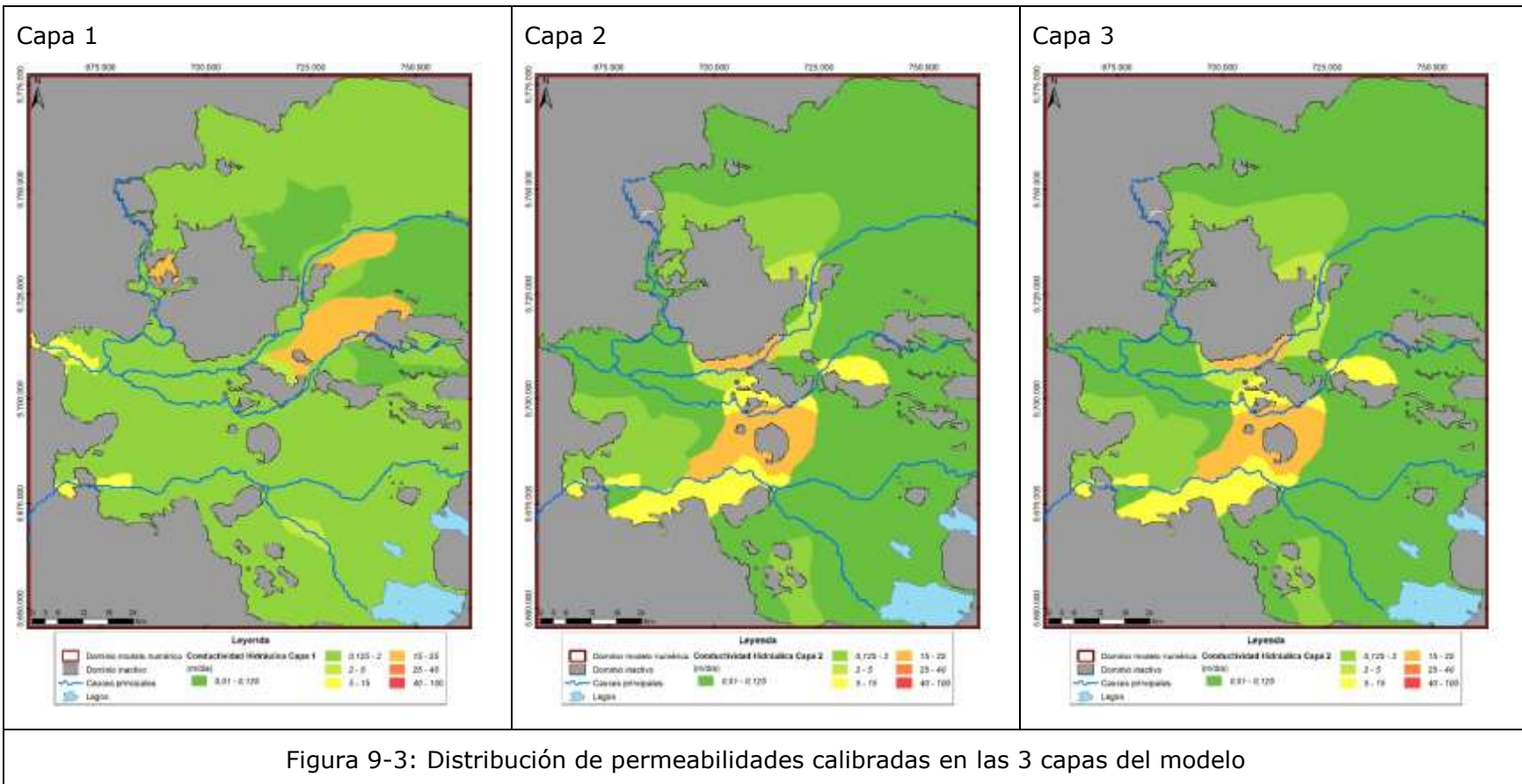


Figura 9-3: Distribuição de permeabilidades calibradas em las 3 capas del modelo

### 9.3 CONDICIONES DE BORDE

El modelo considera 4 variables forzantes que representan las recargas y descargas del sistema, para las cuales se emplean las siguientes condiciones de borde (Figura 9-4).

**Flujos laterales subterráneos (paquete CHD):** Los flujos de recarga y descarga lateral subterránea fueron definidos en función de la piezometría representativa de los meses de marzo y julio de 2014. Se asignó a cada celda activa ubicada en los límites del borde este del modelo, los niveles que presenta el acuífero somero en la capa 1 y los niveles que presenta el acuífero profundo en la capa 3, en base a la interpolación lineal de la piezometría regional para ambos casos. De esta forma se incorpora al modelo una condición de nivel conocido que varía en el espacio. Para ajustar las permeabilidades del entorno del borde Este se ha tenido en consideración la estimación de recarga lateral que se obtiene a partir del modelo hidrológico desarrollado en ExtenSIM.

**Recarga Superficial (paquete RCH):** La recarga superficial ingresada al modelo proviene de la estimación del modelo hidrológico, que engloba tanto la recarga por riego como la asociada a las precipitaciones. Las tasas de recargas ingresadas al modelo corresponden a valores promedio (de largo plazo), que fueron calculados para representar una condición de régimen estacionario que pudiera relacionarse con la situación de flujo base en los cauces superficiales.

Las zonas de recarga que define el modelo hidrológico fueron replanteadas sobre la grilla del modelo numérico, modificándolas en función de la distribución de celdas inactivas y del tamaño del dominio del modelo numérico de flujo. Considerado que las dimensiones del modelo numérico son menores a la del modelo de recarga, la cantidad de agua que es ingresada como recarga superficial es también menor, estimándose en  $20,1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La recarga superficial que ocurre fuera de los límites del modelo, hacia el este, es ingresada como flujo subterráneo (punto anterior) y aquella que ocurre sobre celdas inactivas dentro del dominio del modelo (eg. cordillera del Nahuelbuta) es también ingresada como pozos de inyección en las zonas de contacto entre las unidades impermeables del cerro y las zonas aluviales. En total en esta zona se ingresa una recarga de  $920 \text{ L/s}$ , valor que se estimó durante la calibración del modelo.

**Lagos (paquete CHD):** Los principales lagos que se ubican dentro del dominio del modelo son el lago Villarrica y el lago Colico, los cuales son representados considerando una cota de agua constante de  $225 \text{ m.s.n.m}$ , para el lago Villarrica, y de  $333 \text{ m.s.n.m}$ . para el lago Colico. Estas cotas fueron definidas en base al cruce entre el modelo digital de elevación y la traza de los lagos definido mediante imagen satelital.

**Cauces Superficiales (paquetes RIV y DRN):** Los cauces superficiales representan las principales zonas de intercambio entre el dominio subterráneo y el dominio superficial. La forma en que éstos son representados en el modelo está condicionada por la disponibilidad de información básica, como batimetría de los cauces, mediciones de caudal en estaciones fluviométricas, información cualitativa sobre zonas de recuperación y pérdidas, etc. En base a esta información se simuló hasta los cauces de orden 4, como por ejemplo los ríos Toltén, Imperial, Allipén, etc. empleando la condición de borde *river* (paquete RIV), la cual permite una dinámica de recarga y descarga a lo largo del cauce. Los cauces de orden 2 y 3 se representaron mediante la

condición de borde *drain* (paquete DRN), ya que permiten drenar afloramientos de agua subterránea dentro del modelo numérico, de manera tal de adecuar el comportamiento hidrogeológico del sistema eliminando los excedentes de agua presentes. Estos excedentes de agua se producen cuando la cota del nivel piezométrico se encuentra por encima de la cota del dren recibiendo flujo desde el acuífero.

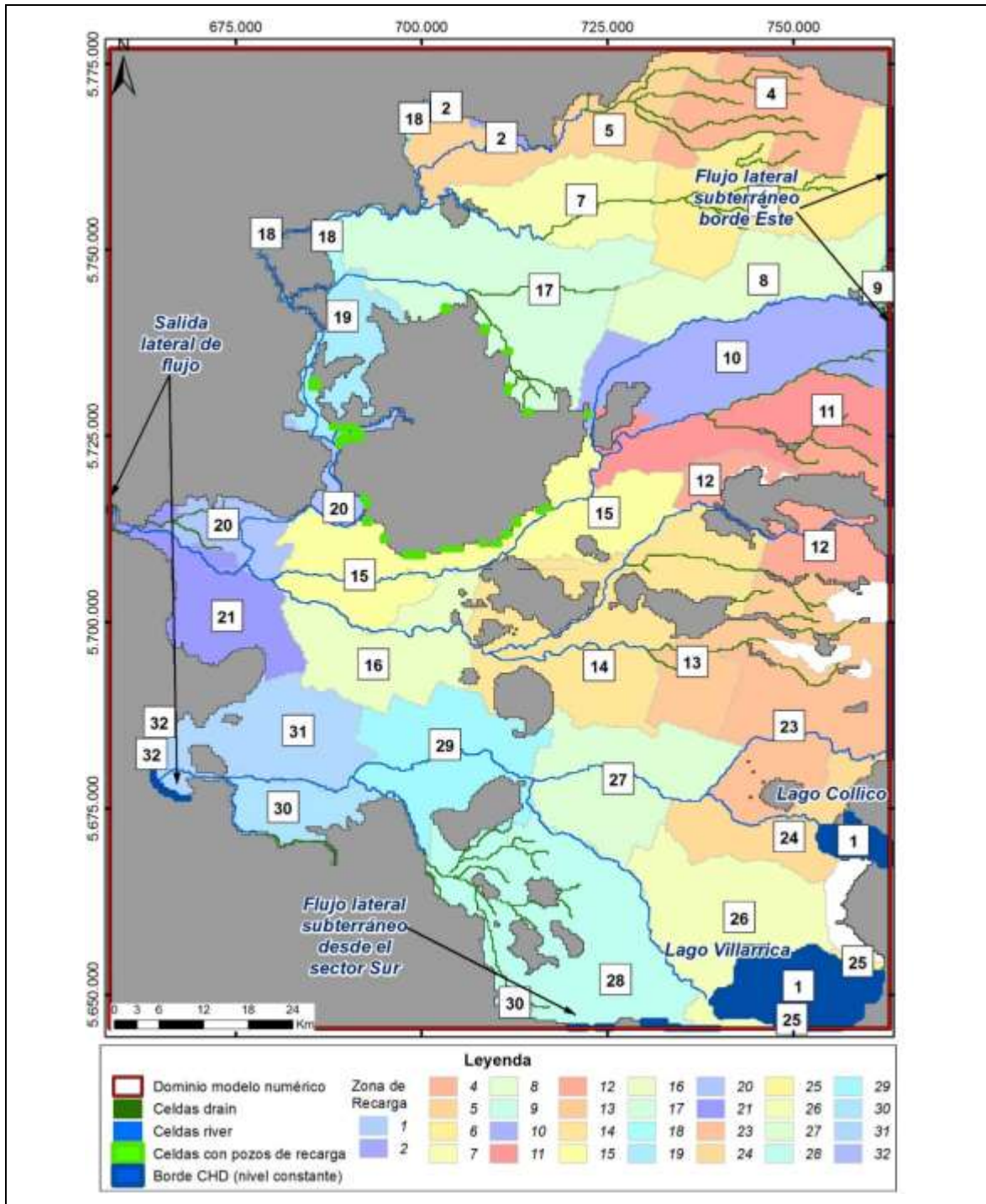
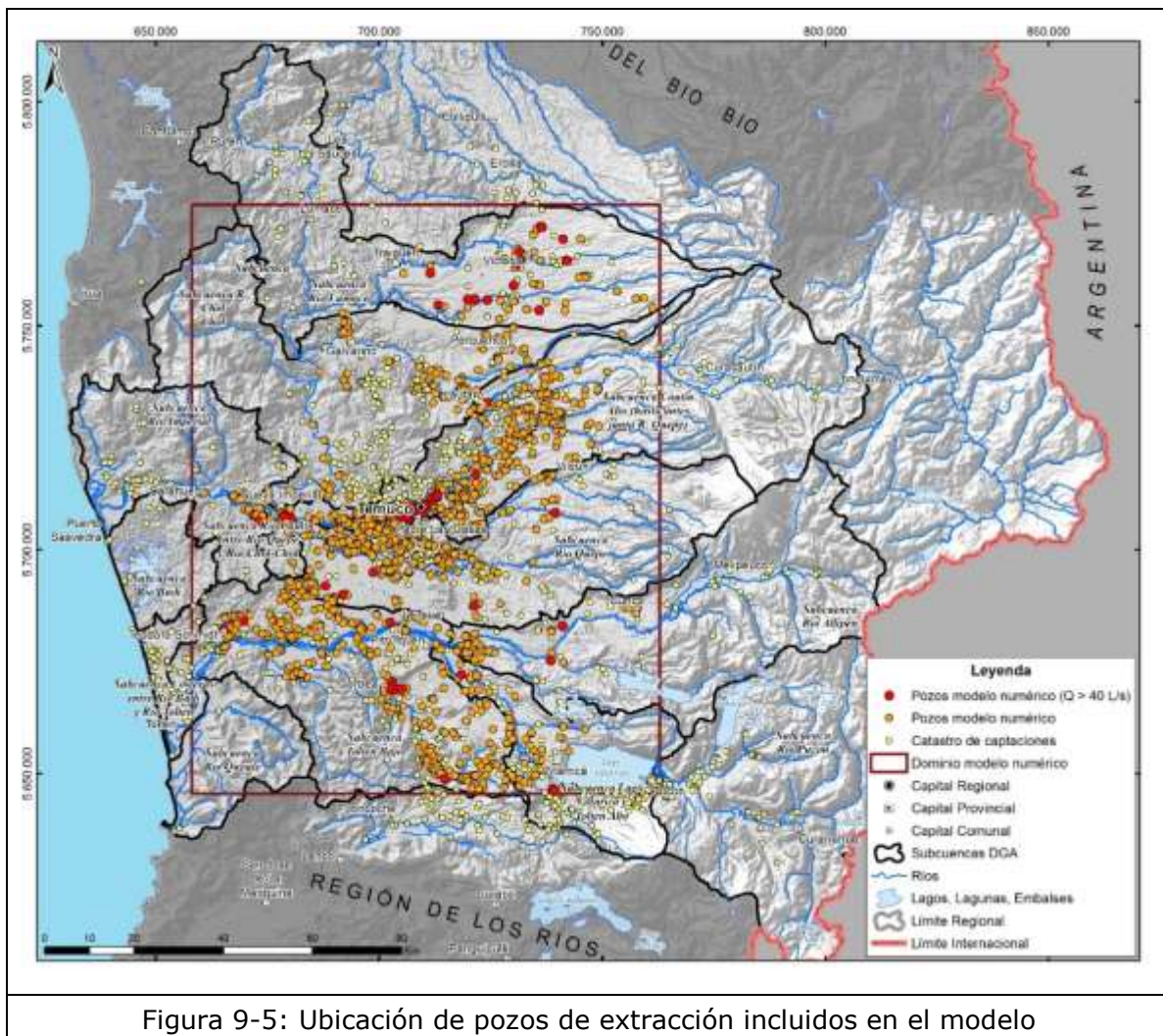


Figura 9-4: Resumen de condiciones de borde empleadas en el modelo

## 9.4 EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS

Las extracciones consideradas provienen del catastro de captaciones desarrollado en el presente estudio, que contiene información de 2.796 puntos. El catastro de pozos fue replanteado sobre el límite activo del modelo numérico quedando un total de 1.665 dentro de él (Figura 9-5), que corresponden a aquellos pozos para los que se cuenta con información de coordenadas y que tienen un caudal de extracción mayor a cero.

De estas 1.665 captaciones, 1.492 corresponden a derechos otorgados y el resto son captaciones con derechos en trámite. Para efectos de la calibración de régimen permanente se consideran sólo éstas 1.492 captaciones, incluyendo el resto en las simulaciones que se describen posteriormente. En estas condiciones el total de derechos corresponde a 9.852 L/s estimados según el catastro, el cual se reduce a 5.007 L/s al considerar la asignación de uso efectivo, es decir el caudal efectivamente explotado. Este último caudal se concentra en un  $\sim 71\%$  en pozos para consumo de agua potable (3.537 L/s) y en un  $\sim 23$  L/s en pozos para riego (1.155 L/s), quedando el 6 % restante en usos industriales y otros (315 L/s).



Las extracciones subterráneas son modeladas con el paquete WEL aplicando la opción de reducción automática de tasas disponible en MODFLOW-USG. Esta opción reduce progresivamente la tasa de extracción impuesta cuando el espesor saturado de la celda es inferior a 1%, calculando de esta forma un bombeo que es realmente sostenible en base a las condiciones hidrogeológicas ajustadas (permeabilidades).

## **9.5 CALIBRACIÓN MODELO DE FLUJO**

La calibración del modelo se hizo teniendo como objetivo ajustar tanto los niveles de agua en los pozos catastrados como también los caudales asociados a los flujo base estimados para los principales ríos, con base en las mediciones sistemáticas en estaciones fluviométricas de la DGA. El hecho de calibrar tanto niveles como flujos le permite al modelo reducir su incertidumbre en relación a las propiedades hidráulicas que son ajustadas, conductividades hidráulicas en este caso, por tratarse de un modelo régimen permanente.

En cuanto al flujo superficial hacia los cauces, se han utilizado los resultados del modelo hidrológico superficial y el modelo numérico subterráneo para obtener el caudal total hacia los ríos. En el modelo hidrológico se ha obtenido el caudal de afloramiento, que se trata del flujo sub superficial que pasa a los ríos sin infiltrarse hacia el acuífero. Esta componente de flujo se ha sumado al caudal neto hacia los ríos que se obtiene en el modelo numérico subterráneo, obteniendo así el caudal total hacia los cauces superficiales del sector.

La calibración se desarrolló tanto de forma manual (prueba y error) y también de forma asistida mediante el software PEST (Doherty 2010; Doherty 2015). Para la calibración se definió el punto medio de la profundidad de cada uno de los pozos de monitoreo como el punto de observación para asignar cada pozo a una de las capas del modelo (target de nivel).

El catastro, realizado en la campaña de terreno efectuada entre los meses de marzo y julio de 2014, identificó un total de 2.569 captaciones elegibles en el marco de la modelación como posible pozo de monitoreo, de las cuales se utilizaron, finalmente en el marco de la modelación, un total de 1.533, ubicados dentro de la zona activa del modelo (target de nivel). El resto de las captaciones fueron eliminadas dado que no se contaba con medición de niveles en terreno (710) o no contaban con información de profundidad (326).

Se ha definido. Así, se obtienen 1.383 pozos de observación en la capa 1, 70 pozos en la capa 2 y 80 pozos en la capa 3, lo que da un total de 1.533 captaciones.

Posteriormente, para la calibración del modelo numérico se optó por filtrar el número de pozos de observación utilizados, siguiendo los siguientes criterios:

- Selección de pozos utilizados para la realización de la piezometría del modelo conceptual. Se han descartado aquellos pozos que no fueron utilizados para la confección de la piezometría.
- Datos repetitivos. En algunos sectores se encuentran pozos muy cercanos entre sí con el mismo nivel piezométrico, o bien con un dato muy similar. En estos casos

se ha optado por utilizar solo un dato de nivel, descartando el resto de pozos de observación cercanos.

- Diferencias altas del nivel entre pozos cercanos. En algunos casos se han encontrado pozos próximos entre sí con una alta diferencia del nivel piezométrico. En estos casos se ha revisado la piezometría conceptual y los niveles de los pozos del entorno con el fin de incluir en la calibración el dato de nivel más fiable. El pozo descartado presentará por tanto un dato de nivel posiblemente influido por un bombeo, transformándolo en un nivel dinámico.
- Pozos con bombeo mayor a 10 L/s. Se han eliminado de la calibración aquellos pozos de observación que se corresponden con pozos en los que se extraen un caudal superior a 10 L/s, debido a que la medición podría estar influenciada por un bombeo previo a la medición.

Finalmente, se obtuvieron 633 pozos de observación para la calibración del modelo. De éstos, 541 corresponden a la capa 1 (acuífero somero), y 92 corresponden a las capas 2 y 3 (59 a la capa intermedia entre ambos acuíferos, y 33 al acuífero profundo).

La Tabla 9-1 y la Figura 9-6 se presenta un resumen de la distribución de pozos de observación por capa, verificándose que más del 85% se encuentran en la capa 1.

La Tabla 9-1 además compara la situación previa al filtrado de datos y luego de este. Por ejemplo, previo al filtrado la capa 1 concentra el 90% (1383/1533) de los pozos de observación, bajando a un 86% (541/633) luego del filtrado.

Tabla 9-1. Pozos de observación utilizados en la calibración

Capa	Catastro (con información de nivel y profundidad)		Calibración modelo	
	Nº Pozos	Porcentaje %	Nº Pozos	Porcentaje %
Capa 1	1.383	90,2	541	85,5
Capa 2	70	4,6	59	9,3
Capa 3	80	5,2	33	5,2
<b>Total</b>	<b>1.533</b>	<b>100,0</b>	<b>633</b>	<b>100,0</b>

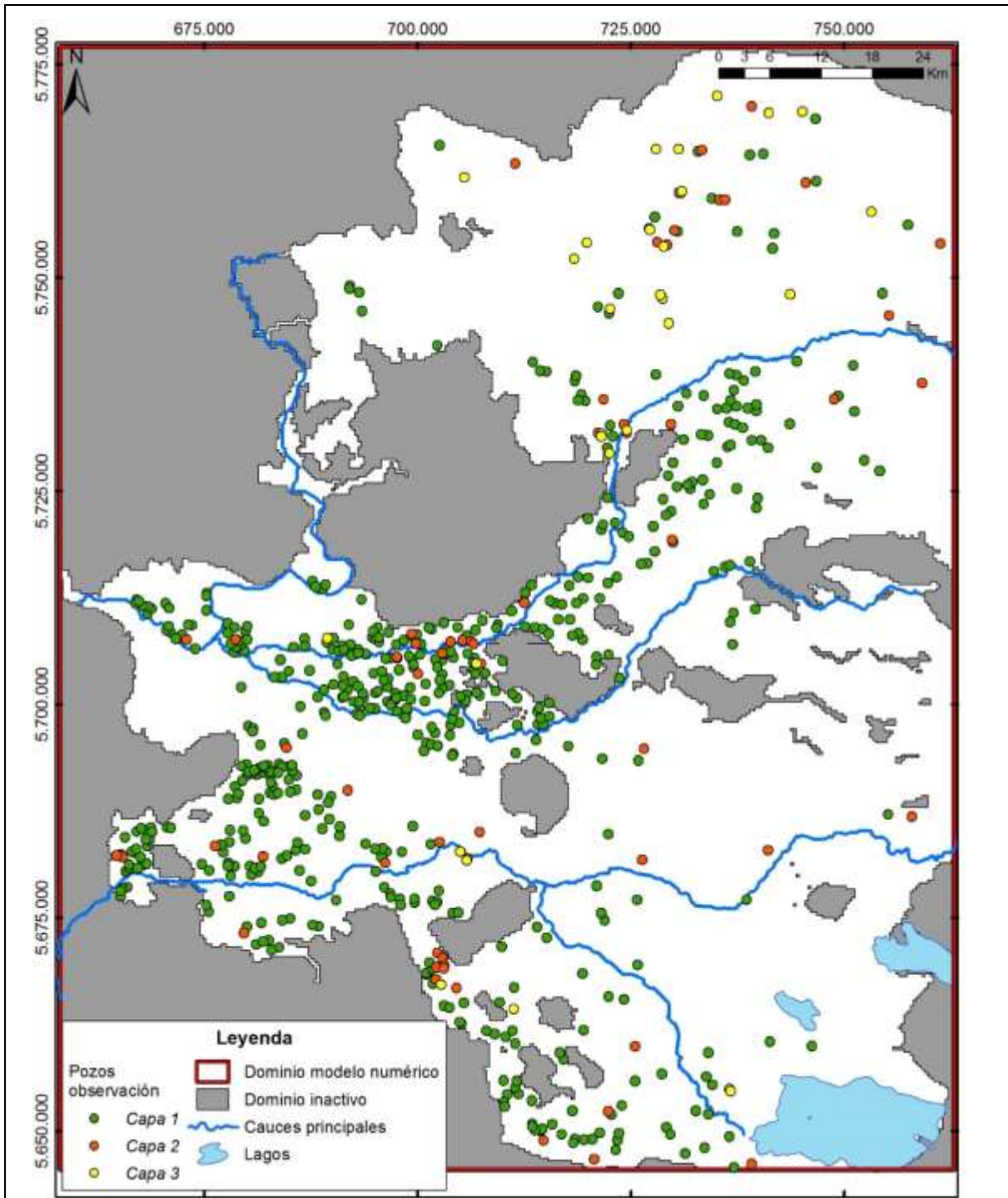


Figura 9-6: Pozos de observación utilizados en la calibración del modelo

## 9.6 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

**Componentes y error del balance de masas:** Los resultados obtenidos desde el modelo en relación al balance hídrico calculado se presentan en la Figura 9-7.

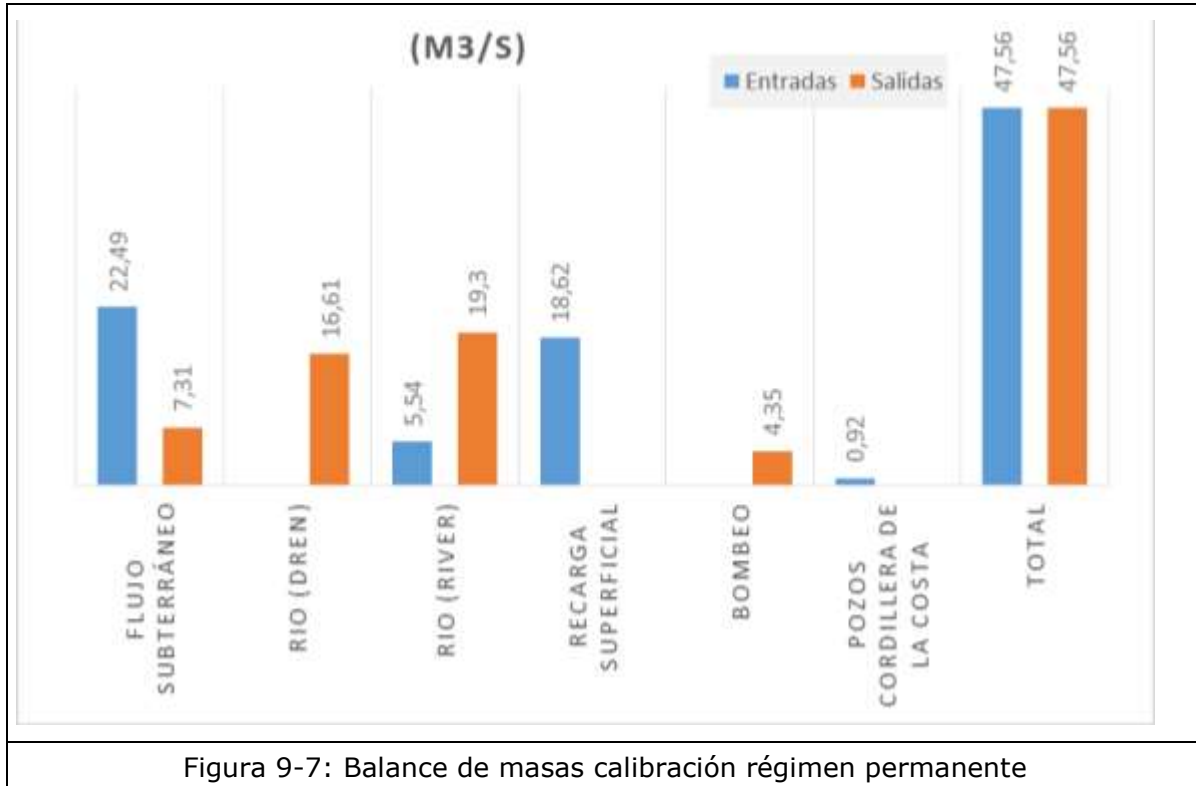


Figura 9-7: Balance de masas calibración régimen permanente

Lo anterior verifica que:

- El error de balance de masas (diferencia entre entradas y salidas) es inferior 0,01 L/s y en términos porcentuales menor a 1%, en línea con el criterio sugerido por SEA (2012) para esta discrepancia.
- Las extracciones totales logradas por el modelo son de 4,35 m<sup>3</sup>/s en vez de los 5 m<sup>3</sup>/s impuestos al modelo (87%). Esto indica que el nivel de extracciones del catastro no serían completamente sostenibles por el acuífero, con base en las conductividades hidráulicas calibradas.
- El intercambio neto entre el acuífero y el río indica que existe un flujo de descarga hacia el río de 30,37 m<sup>3</sup>/s.
- El caudal de afloramiento, que representa el flujo sub-superficial hacia los ríos (que no llega a infiltrarse en el acuífero), es de ~90 m<sup>3</sup>/s (estimado por el modelo hidrológico), que se debe sumar al caudal neto que cede el acuífero a los ríos en el modelo numérico subterráneo (30,4 m<sup>3</sup>/s), obteniendo así el caudal total aportante a los ríos (subterráneo y sub superficial), de 120,4 m<sup>3</sup>/s.
- El aporte lateral subterráneo neto hacia el acuífero es de 15,18 m<sup>3</sup>/s, el cual está formado por la entrada de flujo desde el límite Este y desde el sector Sur y los lagos Villarrica y Colico. El flujo lateral subterráneo estimado en el modelo conceptual a partir de la recarga que se produce aguas arriba del borde Este del

modelo, es de 13,5 m<sup>3</sup>/s. El cual es levemente inferior al calibrado en el modelo numérico (que ingresa un 12% adicional a la recarga lateral estimada); sin embargo, el modelo considera también las entradas subterráneas desde el sector sur, donde se encuentra el lago Villarrica y Colico.

- El balance de flujo desde los lagos indica que éstos reciben del acuífero un flujo neto (positivo) de aproximadamente 0,1 m<sup>3</sup>/s (ganancia de agua), debido a que éstos ingresan al acuífero 0,23 m<sup>3</sup>/s y reciben de él 0,32 m<sup>3</sup>/s.
- La recarga superficial total admitida por el modelo es de 19,54 m<sup>3</sup>/s (caudal que incluye la recarga superficial mediante el paquete RCH y los pozos de inyección de la cordillera de la Costa), valor que es levemente inferior a valor impuesto: 20,1 m<sup>3</sup>/s (capítulo 3), verificándose sólo un 3% de discrepancia, lo que se considera razonable para un modelo de estas características.

**Residuales y Estadígrafos de Calibración:** La Tabla 9-2 resume los principales estadígrafos de residuales calculados en función de los targets de nivel (residual = nivel observado – nivel simulado). Los resultados obtenidos son satisfactorios, dado que ambos estadígrafos de residuales (MAE y RMS) son inferiores al 5% y además existe una buena consistencia entre el modelo numérico y el modelo conceptual desarrollado, lo cual es consistente también con la recomendación que hace el SEA (2012). Además del RMS normalizado global, se ha obtenido este valor también por cuenca y por capa, de forma de obtener también un buen ajuste de niveles por sectores.

Tabla 9-2: Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente

<b>Estadígrafos de residuales</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
ME (error medio)	2,96	m
MAE (error medio absoluto)	8,45	m
RMS (error cuadrático medio)	11,51	m
Residual Min.	-76,65	m
Residual Max.	49,08	m
Nº Observaciones	633	-
Rango	629,40	m
MAE – normalizado = MAE/Rango	0,47	%
RMS – normalizado = RMS / Rango	1,83	%

Tabla 9-3: RMS normalizado por sectores - calibración en régimen permanente

<b>Sector de calibración</b>	<b>RMS normalizado %</b>
Capa 1	1,6
Capa 2	3,0
Capa 3	5,2
Cuenca del río Imperial	1,9
Cuenca del río Toltén	3,2

**Niveles Observados vs Modelados:** Para observar la distribución interna de los errores del modelo, se han graficado los niveles observados vs los simulados para el conjunto total de los pozos de observación. En la Figura 9-8 se presenta el ajuste de niveles junto con la recta de 45° (ajuste perfecto) y bandas de errores significativas para los errores obtenidos. En términos cualitativos se verifica que la mayor parte de los puntos se encuentran homogéneamente distribuidos en torno a la línea de 45° sin observarse zonas con tendencias claras que difieran de esta pendiente de ajuste. Además la mayor parte de estos puntos se encuentran en la banda de error de 20 m, lo cual se considera adecuado.

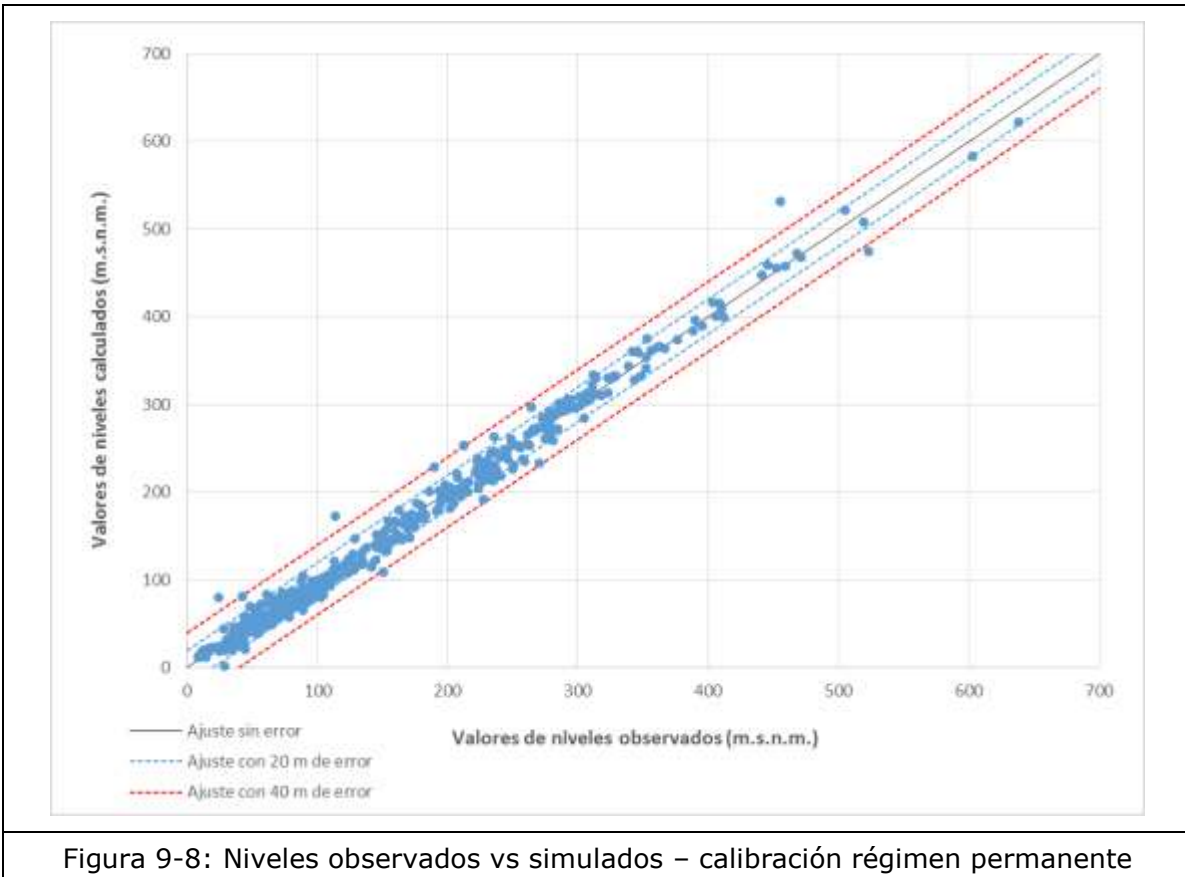


Figura 9-8: Niveles observados vs simulados – calibración régimen permanente

**Sensibilización de la recarga:** Se realizó un análisis de sensibilidad de la recarga para evaluar el cambio en la calibración con un aumento de la misma. El valor de recarga se ha aumentado en un 20 y 30%, el cual se aplica al valor de recarga mediante el paquete RCH, sin incluir ese aumento en la recarga de los pozos de la cordillera de la Costa.

- Aumento del 20%: se pasa de un caudal total de recarga superficial de 18,62 m<sup>3</sup>/s a un caudal de 22,34 m<sup>3</sup>/s (aumento de 3,7 m<sup>3</sup>/s). El RMS normalizado es de 1,86%, en comparación con un valor de 1,83% obtenido en el modelo calibrado. Los caudales de salida al río aumentan en unos 3 m<sup>3</sup>/s. Por tanto, un aumento en la recarga que no supere el 20% no afecta sustancialmente la calibración y a los niveles piezométricos en el modelo numérico.

- Aumento del 30%: se pasa de un caudal total de recarga superficial de 18,62 m<sup>3</sup>/s a un caudal de 24,20 m<sup>3</sup>/s (aumento de 5,59 m<sup>3</sup>/s). El RMS normalizado aumenta a 1,93%. La descarga hacia los ríos también aumenta, con 4,62 m<sup>3</sup>/s adicionales. El aumento de un 30% en la recarga produce una mayor salida de caudal hacia los ríos, implicando además un aumento en los niveles de los pozos en determinados sectores que empeoran la calibración de niveles.
- Tal como se aprecia en los puntos precedentes, es posible indicar que aproximadamente el 80% del aumento de la recarga se va a los ríos.

## 9.7 OPERACIÓN DEL MODELO - SIMULACIONES

Para efectos de evaluar los caudales de extracción susceptibles de ser otorgados (como nuevos derechos) en las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, se desarrollan 5 simulaciones, a escala anual, que consideran un horizonte de 50 años:

- Escenario 1: Se bombean la totalidad de los derechos otorgados. Los derechos otorgados constan de 1.492 pozos de bombeo con un caudal de derecho de 9.851,7 L/s. La recarga se asume como el promedio histórico.
- Escenario 2: Se bombean la totalidad de los derechos otorgados más los derechos en trámite. Este escenario consta de 1.665 pozos con un caudal total de derecho y en trámite de 10.751,2 L/s. La recarga se asume como el promedio histórico.
- Escenarios 3 y 4: Determinación del volumen sustentable para los acuíferos definidos considerando el cumplimiento de los 4 criterios para la evaluación de sustentabilidad de escenarios. Este escenario consta de un aumento progresivo de caudal a través de pozos ficticios en las cuencas de estudio en función de los resultados obtenidos en el Escenario 2. Los caudales considerados para cada escenario son los siguientes:
  - Escenario 3: Presenta un aumento progresivo de caudal de 50% respecto al Escenario 2.
  - Escenario 4: Presenta un aumento progresivo de caudal de 20% respecto al Escenario 2.

En estos escenarios se asume también que la recarga es igual al promedio histórico.

- Escenario 5: Caudales obtenidos en el Escenario 4 (escenario óptimo de extracción) con hidrología modificada. La recarga del escenario es un 22% menor, ya que la realización de este escenario busca simular una serie hidrológica sin años húmedos.

En la Tabla 9-4 resumen los caudales totales de extracción asignados a ambas cuencas en cada escenario.

Tabla 9-4. Caudales de extracción en los escenarios simulados

ESCENARIO	Extracciones (L/s)		
	Río Imperial	Río Toltén	TOTAL
Escenario 1 (Base)	7.242,3	2.609,4	9.851,7
Escenario 2	7.850,3	2.901,0	10.751,2

Escenario 3	11.775,4	4351,4	16.126,8
Escenario 4	9420,3	3481,1	12.901,4
Escenario 5*	9420,3	3481,1	12.901,4

\*Escenario con hidrología histórica y caudales óptimos de extracción

Para determinar el caudal de extracción máximo por cuenca se han analizado los resultados de la simulación por cuenca y evaluado los 4 criterios de sustentabilidad de la DGA:

- **Criterio 1** - Descensos sostenibles en el tiempo a nivel de acuífero: Los descensos deber estar estabilizados para una operación de 50 años del sistema. Esta estabilización de niveles deber ser respaldada por una recarga suficiente que ingresa al volumen de control (recarga superficial, infiltración desde el río, etc.).
- **Criterio 2** - Afectación sobre aguas superficiales: La evaluación de la interacción entre aguas superficiales (ríos, vertientes, etc.) y aguas subterráneas debe ser despreciable, de tal forma de no afectar los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción (recursos inducidos sobre fuentes superficiales comparados con una situación de régimen natural) debe ser menor que el 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluado como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.
- **Criterio 3** - Extracción ingresada al modelo: Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda.
- **Criterio 4** - Afectación a pozos de terceros: En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

Tras el análisis de los resultados obtenidos en los escenarios realizados, se ha determinado el nivel de explotación subterránea sustentable de cada cuenca. En la Tabla 9-5 se presenta el valor total a ser explotado y en la Tabla 9-5 se presenta el valor adicional por sobre los derechos actualmente aprobados y las solicitudes en trámite, es decir, el caudal adicional respecto del escenario 2.

Tabla 9-5. Caudales óptimos de extracción

CUENCA DEL RÍO IMPERIAL			CUENCA DEL RÍO TOLTÉN		
ESCENARIO	CAUDAL ÓPTIMO		ESCENARIO	CAUDAL ÓPTIMO	
	L/s	Mm <sup>3</sup> /año		L/s	Mm <sup>3</sup> /año
E4	9.420,3	297,08	4	3.481,1	109,78

Tabla 9-6. Caudal adicional susceptible de ser otorgado

CUENCA DEL RÍO IMPERIAL		CUENCA DEL RÍO TOLTÉN	
ESCENARIO	CAUDAL ÓPTIMO	ESCENARIO	CAUDAL ÓPTIMO

	L/s	Mm <sup>3</sup> /año		L/s	Mm <sup>3</sup> /año
E4	1.570	49,51	4	580,1	18,29

## 10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los trabajos desarrollados en el marco de este proyecto y sus resultados, son un aporte innegable para el entendimiento del funcionamiento hidrogeológico de la región y su relación con el sistema superficial. Se han desarrollado herramientas de modelación hidrológica e hidrogeológicas, que permiten hacer gestión de los recursos hídricos a escala regional. A continuación se presentan las principales conclusiones del estudio.

- El uso principal de los recursos subterráneos de la región corresponde a: a) agua para Consumo Humano y Animal (55%), b) agua para Riego (33%), c) aguas para Uso Industrial (10%) y ad) agua para Otros Usos (2%).
- Respecto de la evolución de la constitución de derechos de aguas subterráneas en la región, es posible señalar que estos han sufrido un importante aumento en los últimos años, alcanzando un total de 16.735 L/s al año 2013.
- Respecto a la red de monitoreo hidrológico se puede indicar que esta es suficiente para analizar a escala regional la precipitación y temperatura media, sin embargo, es insuficiente para las variables de evaporación de tanque y fluviometría.
- Para la modelación hidrológica el software ExtendSim resultó ser adecuado principalmente por su flexibilidad operacional, que permite la generación de rutinas hidrológicas que se pueden acoplar fácilmente y que pueden representar los diferentes procesos involucrados (zonas de riego, ríos, embalses, etc.).
- La modelación hidrológica, mostró que el porcentaje de la precipitación que se transforma en recarga para los acuíferos, varían en promedio entre 3,1 % y 4,3 %, para las cuencas del río Imperial y Tolten, respectivamente.
- En términos de caudal la recarga media estimada a los acuíferos es la siguiente: a) Imperial 20,6 m<sup>3</sup>/s, b) Toltén 30,7 m<sup>3</sup>/s, c) Budi 0,56 m<sup>3</sup>/s, d) Costeras B-T 0,28 m<sup>3</sup>/s, y; e) Queule 1,94 m<sup>3</sup>/s.
- En el marco del presente estudio se generó, mediante la recopilación y homogenización de la información disponible, un mapa geológico regional a escala 1:250.000.
- Respecto de la geología se puede indicar que en la Cordillera de la Costa dominan las rocas intrusivas y metamórficas antiguas y en la Cordillera Principal dominan rocas volcánicas. La Depresión Central, en tanto, se encuentra colmatada en profundidad por rocas sedimentarias antiguas, y en superficie por los rellenos sedimentarios producto de abanicos aluviales y lahares provenientes de la cordillera Principal, y depósitos no consolidados del Holoceno. Esta zona es la que presenta mayor interés hidrogeológico en términos regionales.
- Los resultados obtenidos a través de los estudios geofísicos desarrollados con la técnica TEM sugiere que este método no es el más recomendable para caracterizar

el subsuelo en ambientes hidrogeológicos como lo encontrados en la región (altamente saturados, con bajos contrastes entre suelos secos, parcialmente húmedos y saturados). En efecto, la geofísica TEM no pudo mostrar cambios de resistividad en profundidad asociados al nivel estático, o correlacionables directamente con la estratigrafía descrita de pozos cercanos.

- El estudio geofísico de gravimetría permitió obtener un mapa de profundidad del basamento, en efecto mostró la existencia de zonas en que el basamento se encuentra a más de 2.600 m de profundidad (ej. al este de Victoria) de donde está el depocentro principal de la cuenca sedimentaria.
- Es importante señalar que los estudios geofísicos realizados con gravimetría permiten obtener una buena aproximación de la profundidad del basamento, sin embargo, en un trabajo hidrogeológico de carácter regional (considerando un basamento con densidad única), esta metodología no permite determinar con buena exactitud la geometría del basamento en la zona con mayor interés hidrogeológico, donde se utiliza el recurso hídrico subterráneo (hasta 200 - 300 m de profundidad).
- El agua en la región en general presenta una buena calidad química, correspondiendo a aguas frescas del tipo bicarbonatadas intermedias. La calidad cambia un poco en los acuíferos y ríos en el sector costero, que por condiciones naturales, presentan mayor salinidad. Sin embargo, muchas muestras superficiales y subterráneas presentan contenidos de coliformes mayores a los naturales, reafirmando una estrecha relación entre los recursos hídricos superficiales y subterráneos.
- En el interior de la región, no se aprecian diferencias importantes en la composición de las aguas. Estos son bicarbonatadas intermedias (con pequeñas variaciones en las proporciones de calcio y sodio) y no reflejan cambios composicionales asociados a litología ni a unidades geomorfológicas. En cuanto a los factores antrópicos, estos sí podrían influir en leves cambios de concentración que se observan aguas abajo de centros poblados como Temuco principalmente y, en menor medida, en los sectores de Victoria, Traiguén y Freire.
- Por su parte, las aguas subterráneas profundas presentan un leve aumento en la concentración de iones, especialmente bicarbonato. En los cationes mantienen generalmente una composición intermedia. La composición de las aguas subterráneas obtenidas desde pozos de entre 20 y 50 m de profundidad, comparadas con las obtenidas en pozos de más de 50 m, son de composición similar y representarían un mismo acuífero. Las aguas de este acuífero se mantienen con una composición homogénea a nivel regional, y sólo parecen estar sujetas a cambios composicionales de origen antrópico en los sectores de Temuco y Victoria.
- El análisis de la información geológica e hidrogeológica permitió identificar 6 unidades hidrogeológicas principales a nivel regional: a) Basamento e Intrusivos (UH6), b) Depósitos Consolidados (UH5), c) Rocas Volcánicas (UH4), d) Secuencias Volcanosedimentarias (UH3), e) Depósitos no consolidados antiguos (UH2) y f) Depósitos no consolidados Actuales (UH1).
- La información de niveles estáticos, obtenidos desde el catastro, permitió identificar la existencia de dos niveles piezométricos, sugiriendo la existencia de dos niveles acuíferos a nivel regional, uno somero y otro profundo, localmente con distintos niveles de presión. El acuífero somero está muy íntimamente ligado a los

cursos de agua superficial y se comporta esencialmente como acuífero libre. El acuífero profundo es semiconfinado, lo que implícitamente sugiere la ocurrencia de un acuitardo entre ambos acuíferos. Es importante señalar, que aunque las diferencias pizométricas entre ambos acuíferos es evidente, no fue posible reconocer en base a la estratigrafía disponible un único acuitardo regional, pero los niveles registrados evidencian su existencia.

- El modelo desarrollado se enfocó principalmente en representar aquellas zonas del relleno formadas por las unidades hidrogeológicas UH-1 (Depósitos no consolidados actuales), UH-2 (Depósitos no consolidados antiguos) y UH-3 (Depósitos volcano-sedimentarios), debido a que éstas representan las mayores unidades acuíferas que son explotadas.
- Para ello, se construyó un modelo de tres capas con el fin de modelar los dos acuíferos presentes en el sector y para representar los gradientes verticales entre ambos acuíferos. La capa 1 representa la UH-1, la capa 3 representa las UH-2 y UH-3, y la capa 2 actúa como acuitardo entre las capas anteriores en aquellos sectores donde se observan diferencias en la piezometría de los dos acuíferos.
- Respecto del balance hídrico se estimó que la entrada de agua por flujos subterráneos hacia la zona modelada es aproximadamente 15,2 m<sup>3</sup>/s, lo cual incorpora los aportes de los lagos Villarrica y Colico. El intercambio neto entre el acuífero y los cauces modelados indica que existe un flujo de descarga hacia los ríos de 30,4 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente.
- Basados en los resultados de las simulaciones realizados con el modelo numérico hidrogeológico, se puede indicar lo siguiente:
  - El caudal óptimo, basados en el cumplimiento de los criterios de la DGA, de explotación regional es 9.420 L/s (297,08 Mm<sup>3</sup>/año) para la cuenca del río Imperial y 3.481 L/s (109,78 Mm<sup>3</sup>/año) para la cuenca del río Toltén.
  - Basado en lo anterior, se estima que el caudal adicional que es posible de ser otorgado es de 1.570 L/s (49,51 Mm<sup>3</sup>/año) para la cuenca del río Imperial, y de 580,1 L/s (18,29 Mm<sup>3</sup>/año) para la cuenca del río Toltén.
  - El bombeo del caudal señalado en los párrafos precedentes requiere que un porcentaje de los pozos se construyan de manera más profunda, ya que los pozos situados en la capa 1 presentan una mayor tendencia a secarse durante los 50 años de simulación.
- La modelación conceptual y numérica demuestran que en la región el funcionamiento del agua subterránea está íntimamente ligado al funcionamiento de los ríos, especialmente la capa superior del acuífero. Este resultado lleva a la conclusión cierta, de que se requiere mejorar mucho el entendimiento de la relación río-acuífero y su comportamiento dinámico, de acuerdo a las variaciones de los caudales que escurren superficialmente en el tiempo.
- La escala de los flujos superficiales es al menos un orden de magnitud superior a los flujos subterráneos, pudiendo llegar a ser más de 2 en casos de precipitaciones extremas. Este hecho es relevante, ya que dificulta la estimación de los flujos de intercambio entre el río y el acuífero, entendiéndose que en la mayoría de los casos el flujo subterráneo se encuentra dentro del error de medición de los flujos superficiales. Naturalmente este hecho le proporciona cierta incertidumbre a las estimaciones realizadas y pone en evidencia la necesidad de estudiar con más detalla relación río-acuífero.

- El acuífero profundo tiene una dependencia menor de los cursos superficiales, sin embargo, es imprescindible estudiar también su relación, ya que corresponde a la zona hidrogeológica de mayor potencial, especialmente los eventos o periodos de recarga al acuífero, producto de la precipitación y el riego.
- El entendimiento del sistema, en especial la dependencia entre el sistema superficial y subterráneo y la diferencia de magnitud de sus flujos, pone de manifiesto la necesidad de contar con una mejor red de monitoreo, tanto de piezómetros someros como de piezómetros profundos. El registro de niveles en el tiempo, permitirá comprender de mejor forma la relación de los acuíferos con los cursos superficiales, y así poder gestionar de forma más eficiente los recursos hídricos de la región. El registro temporal de niveles también permitirá poder calibrar y simular numéricamente el comportamiento del sistema de forma transiente de forma más precisa, lo cual es posible de realizar hoy con la información disponible, sin embargo, con gran incertidumbre.

A partir de los resultados y conclusiones es posible realizar las siguientes recomendaciones para futuros trabajos:

- El modelo numérico hidrogeológico construido, representa de forma adecuada el comportamiento del sistema hidrogeológico regional y permite realizar simulaciones y comprobar hipótesis de escenarios futuros. Los resultados que se obtengan de la operación del modelo deben tomarse como referenciales, centrando el análisis de los resultados en las tendencias por sectores, manteniendo siempre presente que es un modelo de carácter regional, y el primer esfuerzo para caracterizar las principales cuencas de la Región de la Araucanía.
- Implementar una red permanente de pozos de monitoreo, que registre información periódicamente, con pozos habilitados ya sea en el acuífero superficial o profundo, buscando observar las variaciones estacionales del acuífero durante el año.
- Debe tener una cobertura espacial suficiente para reflejar la dinámica del nivel estático del acuífero en relación a los eventos de recarga. En este sentido, esta red de pozos debe ser diferente a las mediciones de nivel que se hacen sobre los pozos de extracción que han sido catastrados.
- Debe considerar además pozos entorno a los principales cauces superficiales para analizar la dinámica de la interacción río-acuífero.
- Mejorar la calidad de la información litológica que se incluye en los expedientes que acompañan las solicitudes de agua de la región.