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

INFORME FINAL

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 Sénior
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

1 INTRODUCCIÓN 18

1.1 OBJETIVOS 19

1.2 CONTENIDO DEL PRESENTE INFORME 20

1.3 CONTEXTO 21

2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES 23

2.1 ESTUDIOS PRINCIPALES 25

2.2 ESTUDIOS SECUNDARIOS 56

2.3 OTROS ANTECEDENTES 70

2.3.1 Bases de datos DGA 70
2.3.2 Información SIG 80
2.3.3 Otros 82

2.4 ESTUDIOS REVISADOS NO INCORPORADOS 82

3 SISTEMATIZACIÓN DE DEMANDAS Y USOS 83

3.1 CATASTRO DE CAPTACIONES 83

3.1.1 Creación base de datos para el catastro 84
3.1.2 Distribución de captaciones por territorio 87
3.1.3 Descripción de actividades en terreno 89
3.1.4 Resultado de actividades en terreno 95
3.1.5 Dificultades en actividades de terreno 97

3.2 SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE DERECHOS Y USOS 97

3.3 REVISIÓN INFORMACIÓN CATASTRO PÚBLICO DE AGUAS DGA 97

3.3.1 Revisión información catastro de terreno 99
3.3.2 Información de Uso del agua 102
3.3.3 Información de Nivel de agua 103
3.3.4 Parámetros Físico-Químicos 105
3.3.5 Características de captaciones 106
3.3.6 Corrección de la base de datos del Catastro Público de Aguas usando información de terreno 106
3.3.7 Revisión de expedientes en Juzgado de Letras y Conservador de Bienes Raíces CBR 106
3.3.8 Revisión información adicional 108

3.4 DETERMINACIÓN DE DEMANDAS Y CONSUMOS 108

3.4.1 Evolución temporal de Derechos de Agua 108
3.4.2 Determinación de demanda en función de los datos de terreno 111
3.4.3 Evolución temporal de demanda por sector 112
3.4.4 Comentarios y conclusiones 133

4 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA 135

4.1 SISTEMAS DE DRENAJE 135

4.1.1 Cuenca del río Imperial 139
4.1.2 Cuenca del río Toltén 140

4.1.3 Cuenca del río Budi 143
4.1.4 Cuenca Costera entre río Budi y río Toltén 144
4.1.5 Cuenca río Queule 145
4.2 CARACTERIZACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE LAS CUENCAS 146
4.2.1 Estaciones pluviométricas seleccionadas 147
4.2.2 Corrección y relleno de estadísticas pluviométricas 151
4.2.3 Análisis de precipitaciones 156
4.2.4 Conclusiones pluviometría 172
4.3 CARACTERIZACIÓN FLUVIOMÉTRICA DE LAS CUENCAS 172
4.3.1 Estaciones fluviométricas seleccionadas 173
4.3.2 Corrección y relleno de estadísticas fluviométricas 177
4.3.3 Análisis de caudales 181
4.3.4 Conclusiones fluviometría 189
4.4 CARACTERIZACIÓN DE EVAPORACIÓN DE LAS CUENCAS 190
4.4.1 Estaciones evaporimétricas seleccionadas 190
4.4.2 Corrección y relleno de estadísticas evaporimétricas 193
4.4.3 Análisis de evaporación 198
4.4.4 Conclusiones evaporación 201
4.5 CARACTERIZACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE LA TEMPERATURA MEDIA EN LAS CUENCAS 202
4.5.1 Estaciones seleccionadas 202
4.5.2 Corrección y relleno de estadísticas de temperatura 205
4.5.3 Análisis de Temperaturas 211
4.5.4 Calculo de la evapotranspiración a partir de la temperatura 215
4.5.5 Conclusiones de evapotranspiración a partir de la temperatura media en las cuencas 217
5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA 218
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 218
5.1.1 Cuenca del río Imperial 218
5.1.2 Cuenca del río Toltén 219
5.1.1 Cuencas costeras 220
5.2 HIDROLOGÍA APLICADA A LA MODELACIÓN 224
5.2.1 Relleno de información faltante 224
5.2.2 Separación del flujo base 224
5.2.3 Transposición de caudales 226
5.3 MODELO HIDROLÓGICO EXTEND 228
5.3.1 Módulos de modelación y parámetros 229
5.3.2 Unidad de procesos hidrológicos 231
5.3.3 Datos de entrada del modelo 232
5.3.4 Variables de salida del modelo 233
5.3.5 Topología de red hídrica 233
5.3.6 Supuestos para la construcción del modelo 234
5.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO 236
5.5 VALIDACIÓN DEL MODELO 243

5.6 APLICACIÓN DEL MODELO 246
5.6.1 Río Imperial 246
5.6.2 Río Toltén 248
5.6.3 Cuencas costeras 250
5.6.4 Recarga regional 251
5.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 253
5.8 COMENTARIOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA 255
6 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y GEOLÓGICA 256
6.1 MARCO GEOMORFOLÓGICO REGIONAL 256
6.1.1 Cordillera de los Andes 256
6.1.2 Depresión Intermedia 258
6.1.3 Cerros de Ñielol 258
6.1.4 Cordillera de la Costa 258
6.1.5 Llanuras Fluviomarinas 258
6.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL 259
6.2.1 Geología de Superficie 262
6.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 278
6.3.1 Deformación dúctil a frágil-dúctil y frágil de Complejos Metamórficos 278
6.3.2 Zona de Falla Lanalhue 278
6.3.3 Zona de Fallas Liquiñe-Ofqui y falla Reigolil-Pirehueico 279
6.3.4 Zona de Falla Mocha-Villarrica 279
6.4 GEOLOGÍA DE SUBSUPERFICIE 280
6.4.1 Análisis Regional 280
6.4.2 Análisis Local 287
7 ESTUDIO GEOFÍSICO 290
7.1 CAMPAÑA GRAVIMÉTRICA 290
7.1.1 Especificaciones Técnicas 290
7.1.2 Metodología de trabajo 291
7.1.3 Resultados 292
7.2 CAMPAÑA TEM 296
7.2.1 Metodología de trabajo 296
7.2.2 Resultados 296
8 HIDROQUÍMICA 299
8.1 CAMPAÑAS DE TERRENO 299
8.1.1 Campaña 1 301
8.1.2 Campaña 2 301
8.1.3 Campaña 3 301
8.1.4 Campaña 4 301
8.2 VALIDACIÓN DE DATOS HIDROQUÍMICOS 304
8.2.1 Diagramas hidroquímicos 307

8.3 ANÁLISIS HIDROQUÍMICA AGUAS SUPERFICIALES 308
8.3.1 Parámetros físico químicos 308
8.3.2 Caracterización composicional (diagramas de Piper) 310
8.3.3 Distribución espacial (diagramas de Stiff) 317
8.4 ANÁLISIS HIDROQUÍMICA AGUAS SUBTERRÁNEAS 324
8.4.1 Parámetros físico químicos 324
8.4.2 Caracterización composicional (diagramas de Piper) 324
8.4.3 Distribución espacial (diagramas de Stiff) 329
8.5 CALIDAD DE LAS AGUAS 334
8.5.1 Agua de riego 336
8.5.2 Agua potable 340
8.6 ESTIMACIÓN DE LA RECARGA UTILZIANDO CL ATMOSFÉRICO 344
8.6.1 Marco teórico 344
8.6.2 Metodología y resultados 346
8.7 ANÁLISIS ISOTÓPICO 348
8.7.1 Metodología 348
8.7.2 Resultados 348
8.8 PROPUESTA NUEVAS ESTACIONES DE MONITOREO 354
8.9 CONCLUSIONES 354
9 CONCEPTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA 358
9.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS 358
9.1.1 Depósitos No Consolidados Actuales (UH 1) 358
9.1.2 Depósitos No Consolidados Antiguos (UH 2) 358
9.1.3 Depósitos Volcano-sedimentarios (UH 3) 359
9.1.4 Secuencias Volcánicas (UH 4) 359
9.1.5 Depósitos Consolidados (UH 5) 359
9.1.6 Basamento (UH 6) 360
9.2 PROPIEDADES HIDRÁULICAS 362
9.2.1 Análisis de Pruebas de Bombeo desde Expedientes 362
9.2.2 Campañas de Pruebas de Bombeo 365
9.2.3 Propiedades Hidráulicas 370
9.3 NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 374
9.3.1 Isoprofundidades de Aguas Subterráneas 374
9.3.2 Superficie Piezométrica 377
9.4 HIDROQUÍMICA 380
9.5 MODELO HIDROLÓGICO 3D 380
9.5.1 Interpretación de perfiles TEM en el Modelo Hidrogeológico 380
9.5.2 Construcción del Modelo Hidrogeológico 3D 391
9.5.3 Síntesis y traspaso al modelo numérico 395
9.6 BALANCE HIDROGEOLÓGICO 397

9.6.1 Ingresos 397
9.6.2 Salidas 400
9.6.3 Interacción río-acuífero 400
9.6.4 Resumen balance hidrogeológico 401
9.7 RED DE MONITOREO DEFINTIIVA 402
10 MODELO NUMÉRICO – CUENCAS RÍO IMPERIAL Y TOLTÉN 405
10.1 GENERALIDADES 405
10.2 DOMINIO DE MODELACIÓN Y LÍMITES IMPERMEABLES 405
10.3 CÓDIGO DE MODELACIÓN 409
10.4 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL 410
10.4.1 Discretización Espacial 410
10.4.2 Discretización Temporal 418
10.5 PROPIEDADES HIDRÁULICAS 418
10.6 CONDICIONES DE BORDE 424
10.6.1 Flujos laterales subterráneos 424
10.6.2 Recarga Superficial 429
10.6.3 Lagos 433
10.6.4 Cauces Superficiales 433
10.7 EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS 436
10.8 CONDICIÓN INICIAL 438
10.9 PARÁMETROS NUMÉRICOS MOTOR DE FLUJO 439
10.10 CALIBRACIÓN MODELO DE FLUJO 441
10.10.1 Estrategia de Calibración 441
10.10.2 Patrón de Calibración 441
10.11 RESULTADOS 445
10.11.1 Componentes y error del Balance de Masas 445
10.11.2 Residuales y Estadígrafos de Calibración 448
10.11.3 Niveles Observados vs Modelados 450
10.11.4 Sensibilización de la recarga 451
10.11.5 Piezometría en régimen permanente 456
10.12 OPERACIÓN DEL MODELO 462
10.12.1 Coeficiente de Almacenamiento 462
10.12.2 Escenarios de Simulación 467
10.12.3 Criterios para la Evaluación de Sustentabilidad de de Escenarios 468
10.12.4 Caudal Óptimo Sustentable 473
10.13 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES 474
11 RESULTADOS TERCER TALLER INFORMATIVO 476
11.1 OBJETIVO 476
11.2 METODOLOGÍA DE LOS TALLERES INFORMATIVOS 476
11.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES 477

11.4 CUARTO Y ÚLTIMO TALLER 478
12 RESUMEN Y CONCLUSIONES 479
13 RECOMENDACIONES 487

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Cuencas en estudio de la región de la Araucanía (WGS84, Huso 18) 22
Figura 2-1: Estaciones fluviométricas analizadas en la región de La Araucanía 29
Figura 2-2: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Temuco-Nueva Imperial, escala 1:100.000 33
Figura 2-3: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Pucón-Curarrehue, escala 1:100.000 34
Figura 2-4: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Queule − Toltén, escala 1:100.000 36
Figura 2-5: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Villarrica-Huiscapi, escala 1:100.000 37
Figura 2-6: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Lanco-Loncoche, escala 1:100.000 39
Figura 2-7: Área de estudio incluida en la Carta Geológica Mapa de Recursos Subterráneos, área Temuco, escala 1:100.000 41
Figura 2-8: Área de estudio incluida en la Hoja Curacautín, escala 1:250.000. 42
Figura 2-9: Ubicación de Pozos ENAP construidos en la región de la Araucanía 45
Figura 2-10: Perfil Geológico entre el pozo F y cerro Callulafquen (Fuente ENAP) 50
Figura 2-11: Mapa Isobático del Basamento, Labranza (Fuente ENAP, 1971) 52
Figura 2-12: Mapa Isobático del Basamento, Boroa-Cautín (Fuente ENAP, 1972) 53
Figura 2-13: Mapa Isobático del Basamento, Cholchol (Fuente ENAP, 1972) 54
Figura 2-14: Mapa Isobático del Basamento, Toltén − Lago Budi (Fuente ENAP, 1973) . 55
Figura 2-15: Mapa de ubicación de diversos tipos de remosiones en masa en la región de la Araucanía, (modificado de Hauser, 2000) 63
Figura 2-16: Mapa de ubicación de pozos con información de expedientes 73
Figura 2-17: Mapa de ubicación de estaciones de monitoreo de variables meteorológicas e hidrológicas de la DGA 77
Figura 2-18: Ubicación de estaciones de calidad de aguas superficiales de la DGA 78
Figura 3-1: Distribución espacial de captaciones a visitar en catastro 86
Figura 3-2: Territorios y equipos definidos para el catastro de captaciones 87
Figura 3-3: Fotografías de aplicación de encuesta de uso y mediciones 90
Figura 3-4: Encuesta de uso con información recogida en terreno 91
Figura 3-5: Captaciones catastradas 96
Figura 3-6: Caudal de derechos subterráneos de acuerdo a uso 99
Figura 3-7: Captaciones visitadas en terreno, agrupadas en someras y profundas 101
Figura 3-8: Caudal por uso de acuerdo a profundidad de captación 103
Figura 3-9: Nivel Estático en pozos Profundos 104
Figura 3-10: Nivel Dinámico en Pozos Profundos 104

Figura 3-11: Nivel Estático en pozos Someros 105
Figura 3-12: Nivel Dinámico en pozos Someros 105
Figura 3-13: Evolución de Derechos Subterráneos Totales Otorgados en el área de estudio, período 1977-2013 109
Figura 3-14: Evolución de Solicitudes de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas Totales en el área de estudio, período 1977-2013 109
Figura 3-15: Evolución de Derechos Subterráneos Totales Otorgados, por cuencas del área de estudio, período 1977-2013 110
Figura 3-16: Evolución de Solicitudes de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas, por cuencas del área de estudio, período 1977-2013 111
Figura 3-17. Ubicación localidades con sistemas de agua potable concesionado 116
Figura 3-18. Ubicación localidades con sistemas actuales de agua potable rural 121
Figura 3-19. Sectorización utilizada para la determinación de la demanda de riego 124
Figura 3-20. Evolución de la superficie de riego Río Imperial 131
Figura 3-21. Evolución de la superficie de riego Río Toltén 132
Figura 4-1: Cuencas delimitadas por modelo (DEM) y Cuencas definidas por DGA 136
Figura 4-2: Curvas hipsométrica cuencas de estudio 138
Figura 4-3: Cuenca del río Imperial y subcuencas 141
Figura 4-4: Cuenca Río Toltén y subcuencas 143
Figura 4-5: Cuenca Río Budi 144
Figura 4-6: Cuenca costera entre Río Budi y Río Toltén 145
Figura 4-7: Cuenca Río Queule 146
Figura 4-8. Disponibilidad de datos en estaciones pluviométricas con registros de precipitación mensual (Azul: 12 datos, Rojo: entre 10 y 11 datos, Verde: entre 7 y 9 datos, Amarillo: entre 1 y 6 datos por año). 149
Figura 4-9. Distribución estaciones pluviométricas con registros de precipitación mensual seleccionadas 150
Figura 4-10. Estaciones que presentaron problemas de consistencia según método de la elipse para las series de precipitaciones anuales. 151
Figura 4-11. Series de Pp anual en estaciones más utilizadas para rellenar. (mm) 155
Figura 4-12. Precipitaciones anuales en función de la altura de la estación 157
Figura 4-13. Curvas isoyetas de precipitaciones anuales promedio (mm) 158
Figura 4-14. Curvas isoyetas del promedio de precipitaciones en invierno (mm) 159
Figura 4-15. Curvas isoyetas de precipitaciones promedio en verano (mm) 160
Figura 4-16. Distribución de isolíneas de correlación espacial de la precipitación mensual con estación Los Laureles (P33) 162
Figura 4-17. Precipitaciones para diferentes probabilidades en estaciones pluviométricas del área de estudio (mm). 164
Figura 4-18. Disponibilidad de datos en estaciones fluviométricas con registros de caudal medio mensual (Azul: 12 datos, Rojo: entre 10 y 11 datos, Verde: entre 7 y 9 datos, Amarillo: entre 1 y 6 datos por año) 175
Figura 4-19. Distribución estaciones fluviométricas con registros de caudales medios mensuales 176

Figura 4-20. Series de caudal anual desde 1920 a 2012 en estaciones más utilizadas para rellenar. (m^3/s) 180
Figura 4-21. Producción especifica en función de la altura del centroide de la cuenca aportante a la estación fluviométrica. 183
Figura 4-22. Caudales para diferentes probabilidades en estaciones ubicadas en la región de la Araucanía (m^3/s). 184
Figura 4-23. Disponibilidad de datos en estaciones con registros de evaporación mensual (Azul: 12 datos, Rojo: entre 10 y 11 datos, Verde: entre 7 y 9 datos, Amarillo: entre 1 y 6 datos por año) 191
Figura 4-24. Distribución estaciones con registros de evaporación mensual 192
Figura 4-25. Isolíneas de evaporación anual 195
Figura 4-26. Isolíneas de evaporación en invierno 196
Figura 4-27. Isolíneas de evaporación en verano 197
Figura 4-28. Evaporación anual en función de la altura de la estación 198
Figura 4-29. Evaporación potencial mensual para diferentes probabilidades en estaciones del área de estudio (mm). 200
Figura 4-30. Disponibilidad de datos en estaciones con registros de temperatura mensual (Azul: 12 datos, Rojo: entre 10 y 11 datos, Verde: entre 7 y 9 datos, Amarillo: entre 1 y 6 datos por año) 203
Figura 4-31. Distribución estaciones con registros de temperatura mensual 204
Figura 4-32. Isolíneas de temperatura media anual 208
Figura 4-33. Isolíneas de temperatura media en invierno 209
Figura 4-34. Isolíneas de temperatura media en verano 210
Figura 4-35. Temperatura anual en función de la altura de la estación 211
Figura 4-36. Temperatura mensual para diferentes probabilidades en estaciones del área de estudio (°C). 212
Figura 5-1. Distribución de zonas de riego en cuenca del río Imperial 221
Figura 5-2. Distribución de zonas de riego en cuenca del río Toltén 222
Figura 5-3. Distribución de zonas de riego en cuencas costeras 223
Figura 5-4: Separación del flujo base (FB) de la escorrentía total en la estación Q24 para el período ene-80 a feb-2013 (a) y ene-90 a dic-04 (b) 226
Figura 5-5: Caudales transpuesto utilizados como datos de entradas para el modelo hidrológico 228
Figura 5-6: Vista esquemática de los procesos que ocurren en una zona de riego 230
Figura 5-7: Unidad de procesos hidrológicos 232
Figura 5-8. Topología del modelo de la cuenca del río Imperial 235
Figura 5-9. Topología del modelo de la cuenca del río Toltén 236
Figura 5-10: Calibración estación Q11 239
Figura 5-11: Calibración estación Q15 240
Figura 5-12: Calibración estación Q28 240
Figura 5-13: Calibración flujo base estación a) Q14, b) Q17, c) Q18, d) Q19, e) Q23, f) Q24 y g) Q27 242
Figura 5-14: Calibración flujo base estación a) Q25, b) Q26 243
Figura 5-15: Validación del flujo total 244

Figura 5-16: Validación del flujo base....245
Figura 5-17: Subcuencas de la cuenca del río Imperial....248
Figura 5-18: Subcuencas de la cuenca del río Toltén....250
Figura 5-19: Cuencas costeras de la región de la Araucanía....251
Figura 5-20: Sectorización acuífera, Región de La Araucanía....252
Figura 6-1: Unidades Morfoestructurales de la zona de estudio....257
Figura 6-2: Perfil Geomorfológico Latitudinal de la zona de estudio....257
Figura 6-3: Distribución de las cartas geológicas en la región de la Araucanía....260
Figura 6-4: Mapa Geológico de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia....261
Figura 6-5: Perfil Geológico Regional A-A' y Local 1-1'de la cuenca del río Imperial (REF 10-P, Sernageomin, 2010; REF 16-P, Sernageomin, 1997)....282
Figura 6-6: Perfil Geológico Local 2-2' de la cuenca del río Imperial....283
Figura 6-7: Perfil Geológico de la cuenca del río Toltén (REF 11-P; Sernageomin,2008)285
Figura 6-8: Perfil Geológico del área Queule-Toltén (modificado de REF 12-P; Sernageomin,2008)....286
Figura 6-9: Distribución de Pozos con estratigrafía en el área de estudio....288
Figura 6-10: Relleno sedimentario del área de estudio....289
Figura 7-1: Estaciones gravimétricas utilizadas en la inversión "tipo cuenca", para la estimación de la profundidad del basamento....293
Figura 7-2: Mapas de profundidad y elevación de basamento....295
Figura 7-3: Ubicación de estaciones TEM levantadas en terreno y perfiles representativos interpretados....298
Figura 8-1: Distribución temporal de las campañas de terreno....300
Figura 8-2: Mapa con puntos de muestreo hidroquímico....302
Figura 8-3: Mapa con puntos de muestreo isotópico....303
Figura 8-4: Error de balance iónico en relación a la C.E....304
Figura 8-5: Diagramas de Schoeller para muestras duplicadas de campaña 1....305
Figura 8-6: Diagramas de Schoeller para muestras duplicadas de campaña 2....306
Figura 8-7: Representación gráfica de la concentración relativa de iones en un diagrama de Piper (modificado de Custodio y Llamas, 1983)....307
Figura 8-8: Ejemplos de concentraciones químicas según diagramas de Stiff y Stiff modificado....308
Figura 8-9: Relación pH y TDS en muestras de aguas superficiales....309
Figura 8-10: Relación pH y CE in situ para muestras de precipitaciones....309
Figura 8-11: Diagrama de Piper para aguas superficiales....310
Figura 8-12: Aguas superficiales de la campaña 1 en cuenca del río Imperial....311
Figura 8-13: Aguas superficiales de la campaña 2 en cuenca del río Imperial....311
Figura 8-14: Aguas superficiales de la campaña 3 en cuenca del río Imperial....312
Figura 8-15: Aguas superficiales de la campaña 4 en cuenca del río Imperial....313
Figura 8-16: Aguas superficiales de la campaña 1 en cuenca del río Toltén....313
Figura 8-17: Aguas superficiales de la campaña 2 en cuenca del río Toltén....314
Figura 8-18: Aguas superficiales de la campaña 3 en cuenca del río Toltén....314
Figura 8-19: Aguas superficiales de la campaña 4 en cuenca del río Toltén....315

Figura 8-20: Aguas superficiales de la campaña 1 en cuencas costeras y cuenca del río Budi. 315
Figura 8-21: Aguas superficiales de la campaña 2 en cuencas costeras y cuenca del río Budi. 316
Figura 8-22: Aguas superficiales de la campaña 3 en cuencas costeras y cuenca del río Budi. 316
Figura 8-23: Aguas superficiales de la campaña 4 en cuencas costeras y cuenca del río Budi. 317
Figura 8-24: Comparación de precipitaciones en P28 (2014- 2015) con registro histórico de precipitaciones en la misma estación. 319
Figura 8-25: Mapa con diagramas de Stiff para aguas superficiales de campaña 1. 320
Figura 8-26: Mapa con diagramas de Stiff para aguas superficiales de campaña 2. 321
Figura 8-27: Mapa con diagramas de Stiff para aguas superficiales de campaña 3. 322
Figura 8-28: Mapa con diagramas de Stiff para aguas superficiales de campaña 4. 323
Figura 8-29: Relación pH y TDS para los distintos tipos de pozos. 324
Figura 8-30: Diagrama de Piper para aguas subterráneas. 325
Figura 8-31: Pozos someros de la campaña 1 en cuenca del río Imperial. 325
Figura 8-32: Pozos someros de la campaña 3 en cuenca del río Imperial. 326
Figura 8-33: Pozos profundos de la campaña 2 en cuenca del río Imperial. 326
Figura 8-34: Pozos someros de la campaña 1 en cuenca del río Toltén. 327
Figura 8-35: Pozos someros de la campaña 3 en cuenca del río Toltén. 327
Figura 8-36: Pozos profundos de la campaña 2 en cuenca del río Toltén. 328
Figura 8-37: Pozos someros y profundos de las cuencas costeras y cuenca del río Budi. 328
Figura 8-38: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de pozos someros campaña 1. 331
Figura 8-39: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de pozos profundos campaña 2. 332
Figura 8-40: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de pozos someros campaña 3. 333
Figura 8-41: Puntos de muestreo que exceden Fe de la NCh 1333. 337
Figura 8-42: Puntos de muestreo que exceden Mn de la NCh 1333. 338
Figura 8-43: Puntos de muestreo que exceden coliformes fecales CF de la NCh 1333. 339
Figura 8-44: Puntos de muestreo que exceden Fe de la NCh 409. 341
Figura 8-45: Puntos de muestreo que exceden Mn de la NCh 409. 342
Figura 8-46: Puntos de muestreo que exceden coliformes totales CT de la NCh 409. 343
Figura 8-47: Colector de precipitaciones instalado en terreno. 348
Figura 8-48: Relación isotópica δ18O-δ2H (‰) para muestras de precipitación, agua superficial y pozos profundos de campaña 2. 349
Figura 8-49: Relación isotópica δ18O-δ2H (‰) para muestras de agua superficial de campaña 4. 350
Figura 8-50: Gradiente isotópico ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) altitudinal obtenido de regresión lineal de muestras de precipitaciones. 351

Figura 8-51: Relación altitud y composición isotópica para todas las muestras del estudio. La línea continua indica el gradiente isotópico ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) altitudinal. En línea segmentada roja se muestran las aguas que se habrían recargado a mayor altitud. 352
Figura 8-52: Esquema de modelo conceptual de flujo con mezcla exponencial. 352
Figura 8-53: Ubicación de los puntos de muestreo en relación a bandas de altura geográfica. 353
Figura 8-54: Sectores propuestos para ampliar red de monitoreo actual. 355
Figura 8-55: Efecto de la cercanía al mar en la salinidad de las muestras hidroquímicas. 356
Figura 8-56: Relación Ca y HCO3 para aguas superficiales (izq.) y subterráneas (der.). 357
Figura 9-1: Mapa y Perfiles Hidrogeológicos de la zona de estudio 361
Figura 9-2: Ubicación de pozos para las pruebas de bombeo en pozos en el área de estudio 364
Figura 9-3: Ubicación de pozos con pruebas de bombeo efectuadas para este estudio .366
Figura 9-4: Prueba de gasto variable pozo O-38 367
Figura 9-5: Prueba de gasto constante pozo O-38 367
Figura 9-6: Ejemplo de ajuste de prueba de bombeo de gasto constante y de recuperación pozo O-38. Método de Jacob. 368
Figura 9-7: Histograma de conductividades hidráulicas (k) de UH-1, UH-2 y UH-3 para toda el área de estudio 371
Figura 9-8: Distribución espacial de la permeabilidad en el área de estudio 372
Figura 9-9: Distribución espacial de la transmisividad en el área de estudio 373
Figura 9-10: Mapa de Isoprofundidades del agua subterránea para pozos profundos ..375
Figura 9-11: Mapa de Isoprofundidades del agua subterránea para pozos Someros 376
Figura 9-12: Superficie Piezométrica para pozos Profundos 378
Figura 9-13: Superficie Piezométrica para pozos Someros 379
Figura 9-14: Planta de Ubicación de Perfiles TEM 381
Figura 9-15: Perfil Resistivo IMP-23, zona de Traiguén 383
Figura 9-16: Perfil Resistivo IMP-31, zona de Lautaro-Victoria 384
Figura 9-17: Perfil Resistivo IMP-52, zona de Lautaro-Victoria 385
Figura 9-18: Perfil Resistivo IMP-44, zona de Labranza 387
Figura 9-19: Perfil Resistivo IMP-53, zona de Labranza 388
Figura 9-20: Perfil Resistivo TOL-11, zona de Villarrica 389
Figura 9-21: Perfil Resistivo TOL-21, zona de Villarrica 390
Figura 9-22: Vista en 3D del volumen de la UH6 391
Figura 9-23: Vista en 3D del volumen de la UH5 392
Figura 9-24: Vista en 3D del volumen de la UH4 393
Figura 9-25: Vista en 3D del volumen de la UH3 394
Figura 9-26: Vista en 3D del volumen de la UH2 394
Figura 9-27: Vista en 3D del volumen de la UH1 394
Figura 9-28: Distribución de las unidades hidrogeológicas que se utilizarán en el modelo numérico de flujos 396

Figura 9-29: Ingreso desde cursos superficiales 398
Figura 9-30: Red de Monitoreo Definitiva 404
Figura 10-1: Evaluación de distintos dominios para modelo de ambas cuencas 406
Figura 10-2: Dominio del modelo numérico 408
Figura 10-3: Discretización espacial en planta − vista general 412
Figura 10-4: Discretización en planta modelo numérico − Acercamiento a río Tolten ... 413
Figura 10-5: Discretización en planta del modelo numérico − Acercamiento a río Allipén en Temuco − grilla con *quadtree* suavizado 414
Figura 10-6: Discretización vertical modelo numérico en fila 236 (Exag. Vert. 55x) 415
Figura 10-7: Discretización vertical modelo numérico en columna 265 (Exag. Vert. 55x) 416
Figura 10-8: Vista 3D de la celdas activas y su discretización en planta (Exag. Vert. 15X) 417
Figura 10-9: Distribución inicial de conductividades hidráulicas iniciales 420
Figura 10-10: Distribución de conductividades hidráulicas calibradas en el modelo. Capa 1 421
Figura 10-11: Distribución de conductividades hidráulicas calibradas en el modelo. Capa 2 422
Figura 10-12: Distribución de conductividades hidráulicas calibradas en el modelo. Capa 3 423
Figura 10-13: Distribución de la condición de borde CHD en el modelo numérico. Capa 1 425
Figura 10-14: Distribución de la condición de borde CHD en el modelo numérico. Capa 3 426
Figura 10-15: Zonas de recarga superficial fuera del dominio que generan recarga lateral hacia el oeste 428
Figura 10-16: Zonas de recarga superficial adoptadas en la zona modelada (WGS84, Huso 18S) 430
Figura 10-17: Pozos de recarga en el sector de la cordillera de la costa hacia el norte de Temuco 431
Figura 10-18: Pozos de recarga en el sector de la cordillera de la costa hacia el norte de Temuco tras la calibración del modelo. 433
Figura 10-19: Localización de celdas River (ríos de orden 4) y celdas Drain (ríos de orden 2 y 3) 435
Figura 10-20: Perfil longuitudinal del segmento 1 del cauce 436
Figura 10-21: Pozos de bombeo en catastro e ingresados al modelo numérico 437
Figura 10-22: Participación en caudal y número de pozos, por tipo de uso de las captaciones efectivamente ingresadas al modelo numérico. 438
Figura 10-23: Condición inicial utilizada en el modelo numérico en m.s.n.m. 439
Figura 10-24: : Configuración del paquete SMS y el solver xMD 440
Figura 10-25: Pozos utilizados en la calibración para la capa 3 443
Figura 10-26: Pozos de observación utilizados en la calibración del modelo. 444
Figura 10-27: Niveles observados vs simulados − calibración régimen permanente 450
Figura 10-28: Histograma de residuales 451

Figura 10-29: Distribución del aumento de residual con un aumento del 20% de la recarga 453
Figura 10-30: Distribución del aumento de residual con un aumento del 30% de la recarga 455
Figura 10-31: Piezometría en régimen permanente en la capa 1 457
Figura 10-32: Piezometría en régimen permanente en la capa 2 458
Figura 10-33: Piezometría en régimen permanente en la capa 3 459
Figura 10-34: Esquema de relación río-acuífero (Tomado de Winter et al., 1998) 460
Figura 10-35: Piezometría en régimen permanente en el sector central del río Toltén en la capa 1 461
Figura 10-36: Distribución porosidad eficaz (*Specific Yield*) en la capa 1 464
Figura 10-37: Distribución porosidad eficaz (*Specific Yield*) en la capa 2 465
Figura 10-38: Distribución porosidad eficaz (*Specific Yield*) en la capa 3 466

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:Superficie Cuencas Río Imperial, Toltén, Queule, Budi y Costeras entre río Budi y río Toltén. 21
Tabla 2-1: Estudios recopilados para el desarrollo del estudio 23
Tabla 2-2: Red de monitoreo propuesta por estudio Conic BF Ingenieros Civiles Consultores Diciembre 2010 27
Tabla 2-3: Niveles estáticos y principales características de pozos 30
Tabla 2-4: Datos de los piezómetros construidos en la IX región de la Araucanía. Todas las coordenadas se expresan en Datum WGS 84 31
Tabla 2-5: Características de los pozos perforados por ENAP 46
Tabla 2-6: Recopilación de trabajos de gravimetría realizados por ENAP 51
Tabla 2-7: Características de las hoyas hidrográficas de los ríos de la Región de La Araucanía 57
Tabla 2-8: Cuadro resumen con trabajos de Sísmica en el área de estudio (Fuente ENAP) 65
Tabla 2-9: Disponibilidad mensual de aguas superficiales para uso consuntivo 66
Tabla 2-10: Evolución de la superficie de riego, 1997-2007 por sistema de riego 66
Tabla 2-11: Inversión en Ejecución periodo 2010-2012 68
Tabla 2-12: Viviendas de Agua Potable y Proyección 68
Tabla 2-13: Información de plantas potabilizadoras de agua 69
Tabla 2-14: Nº de derechos y caudal asociado (L/s) según naturaleza del agua 70
Tabla 2-15: Nº de derechos y caudal asociado (L/s) según tipo y ejercicio del derecho. 71
Tabla 2-16: Nº de derechos y caudal asociado (L/s) para solicitudes en trámite según naturaleza del agua 72
Tabla 2-17. Información general de estaciones meteorológicas, fluviométricas y de medición de niveles de lago 74
Tabla 2-18: Estaciones con calidad de aguas superficiales de la DGA, en las cuencas estudiadas (wgs84, 18S) 79
Tabla 2-19: Resumen de Información Cartográfica que se utilizará en este estudio 80
Tabla 3-1: N° de captaciones a visitar por territorios. 88

Tabla 3-2: Catastro de captaciones, por territorio 95
Tabla 3-3. Síntesis de información de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados y en trámite..... 98
Tabla 3-4. Derechos otorgados de aguas subterráneas de acuerdo a uso. 98
Tabla 3-5. Solicitudes en trámite de aguas subterráneas de acuerdo a uso. 99
Tabla 3-6. Captaciones catastradas clasificadas en someras y profundas 100
Tabla 3-7. Derechos de aguas subterráneas de acuerdo a uso informado en terreno ...102
Tabla 3-8. Uso de agua de acuerdo a profundidad de la captación 103
Tabla 3-9. Parámetros físico-químicos 106
Tabla 3-10. Factores de uso determinados en base al catastro 112
Tabla 3-11. Caudal de uso de agua subterránea 112
Tabla 3-12. Fuentes de información para la demanda de agua potable 113
Tabla 3-13. Fuentes de explotación para cada sector 114
Tabla 3-14. Evolución temporal de la demanda de agua superficial para agua potable en sistema concesionado 117
Tabla 3-15. Evolución temporal de la demanda de agua subterránea para agua potable en sistema concesionado 118
Tabla 3-16. Demanda actual de sistemas de agua potable rural existentes según fuente de abastecimiento 119
Tabla 3-17. Demanda proyectada de sistemas de agua potable rural existentes, proyectos en diseño y prefactibilidad, según fuente de abastecimiento.....122
Tabla 3-18. Demanda histórica, actual y proyectada del sector agua potable 123
Tabla 3-19. Estructura de los cultivos en la cuenca del río Imperial.....125
Tabla 3-20. Estructura de los cultivos en la cuenca del río Toltén.....126
Tabla 3-21. Demandas de riego cuenca Río Imperial para la situación actual.....128
Tabla 3-22. Demandas de riego cuenca Río Toltén para la situación actual.....129
Tabla 3-23. Evolución de las superficies regadas entre el año 1997 y 2007 para el río Imperial. 131
Tabla 3-24. Evolución de las superficies regadas entre el año 1997 y 2007 para el río Toltén. 132
Tabla 3-25. Demandas de agua superficial en (l/s) estimada por sector productivo 134
Tabla 3-26. Demandas de agua subterránea en (l/s) estimada por sector productivo ..134
Tabla 4-1: Hipsometría cuenca Río Imperial y cuenca Río Toltén.....137
Tabla 4-2: Hipsometría cuencas costeras.....137
Tabla 4-3: Características morfológicas Subcuencas de Río Imperial 139
Tabla 4-4: Características Subcuencas de Río Toltén 141
Tabla 4-5: Características de las estaciones pluviométricas seleccionadas.....147
Tabla 4-6: Características de las relaciones de precipitaciones mensuales para el relleno de datos faltantes.....153
Tabla 4-7: Promedios de las series de precipitación (mm).....155
Tabla 4-8: Características de las estaciones fluviométricas seleccionadas. 173
Tabla 4-9: Características de las relaciones de caudales mensuales para el relleno de datos faltantes. 178

Tabla 4-10: Promedios de las series de caudales (m^3/s). 180
Tabla 4-11: Comparación de caudales del BHN con el presente estudio. (m^3/s). 181
Tabla 4-12: Producciones específicas de las cuencas aportantes a las estaciones fluviométricas ($L/s/Km^2$).....182
Tabla 4-13: Características de las estaciones evaporimétricas seleccionadas. 190
Tabla 4-14: Características de las relaciones de evaporación mensual para el relleno de datos faltantes. 193
Tabla 4-15: Promedios de las series de evaporación (mm).....194
Tabla 4-16: Características de las estaciones de temperatura seleccionadas. 202
Tabla 4-17: Características de las relaciones de temperaturas mensuales para el relleno de datos faltantes.....205
Tabla 4-18: Promedios de las series de temperatura (°C). 206
Tabla 4-19: Evapotranspiración anual media calculada a partir de la temperatura (mm). 216
Tabla 4-20: Comparación de evapotranspiración anual media calculada a partir de la temperatura y a partir de la evaporación de tanque (mm). 217
Tabla 5-1: Datos de zonas de riego en cuenca del río Imperial. 219
Tabla 5-2: Datos de zonas de riego en cuenca del río Toltén. 219
Tabla 5-3: Datos de zonas de riego en cuencas costeras. 220
Tabla 5-4: Ajuste del parámetro de separación de flujo base (*K*) 226
Tabla 5-5: Información de cuencas para transposición de caudales.....227
Tabla 5-6: Ajuste de parámetros durante la calibración. 237
Tabla 5-7: Calibración del modelo hidrológico en la cuenca del río Imperial.....238
Tabla 5-8: Validación del modelo hidrológico en la cuenca del río Toltén.....243
Tabla 5-9: Balance hídrico por zona de riego para la cuenca del río Imperial. 246
Tabla 5-10: Estimación de recarga en la cuenca del río Imperial divido por subcuencas. 247
Tabla 5-11: Balance hídrico por zona de riego para la cuenca del río Toltén. 249
Tabla 5-12: Estimación de recarga en la cuenca del río Toltén divido por subcuencas..249
Tabla 5-13: Balance hídrico para las cuencas costeras de la región de la Araucanía. ...250
Tabla 5-14: Comparación de estimación de recarga con estudio DGA (2014) 253
Tabla 5-15: Variabilidad de parámetros para el análisis de sensibilidad. 254
Tabla 5-16: Análisis de sensibilidad con respecto a la estimación de recarga.....254
Tabla 5-17: Estimación de recarga con el parámetro *Ce* variable. 254
Tabla 7-1: Especificaciones Técnicas Gravímetro Scinetrex CG-5 290
Tabla 7-2: Especificaciones Técnicas Magellan GPS- Promark 500 (Base & Rover).....291
Tabla 8-1: Cantidad y tipo de muestras tomadas en cada campaña. 301
Tabla 8-2: Límites máximos establecidos por la NCh 1333. 334
Tabla 8-3: Límites máximos establecidos por la NCh 409.....335
Tabla 8-4: Datos obtenidos de los colectores de precipitaciones 346
Tabla 8-5: Cálculo de recarga utilizando Cl en pozos someros cercanos de campaña 1 347
Tabla 9-1: Pozos con pruebas de bombeo desde expedientes.....362
Tabla 9-2: Pozos con pruebas de bombeo realizadas en Campaña de terreno.....365

Tabla 9-3: Resumen de la estimación de los parámetros elásticos 369
Tabla 9-4: Propiedades Hidráulicas para pozos en la cuenca del río Imperial 370
Tabla 9-5: Propiedades Hidráulicas para pozos en la cuenca del río Toltén 371
Tabla 9-6: Volumen subsuperficial y recarga regenerada por precipitaciones en las zonas de riego incluidas en el dominio del modelo. 399
Tabla 9-7: Recarga lateral por precipitaciones al dominio del modelo. 400
Tabla 9-8: Resumen balance hidrogeológico (m^3/s) 402
Tabla 10-1. Caudal de recarga calculado en los pozos de inyección del sector norte de Temuco 432
Tabla 10-2. Pozos de observación utilizados en la calibración 442
Tabla 10-3: Balance de masas en régimen permanente 445
Tabla 10-4. Caudal de afloramiento hacia los ríos calculado en el modelo hidrológico ..446
Tabla 10-5: Balance de masas por sectores en régimen permanente 448
Tabla 10-6: Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente .448
Tabla 10-7: RMS normalizado por sectores - calibración en régimen permanente 449
Tabla 10-8: Balance de masas en régimen permanente para aumento de la recarga del 20% 452
Tabla 10-9: Balance de masas en régimen permanente para aumento de la recarga del 30% 454
Tabla 10-10. Valores de porosidad eficaz en materiales no consolidados (Johnson, 1967. Tomado de Custodio y Llamas, 1983).....463
Tabla 10-11. Valores de S_y asignados en el modelo numérico.....463
Tabla 10-12. Caudales de extracción en los escenarios simulados 468
Tabla 10-13. Volumen embalsado 469
Tabla 10-14. Diferencia de volumen embalsado en la cuenca del río Imperial 469
Tabla 10-15. Diferencia de volumen embalsado en la cuenca del río Toltén 470
Tabla 10-16. Caudal de salida hacia los cauces superficiales en los escenarios simulados 470
Tabla 10-17. Porcentaje de extracciones asumidas por el modelo numérico en comparación con el escenario base 471
Tabla 10-18. Porcentaje de pozos secos en los escenarios simulados 472
Tabla 10-19. Caudales óptimos de extracción.....473
Tabla 10-20. Caudal adicional susceptible de ser otorgado.....473

1 INTRODUCCIÓN

La región de La Araucanía presenta una importante abundancia del recurso hídrico superficial y subterráneo. Sin embargo, 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 los recursos hídricos cada vez mayor.

Dentro de la región de la Araucanía, las cuencas de los ríos Imperial y Toltén poseen considerables recursos, tanto superficiales como subterráneos, cuyo aprovechamiento corresponde, principalmente, al recurso superficial. Sin embargo, los acuíferos asociados a estos ríos han sufrido un importante incremento en su explotación, respondiendo esto a la demanda del crecimiento demográfico y el desarrollo de actividades productivas como riego y agua potable, especialmente en los meses de verano.

En este contexto, el Gobierno Regional de la Araucanía (GORE) apoyado por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (DGA), consiente de la limitación de los recursos hídricos en la región, busca llevar a cabo una adecuada gestión en la administración de estos. De esta forma, el GORE encargó 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, enfocado a conocer y entender los sistemas acuíferos existentes en la región evaluando, mediante una herramienta de gestión de recursos hídricos desarrollada en el marco del presente estudio, el uso de las aguas subterráneas en el corto y largo plazo a nivel regional.

Para dar cumplimiento de los objetivos generales antes planteados, se han desarrollado para este estudio, las siguientes actividades:

1. **Recopilación de Antecedentes:** Esta actividad incluyó una recopilación y análisis de antecedentes, realizándose una visita general del área del proyecto.
2. **Levantamiento de Información:** Esta actividad incluyó una caracterización geofísica, geológica, hidrológica e hidrogeológica, del área, definiéndose con esta información los acuíferos principales y sus características, así como su relación con los cursos superficiales. Asimismo, se realizó el muestreo de aguas superficiales y subterráneas; prospecciones geofísicas y perforación de tres sondajes de exploración en los sectores de Padre las Casas, Freire y Nueva Imperial. Adicionalmente, se ejecutó un total de 25 pruebas de bombeo, tanto en pozos existentes como en los pozos nuevos perforados.
3. **Sistematización Demandas y Usos:** Esta actividad incluyó el catastro de más de 3.000 captaciones subterráneas y la sistematización de la información de derechos y usos de los mismos, estimándose además la demanda hídrica en la región productos de distintas actividades.
4. **Funcionamiento de los Acuíferos:** Conforme a los antecedentes y a las actividades previamente desarrolladas, se formuló el modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos en estudio, caracterizándose también la calidad de aguas de las sistemas acuíferos.
5. **Modelación Hidrogeológica:** Esta actividad incluyó la formulación e implementación de los modelos hidrogeológicos numéricos, incluyendo su calibración y operación bajo distintos escenarios de explotación.
6. **Análisis Integral:** Finalmente, con la comprensión acabada de los acuíferos en estudio, se desarrolló la integración final de los antecedentes recopilados y análisis desarrollados, teniéndose como resultado el desarrollo de un modelo numérico, el que fue utilizado para estimar respuestas de los sistemas acuíferos ante distintos

escenarios, evaluando la cantidad de los recursos disponibles en la región. De la misma forma, se generó un Sistema de Información Geográfica (SIG), desarrollándose finalmente los trabajos correspondientes a la obtención de una importante herramienta de gestión de recursos hídricos.

Toda la información generada y procesada, junto con los resultados obtenidos fueron vertidos en el SIG desarrollado durante el transcurso del estudio, de modo de ir conformando un proyecto que permita visualización y entendimiento de cada una de las variables incorporadas y su respectiva interacción. En el **Anexo SIG** se incluye una descripción general del contenido del SIG generado, además se adjunta el archivo magnético con el respectivo respaldo de la información procesada y desarrollada.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio es conocer y caracterizar los sistemas acuíferos que conforman las cuencas del río Toltén e Imperial y las cuencas costeras de la Región de La Araucanía.

Los objetivos específicos del estudio se detallan a continuación:

a) Definir y caracterizar los acuíferos del sistema, conforme a la recopilación y análisis de antecedentes, y el levantamiento y generación de información de terreno. Lo anterior se realizó estableciendo aspectos tales como su geometría, condiciones de borde, piezometría y parámetros hidráulicos.

b) Caracterizar la calidad de las aguas subterráneas. En especial, la calidad basal y grado de conexión entre las aguas superficiales y subterráneas.

c) Sistematizar derechos y usos. Consiste, en base a la información disponible, en confeccionar catastro de derechos y usos de aguas superficiales y subterráneas.

d) Conocer el funcionamiento de los acuíferos, considerando la confección de modelos conceptuales y numéricos del funcionamiento de los acuíferos de ambas cuencas. Con esto se describió el funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos en estudio.

e) Evaluar el uso del recurso, mediante el desarrollo de simulaciones de diferentes escenarios de explotación, considerando la situación y proyecciones futuras de usos de aguas subterráneas en la región.

f) Representar territorialmente los resultados, mediante la confección de un Sistema de Información Geográfica.

g) Análisis integral, integrando toda la información levantada, junto a los resultados de los modelos (simulaciones y del SIG), con miras a generar las conclusiones y recomendaciones del estudio.

h) Generar una herramienta de gestión de las aguas de la región, enfocando el desarrollo de una herramienta de gestión que permita apoyar la planificación y materialización de obras hidráulicas, tales como pozos de monitoreo de niveles y calidad de agua, sistemas de agua potable rural, etc.

1.2 CONTENIDO DEL PRESENTE INFORME

El presente informe corresponde al informe final del estudio. El informe ha sido ordenado de manera que tenga el orden lógico de un estudio de estas características, es decir, no necesariamente mantiene el orden cronológico de cada una de las actividades.

En el capítulo 2 se presenta un resumen de los antecedentes recopilados y revisados así como las principales fuentes de información consideradas en el desarrollo de los distintos temas abordados en este estudio.

En el capítulo 3 se presenta la campaña de terreno y los resultados obtenidos en el marco de la campaña de catastro y medición de niveles de captaciones subterráneas en la región. Asimismo, se resumen los trabajos correspondientes a la sistematización de la información levantada y los principales usos de los derechos de aguas subterráneas en la región.

En el capítulo 4 se caracterizan hidrológicamente las distintas cuencas en estudio, en términos de los siguientes parámetros de interés: Pluviometría, fluviometría, evaporación y evapotranspiración, levantándose información relevante para dichos parámetros desde distintas fuentes. Se evalúa la calidad y extensión de la estadística hidrológica disponible, a escala mensual, realizando una corrección y relleno de los datos disponibles. Se analiza finalmente la estadística generada, mediante la aplicación de análisis de frecuencias aplicados a los distintos parámetros, ajustando en cada uno diferentes probabilidades de excedencia (pluviometría y fluviometría).

En el capítulo 5 se detalla la modelación hidrológica desarrollada en el marco del presente estudio, presentando un resumen de los resultados de la hidrología evaluados en el capítulo anterior y su aplicación en el modelo construido. En este mismo capítulo se exhibe la arquitectura de modelación, planteada mediante el software ExtenedSim, los resultados de la calibración, validación y aplicación del modelo en las distintas cuencas.

En el capítulo 6 se caracterizan, geológica y geomorfológicamente las cuencas en estudio. En este sentido se detalla tanto el marco geológico y geomorfológico de las cuencas a nivel regional, se define la geología estructural y se describe la geología de su subsuperficie de los sectores en estudio.

En el capítulo 7 se describen las campañas en terreno de geofísica llevadas a cabo en el presente estudio, enfocadas a identificar y delimitar las unidades geológicas en subsuperficie (campaña gravimétrica) y caracterizar geoeléctricamente el subsuelo, mediante la identificación de zonas saturadas o drenadas (secas), tipos de relleno, fallas, etc., mediante una campaña TEM.

En el capítulo 8 se presentan los principales resultados de las campañas hidroquímicas desarrolladas en el marco del estudio. Se describen las 4 campañas de terreno, la validación de datos disponibles, el análisis hidroquímico de las aguas superficiales y subterráneas en la región, la calidad de agua comparada frente a distintos criterios y el análisis del muestreo isotópico desarrollado. Asimismo, se presentan la red propuesta de estaciones de monitoreo.

En el capítulo 9 se presenta la conceptualización hidrogeológica del área de estudio, basada en las descripciones geológicas tanto de superficie, basada en las cartas geológicas disponibles, como de subsuperficie, basada en descripciones estratigráficas de captaciones de aguas subterráneas. Asimismo, se incluye la descripción de las unidades hidrogeológicas conceptualizadas con base en su litología; además, se presenta la construcción del modelo hidrogeológico en 3D, apoyado tanto con la geología de subsuperficie como en las campañas geofísicas (TEM y gravimetría). Se presenta la

piezometría del área de estudio para captaciones someras (menor a 20 m de profundidad) y profundas (mayor a 20 m de profundidad), un resumen de las propiedades hidráulicas de cada unidad en base al análisis de pruebas de bombeo y una síntesis hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas.

En el capítulo 10 se presenta tanto la metodología así como las labores ejecutadas en el desarrollo del Modelo Hidrogeológico Numérico de las cuencas en estudio, presentándose la calibración del modelo desarrollado y los principales resultados generados producto de los escenarios de simulación evaluados como parte del estudio.

En el capítulo 11 se presentan los principales resultados de los tres Talleres de Difusión llevados a cabo en la región, explicando la metodología de desarrollo de los talleres y sus conclusiones y principales recomendaciones.

En el capítulo 12 se presentan las principales conclusiones y recomendaciones del estudio.

1.3 CONTEXTO

Las principales cuencas hidrográficas de la región de La Araucanía corresponden a las hoyas de los ríos Toltén e Imperial, ambas abarcando cerca del 66% del área de la región (31.842 Km^2) tal como se observa en la Tabla 1-1. Las cuencas costeras Río Budi, río Queule y Costeras entre Río Budi y Río Toltén suman entre sí menos del 5% del área de la región. El porcentaje restante, es cubierto por parte de las cuencas río Bio Bio por el este y norte y río Valdivia por el sur. La Figura 1-1 muestra las cuencas que involucra este estudio y su distribución espacial.

Tabla 1-1:Superficie Cuencas Río Imperial, Toltén, Queule, Budi y Costeras entre río Budi y río Toltén.

CUENCA	**SUPERFICIE (Km^2)**	**% DE LA REGIÓN**
RIO IMPERIAL	12.652	39,7
RIO TOLTEN	8.446	26,5
RIO QUEULE	698	2,2
RIO BUDI	495	1,6
COSTERAS ENTRE RÍO BUDI Y RÍO TOLTÉN	162,6	0,5

Figura 1-1: Cuencas en estudio de la región de La Araucanía (WGS84, Huso 18)

2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Este capítulo presenta una completa revisión de los antecedentes recopilados, en donde se resume brevemente el enfoque del estudio y su utilidad para la ejecución de este trabajo. En general, los antecedentes revisados son relacionados a temas de geología, hidrogeología, hidrología, geofísica, catastro de pozos. Estos son útiles para entender los sistemas acuíferos y su dinámica de funcionamiento, en las cuencas de los ríos Imperial, Toltén y Costeras de la región de la Araucanía.

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 (Tabla 2-1). Entre estos grupos, Estudios Principales y Secundarios corresponde a una categorización según área cubierta y profundidad del estudio. Por otra parte, el grupo Otros, aglutina antecedentes tales como información cartográfica, descripción de bases de datos, etc. El nombre de cada estudio y su categorización se presentan en la Tabla 2-1. En Anexo A.1 se presenta un resumen de cada uno de los estudios principales revisados.

Tabla 2-1: Estudios recopilados para el desarrollo del estudio

REF	Estudio	Categoría
01-P	Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas; realizado por CADE-IDEPE Consultores en Ingeniería. 2004.	Principal
02-P	Plan Director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Imperial. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación. AC Ingenieros Consultores Ltda. 2001.	Principal
03-P	Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuenca del Río Imperial, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, CONIC-BF. 1998	Principal
04-P	Mejoramiento y Ampliación de Red de Aguas Subterráneas, Regiones VII a X. Dirección General de Aguas, Conic BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda. S.I.T.N0 223, diciembre 2010.	Principal
05-P	Análisis del Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile. DGA, 1996.	Principal
06-P	Análisis estadístico de caudales en los ríos de Chile. Volumen IV. DGA - MOP Prisma Ingeniería BF Ingenieros Civiles, 1992.	Principal
07-P	Levantamiento de parámetros para la modelación hidrológica de cuencas pluviales no controladas. IX región de la Araucanía". DGA. SIT 199. Dic-2009.	Principal
08-P	Análisis Preliminar de Niveles de Aguas Subterráneas. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2010.	Principal
09-P	Instalación de Piezómetros Operativos desde la Región de la Araucanía hasta la Región de los Lagos. Compañía Chilena de Perforaciones, 2012.	Principal
10-P	Geología del Área Temuco-Nueva Imperial, Región de La Araucanía. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2010.	Principal
11-P	Geología del Área Pucón-Curarrehue, regiones de La Araucanía y De Los Ríos. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2008	Principal
12-P	Geología del Área Queule-Toltén: regiones de la Araucanía y de Los Ríos, Escala 1:100.000. Sernageomin, 2008.	Principal
13-P	Geología del área de Villarrica - Huiscapi, Regiones de La Araucanía y de Los Ríos. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2011.	Principal
14-P	Geología del área Lanco-Loncoche, región de La Araucanía y de Los Ríos, Escala 1:100.000. Sernageomin, 2007.	Principal

REF	Estudio	Categoría
15-P	Geología para el ordenamiento territorial: Área de Temuco, Región de la Araucanía. Mapa 2: Recursos de Agua Subterránea. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2007.	Principal
16-P	Hoja Curacautín. Escala 1:250.000. Sernageomin, 1997.	Principal
17-P	Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídricos al 2021. Región de La Araucanía. MOP, 2012.	Principal
18-P	Resumen de Pozos ENAP, Región de La Araucanía.	Principal
19-P	Cuencas Sedimentarias en el Valle Central (entre Temuco y Golfo de Corcovado). Sergio Cespedes y Carlos Johnson, 1984.	Principal
20-P	El Mesozoico y Cenozoico, en el valle central y Cordillera Andina (entre Temuco y Los Angeles). Sergio Cespedes, 1987.	Principal
21-P	Trabajos de Gravimetría en Boroa-Cautín, Toltén-Lago Budi, Cholchol y Labranza. ENAP, 1971-1973.	Principal
01-S	Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional, Etapa II: Novena Región / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, Álamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda. 1995.	Secundario
02-S	Balance Hidrológico Nacional: regiones VIII, IX y XII DGA. MOP – IPLA, 1983.	Secundario
03-S	Hoyas Hidrográficas de Chile, 8º Región del Bio Bio, 9º Región de la Araucanía, 10º Región de los Lagos. DGA, 1980.	Secundario
04-S	Intrusión Salina en el Lago Budi. Análisis Hidrodinámico y estudio de la corriente de densidad. Tesis de Magister. Universidad de Chile. Sandoval L., 2009.	Secundario
05-S	Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las regiones del Maule, Bio Bio y La Araucanía. División de Estudios y Planificación, DGA, 2010.	Secundario
06-S	El Riego en Chile. Julio Sandoval Jeria, 2003.	Secundario
07-S	Determinación del Comportamiento de las Precipitaciones y de su agresividad climática, en las regiones del Bio Bio y de La Araucanía. Claudio Olivares, 2009.	Secundario
08-S	Curvas de intensidad duración frecuencia en estaciones pluviométricas. Labra, 2005.	Secundario
09-S	Caudales de reserva para abastecimiento de la población y usos de interés nacional en el río Toltén. Departamento de Estudios y Planificación, DGA, 2007.	Secundario
10-S	Catastro y Caracterización de las Fuentes de Aguas Minerales y Termales de Chile. Arturo Hauser, 1997.	Secundario
11-S	Remociones en masa en Chile. Arturo Hauser, 2000.	Secundario
12-S	Depósitos Metalíferos, de rocas y minerales industriales y de recursos energéticos del sector occidental de la IX Región de La Araucanía. Sernageomin, 2005.	Secundario
13-S	Trabajos de Sísmica en Toltén-Lago Budi, bloque Toltén (costafuera), Selva Oscura, Cunco y Labranza. ENAP, 1973-1978.	Secundario
14-S	Informe situación hídrica regional, Región de La Araucanía, GORE, 2012.	Secundario
15-S	Informe situación pluviométrica y otros en la Región de La Araucanía, INIA, 2012.	Secundario
16-S	Informe Técnico APR 2012, Proyectos de Agua Potable Rural Financiamiento FNDR, GORE, Agosto 2012.	Secundario

REF	Estudio	Categoría
17-S	Minuta de Antecedentes de Plantas Potabilizadoras, DOH, octubre 2012.	Secundario
18-S	Plan Regional de Ordenamiento Territorial región de La Araucanía, componentes: Amenazas Naturales, Cuencas Hidrográficas, Rural y Urbano.	Secundario
01-O	Bases de datos: Derechos concedidos y solicitudes en proceso.	Otros
02-O	Catastro de Expedientes de solicitudes de derechos de aguas subterráneas de la Dirección General de Aguas (DGA) del MOP.	Otros
03-O	Bases de datos hidrología/meteorología.	Otros
04-O	Bases de datos Calidad de Aguas.	Otros
05-O	Imágenes Satelitales de la región, Landsat y Aster.	Otros
06-O	ESIIR de la CNR.	Otros

2.1 ESTUDIOS PRINCIPALES

1. REF 01-P. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas; realizado por CADE-IDEPE Consultores en Ingeniería. 2004.

En este estudio se definen cauces prioritarios en las cuencas, segmentándolos y caracterizando las diferentes cuencas según: cartografía, geología, clima, geomorfología, flora y fauna, usos de agua y suelo.

Los cauces son analizados hidrológicamente y de acuerdo a su calidad de agua, clasificándolos en clases para efecto de la dictación de las normas secundarias de calidad. Para las cuencas del Río Imperial y Toltén se tienen sólo tramos clase 0 (de calidad excepcional), que por su extraordinaria pureza y escasez, forma parte del patrimonio ambiental de la Republica. Son adecuadas para la conservación de las comunidades acuáticas y demás usos definidos cuyos requerimientos de calidad sean inferior.

Entre los resultados de este estudio, se tiene:

- Las cuencas presentan un clima de tipo templado lluvioso y presentan un régimen de caudales de tipo pluvial, pudiendo verse una leve tendencia nival en la parte alta de la cuenca del río Toltén.
- El uso de suelo corresponde principalmente a praderas, terrenos agrícolas, plantaciones forestales y bosque nativo y mixto.
- El uso de agua in-situ corresponde sólo a uso recreacional, los usos extractivos corresponden a riego, agua potable y actividad industrial.
- Todos los tramos analizados, con información disponible, fueron catalogados como clase 0 (calidad excepcional como la más característica). Además se les asignó, considerando los usos del agua, calidad natural y actual de los parámetros, y valores a lograr en el futuro, una clase objetivo 1 (aguas de muy buena calidad), que corresponden a aguas aptas para la protección y conservación de las comunidades

acuáticas, para riego irrestricto y para usos cuyos requerimientos de calidad sean inferior.

- Se presentan algunos parámetros que exceden los límites definidos para las diferentes clases.

Información Útil para el Estudio: Entrega una visión de la cantidad y calidad del agua en las cuencas del río Imperial y Toltén. Presenta información relativa a calidad de agua en las cuencas mencionadas.

2. REF 02-P. Plan Director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Imperial/ Ministerio de Obras. Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación. AC Ingenieros Consultores Ltda. 2001.

El estudio se centra en el diagnóstico de problemas asociados a los recursos hídricos en la cuenca desde el punto de vista de oferta-demanda, infraestructura, organización y ambiental. Para cada una de estas problemáticas se ofrecen soluciones, su costo aproximado, beneficiarios, instituciones involucradas y la priorización que debiesen tener. Se presenta también la institucionalidad necesaria para que las iniciativas sean llevadas a cabo satisfactoriamente.

Información Útil para el Estudio: Entrega una visión general de la gestión de los recursos hídricos en la zona. Información sobre superficies y obras de riego (embalses, canales) importantes tanto para la hidrología superficial como para la recarga del acuífero.

3. REF 03-P. Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuenca del Río Imperial, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, CONIC-BF. 1998

El estudio consta del desarrollo de dos modelos computacionales, uno de simulación de operación de los sistemas de aprovechamiento y control de los recursos hídricos y el otro capaz de simular diversos parámetros característicos de la calidad de aguas superficiales de los principales cauces existentes en la cuenca.

Para esto se desarrollan estudios básicos de hidrología, calidad de agua y caracterización de derechos y usos de agua. El modelo de simulación operacional hidrológico es programado en VisualBasic y consiste en un conjunto interconectado de objetos, cada uno de los cuales representa un elemento hidráulico de la cuenca; estos objetos pueden ser fijos o variables, dependiendo de si representan entes naturales o antrópicos. El modelo de simulación de calidad de aguas es adaptado a partir del modelo QUAL2E que considera la ecuación unidimensional de transporte de masa por advección/dispersión.

El modelo considera los principales cauces que integran la cuenca del río Imperial: Purén, Traiguén, Quino, Quillén, Cautín, Quepe y Vilcún. Siendo calibrado para el periodo 1991-1995 y validado para 1986-1990.

Información Útil para el Estudio: Aunque es información que debe ser actualizada para los objetivos del Estudio Hidrogeológico, se entrega una cuantificación de los recursos hídricos superficial aportados por las distintas subcuencas que conforman la cuenca del río Imperial. Además se presenta una caracterización de la calidad de aguas superficiales de los principales cauces de la cuenca del Imperial, basado en un análisis de parámetros físico-químicos y bacteriológicos.

4. REF 04-P. Mejoramiento y Ampliación de Red de Aguas Subterráneas, Regiones VII a X. Dirección General de Aguas, Conic BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda. S.I.T.N0 223, Diciembre 2010.

El objetivo principal de este estudio fue la formulación de una red de medición de aguas subterráneas para la zona comprendida entre el río Mataquito (VII Región) y el río Maullín (X Región).

Se realizó una caracterización geológica e hidrogeológica general, descripción de acuíferos, equipotenciales y dirección de escurrimiento, de todas las cuencas generadas por los cursos de agua principales en cada región. Se generó un catastro de captaciones subterráneas recopilando la información de trabajos anteriores desarrollados en el área de estudio. En particular, para la IX Región se realizó una breve descripción geológica, se catastraron en total 641 captaciones de aguas subterráneas (con caudales constituidos mayor a 3 L/s) y se definieron los acuíferos para el río Imperial y de sus afluentes. Además se generó un mapa con las equipotenciales de la región.

Posteriormente, se generó una red de monitoreo preliminar entre las regiones VII y X, en base a la facilidad de acceso, cercanía a poblados y acuíferos definidos como importantes, privilegiándose los que son de propiedad fiscal. Se incluyeron aquellos pozos que tuvieran una profundidad mínima entre 15 y 50 m, una productividad mayor a 10 L/s y que se distribuyeran homogéneamente en la región. Se llevó a cabo una salida a terreno con el fin de verificar permisos, accesos y posibilidad de medición de los pozos propuestos, en cada una de las regiones en estudio. En esta campaña se realizó una encuesta a los propietarios o encargados de los pozos. Finalmente, se generó una red de monitoreo definitiva entre las regiones VII y X, en donde se consideraron en total, 85 pozos. Para la región de La Araucanía se consideró 4 pozos en la cuenca del río Bio Bio, 7 pozos en la cuenca del río Imperial y 8 pozos en la cuenca del río Toltén, como se muestra en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Red de monitoreo propuesta por estudio Conic BF Ingenieros Civiles Consultores Diciembre 2010

	Sector	Norte	Este	Propietario	Uso	Prof Perf (m)	Diam (")	Cota (msnm)	Año	NE (m) Dic. 2010	ND (m) Dic. 2010
BÍO BÍO	Renaico	5.827.685	712.317	Aguas Araucanía	P	40	12	64	1974	5,6	
	Ángol	5.812.778	705.646	APR Los Confines	P	36	8	81	2001		4,4
	Collipulli	5.794.947	725.566	Aguas Araucanía	P	34	12	132	1969	4,1	
	Ercilla	5.784.320	730.662	Aguas Araucanía	P	85	12	317	1960	9,5	
IMPERIAL	Victoria	5.763.909	735.262	Aguas Araucanía	P	100	18	339	2010	7,8	
	Traiguén	5.779.779	701.048	APR Villa Quilquén	P	32	8	130	1988		5,2
	Lautaro	5.731.399	721.502	EAGON Lautaro	I	90	8	241	2000		61,8
	Chol Chol	5.724.407	687.660	Aguas Araucanía	P	40	12	25	1998		17,5
	Nueva Imperial	5.707.950	678.827	Aguas Araucanía	P	33	12	24	1993	2,6	
	Entre Temuco y Nueva Imperial	5.707.123	703.889	PROMASA	I	40	10	86	1970	6,7	
	Temuco	5.709.878	710.481	Aguas Araucanía	P	96	14	114	1994	36,5	52,2
TOLTÉN	Cunco	5.686.828	757.947	Aguas Araucanía	P	40	12	366	1990	4,9	
	Radal	5.681.715	726.298	APR Radal	P	52	8	160	2006		7,2
	Freire	5.684.982	707.317	Aguas Araucanía	P	33	16	107	1959	4,6	
	Teodoro Schmidt	5.682.070	665.357	APR Teodoro Schmidt	P	48	8	29	2007	3,4	
	Gualpín	5.671.335	657.261	APR Hualpín	P	63	8	26	2002		19,5
	Gorbea	5.668.992	701.623	Hnas. Franc. del Sagrado	P	38	8	26	1990	5,1	

	Sector	Norte	Este	Propietario	Uso	Prof Perf (m)	Diam (")	Cota (msnm)	Año	NE (m) Dic. 2010	ND (m) Dic. 2010
TOLTÉNN	Gorbea Este	5.648.296	732.583	APR Ñancul	P	40	10	264	1995	3,8	
	Loncoche	5.638.588	703.994	Quesos Chile Sur	I	40	16	125		8,3	

De los 19 pozos considerados en la red de monitoreo de la región de la Araucanía, 16 de ellos están destinados para uso de agua potable.

Información Útil para el Estudio: Información más actualizada de niveles estáticos y dinámicos de los 15 pozos incluidos en la red de monitoreo, ubicados en las cuencas de los ríos Imperial y Toltén.

5. REF 05-P. Análisis del Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile. DGA, 1996.

Se presenta un análisis de los recursos hídricos disponibles en la región. La oferta se determina de acuerdo a un análisis de frecuencia de los caudales, considerando que los recursos subterráneos no son importantes en relación a los recursos superficiales. La demanda considera usos en cada cuenca: agricultura, agua potable, hidroelectricidad e industria y minería, estas demandas se proyectan utilizando factores de crecimiento. Para la IX región se analizan las siguientes cuencas: río Imperial, río Toltén, río Queule, cuencas costeras entre límite regional y río Imperial y cuencas costeras entre río Budi y río Toltén.

De acuerdo a los resultados, la IX Región corresponde a una región económicamente agrícola y ganadera siguiendo la generación hidroeléctrica (1996) debido a la abundancia de recursos, sin embargo se estima que esa relación se invertirá en el futuro (2017). En particular para la cuenca del río Imperial se estima que los recursos son suficientes para satisfacer la demanda actual y futura, por su parte en la cuenca del río Toltén los recursos superan con creces las demandas estimadas.

Información Útil para el Estudio: Entrega una visión general de la situación de oferta/demanda de las cuencas y su proyección al año 2017, información que puede ser útil tanto para la hidrología superficial como para la recarga del acuífero.

6. REF 06-P. Análisis estadístico de caudales en los ríos de Chile. Volumen IV. DGA - MOP Prisma Ingeniería BF Ingenieros Civiles, 1992.

Este estudio tiene como objetivo caracterizar los caudales de estaciones fluviométricas de la VIII y IX regiones, indicando para cada una sus indicadores estadísticos (valores medios, desviaciones, coeficientes de variación y asimetría, valores extremos), sus curvas de duración general y las curvas de variación estacionales asociadas a los caudales medios mensuales.

El periodo de análisis es de 40 años comprendido entre los años hidrológicos 1950/51 a 1989/90 para 19 estaciones de la IX región: 6 de la cuenca del río Toltén y 13 de la cuenca del río Imperial (Figura 2-1).

Como resultado del análisis se tienen series completas de 40 años para las estaciones analizadas y sus respectivos parámetros estadísticos y curvas de duración y de variación

estacional. A partir de los resultados se puede concluir que las estaciones analizadas corresponden a cuencas de régimen pluvial con el máximo ubicado en el mes de julio. Si bien ciertos cauces presentan deshielos durante el verano, estos caudales son significativamente menores y no se considera suficiente para clasificarnos como pluvio-nivales.

Información Útil para el Estudio: El estudio aporta con estadística corregida de caudales en estaciones fluviométricas de la IX región. Dicha información puede ser usada en estudios de caracterización hidrológica y la metodología puede ser replicada en análisis de nuevas series o actualización de las mismas.

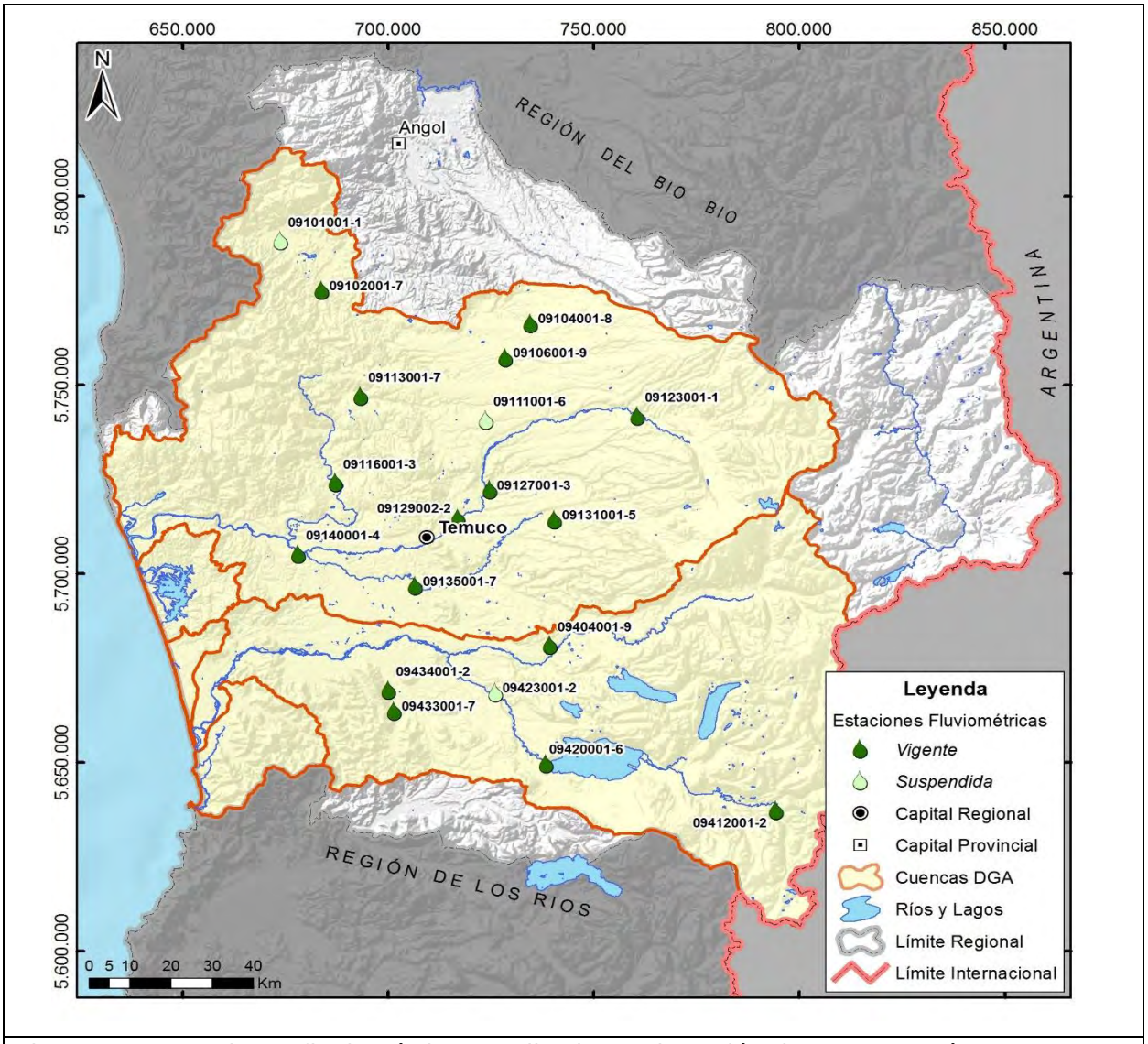


Figura 2-1: Estaciones fluviométricas analizadas en la región de La Araucanía

7. REF 07-P. Levantamiento de parámetros para la modelación hidrológica de cuencas pluviales no controladas. IX región de La Araucanía". DGA. SIT 199. Dic-2009.

Estudio solicitado por la DGA con el objetivo de obtener estadísticas de caudales que permitan mejorar y agilizar la forma de la constitución de los derechos de agua en

cuencas sin control fluviométrico. En este trabajo se aplica y calibra el modelo hidrológico SIMED en cuencas de la IX región con el fin de obtener parámetros que permitan generar información de caudales en cuencas sin control fluviométrico de la región.

El resultado del proceso de calibración corresponde a parámetros asociados al tipo de suelo en cada subcuenca de la región, que permiten la generación de caudales a través de un hidrograma unitario.

La calibración se realiza a través de estadísticas de caudales, precipitación, evaporación y características del suelo para nueve cuencas seleccionadas. De esta forma, se calibra el modelo exitosamente, obteniéndose buenos resultados tanto para caudales medios mensuales como caudales medios diarios.

Es importante mencionar que no basta con los parámetros regionalizados para la generación de la estadística de caudales, sino que es necesaria la calibración del método hasta un punto de salida para asegurarse de la correcta aplicación del modelo.

Información Útil para el Estudio: Aunque el modelo precipitación-escorrentía que se utilizará en el Estudio Hidrogeológico no corresponde al modelo SIMED, se presenta información meteorológica y fluviométrica a considerar en la construcción, calibración y aplicación del modelo hidrológico escogido.

8. REF 08-P. Análisis Preliminar de Niveles de Aguas Subterráneas. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2010.

En este trabajo se realizó el catastro de pozos de las regiones del Bio Bio, Araucanía, de los Ríos y de los Lagos. En pozos elegidos, se realizó la medición del nivel estático junto con la caracterización de su uso, coordenadas, diámetro, profundidad, etc. Este catastro tuvo el fin de hacer un análisis preliminar de la situación de niveles de aguas subterráneas en estas regiones. En particular, en la región de La Araucanía, se realizó en los meses de noviembre y diciembre del año 2010, el catastro del nivel estático en 15 pozos de la cuenca del río Imperial y 5 pozos de la cuenca del río Toltén, usados para consumo de agua potable (Tabla 2-3). Adicionalmente, en este estudio, se entregan 3 mapas geológicos que incluyen las cuencas hidrográficas del río Toltén e Imperial y que contienen el nivel estático y la profundidad de los pozos catastrados en cada cuenca.

Tabla 2-3: Niveles estáticos y principales características de pozos

Nombre Corto	Este	Norte	Altura msnm	N.Est. Ref	N.Ref (m)	Prof (m)	N Est (m)	Cuenca
APR Santa Ema	759162	5737619	524	0	0,3	47	-0,3	Imperial
APR Santa Elena	712050	5805857	95	0,65	0,5	30	0,15	Bio Bio
Herman Herdene	732680	5788671	339	0,55	0,2	15	0,35	Bio Bio
APR Chucauco - El Tume	735306	5652845	210	0	0,65	25	-0,65	Toltén
APR Carilafquen	712706	5678913	107	3,85	0,3	40	3,55	Toltén
APR Polul	725520	5659882	236	4,5	0,95	52	3,55	Toltén
APR Faja Maissan	679819	5673459	55	3,4	0,45	44	2,95	Toltén
APR Dancul	732583	5648292	264	3,8	0,3	35	3,5	Toltén
APR Botrolhue	700482	5707234	84	12,5	0,15	42	12,35	Imperial
APR Estación Boroa	683796	5706813	214	5,4	0,1	55	5,3	Imperial
APR Traltraico	677699	5708293	21	2,45	0,63	20	1,82	Imperial
Agua Potable Quepa S.A.	706970	5694808	95	17,8	0,15	48	17,65	Imperial

Nombre Corto	Este	Norte	Altura msnm	N.Est. Ref	N.Ref (m)	Prof (m)	N Est (m)	Cuenca
APR Quepe - Dollinco	703060	5693688	127	6,85	0,25	55	6,6	Imperial
APR Quechu - Mapu	669453	5712608	11	3,1	0,85	24	2,25	Imperial
APR Prado Huichahue	722837	5696399	131	18,2	0,3	50	17,9	Imperial
APR El Esfuerzo	731781	5685408	268	3,27	0,2	9	3,07	Imperial
APR Pircunche	722314	5712754	180	3,57	0,35	45	3,22	Imperial
APR Quintrilpe	729811	5719238	243	9,85	0,4	55	9,45	Imperial
APR General López	729313	5714233	214	7,02	0,35	30	6,67	Imperial
APR Pumalan - Cunco Chico	718451	5725130	176	9,6	0,5	18	9,1	Imperial
APR Pumalan - Cunco Chico (2)	718421	5725150	177	2,12	0,3	30	1,82	Imperial
Victoria	760603	5752469	631	2,7	0	4,9	2,7	Imperial

Información Útil para el Estudio: Este estudio entrega datos de niveles en distintos puntos de las cuencas estudiadas para el año 2010.

9. REF 09-P. Instalación de Piezómetros Operativos desde la Región de La Araucanía hasta la Región de los Lagos. Compañía Chilena de Perforaciones, 2012.

Este informe, contiene los datos obtenidos a partir de la construcción de 15 piezómetros (484,49 m perforados), siete de ellos perforados en la Región de la Araucanía, específicamente en los sectores de Angol, Victoria, Traiguén, Temuco, Cunco, Teodoro Schmidt y Loncoche.

Este trabajo entrega información en el ámbito de la hidrogeología, pues presenta los datos de los niveles estáticos medidos en siete puntos de la IX región e incluye la información de las zonas de mayores aportes de agua en profundidad para cada punto de perforación (Tabla 2-4).

En relación a la geología, los piezómetros entregan una descripción y fotografías de la litología en profundidad, la que corresponde principalmente a sedimentos con bajo grado de consolidación, que van desde arcillas a gravas y/o bolones. Ninguno de los piezómetros alcanza a perforar roca consolidada.

Información Útil para el Estudio: Este estudio entrega información relevante de 6 pozos de 8", ubicados dentro del área de las cuencas de los ríos Imperial y Toltén. Específicamente, aporta información de la estratigrafía de subsuperficie y de niveles estáticos para el año 2012.

Tabla 2-4: Datos de los piezómetros construidos en la IX región de la Araucanía. Todas las coordenadas se expresan en Datum WGS 84

ID	Ubicación	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Cota (m s.n.m.)	Profundidad Perforación (m)	Prof. Nivel Estático (m b.n.s.)
C-1	Angol	708.128	5.816.050	110	27,5	6,51

ID	Ubicación	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Cota (m s.n.m.)	Profundidad Perforación (m)	Prof. Nivel Estático (m b.n.s.)
C-2	Victoria	733.228	5.765.304	340	30,58	13,49
C-3	Traiguén	703.174	5.764.255	175	27,53	6,82
C-4	Temuco	712.410	5.712.327	116	30,5	14,3
C-5	Cunco	758.719	5.686.796	375	28,51	5,43
C-6	Teodoro Schmidth	667.916	5.681.177	14	28,51	4,13
C-7	Loncoche	705.257	5.639.233	120	27,55	4,15

10. REF 10-P. Geología del Área Temuco-Nueva Imperial, Región de La Araucanía. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2010.

La carta geológica de Temuco-Nueva Imperial se ubica en la zona central de la región de la Araucanía, entre los 38º30' y 39º00'S y los 72º30' y 73º00'O. El área que ocupa la carta aproximada es de 2.400 km^2 y abarca la ciudad de Temuco, Padre Las Casas, Imperial, Cholchol y Quepe. La fisiografía de esta zona se caracteriza por la depresión central caracterizada por lomajes suaves con cotas que varían entre los 30 y 267 m s.n.m. Los cerros de Ñielol, de orientación NNO-SSO, alcanzan una altura máxima de 774 m s.n.m. y la Cordillera de la Costa, denominada en estas latitudes como cordillera de Nahuelbuta, está constituida por alturas hasta los 664 m s.n.m. La geología del sector la conforman las rocas metamórficas que conforman el Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM), de edad ¿Devónico? – Triásico, y que corresponde al basamento de las unidades del Mesozoico y Cenozoico que la sobreyacen. El Triásico superior está caracterizado por rocas clásticas asociadas a ambientes fluviales y lacustres, agrupadas en la Formación Llafquentué- Huimpil. Por su parte el Cenozoico está representado por las Formaciones Temuco, Pilmahue, Cholchol y Malleco, así como por las unidades informales Conglomerado Paillal, Conglomerado Raluncoyán y el abanico volcanoclástico de Muco. El Pleistoceno está marcado por sucesivas glaciaciones. Los depósitos de los tres ciclos más jóvenes se han asociado a las glaciaciones Llanquihue, Santa María y Río Llico. Finalmente los Depósitos Fluviales antiguos y recientes se localizan a lo largo de los valles de los principales ríos de la región (ríos Toltén, Cautín, Quepe y Cholchol).

Para el área de estudio, como se observa en la Figura 2-2, esta carta aporta con la información geológica, estructural y la geología económica del centro oeste de la cuenca del río Imperial y con una parte muy reducida de la cuenca del río Toltén.

En esta carta se definen y caracterizan 16 unidades litológicas y todas ellas se encuentran presentes en el área de estudio. También entrega una síntesis de la evolución geológica de dichas unidades y de la geología estructural del área. Además presenta tablas con información acerca de: 2 dataciones radiométricas K-Ar, 7 dataciones en Ar/Ar, 1 tabla con información acerca de análisis químicos de agua, 1 tabla con la información de los fósiles presentes en el área de estudio, y 2 tablas con los depósitos de rocas y minerales

industriales y las ocurrencias metálicas de la zona. El mapa geológico del área Temuco – Nueva Imperial incluye un perfil geológico de orientación cercana a E-W.

Información Útil para el Estudio: Este estudio entrega información relevante de la geología superficial entre los 38º30' y 39º00'S y los 72º30' y 73º00'W.

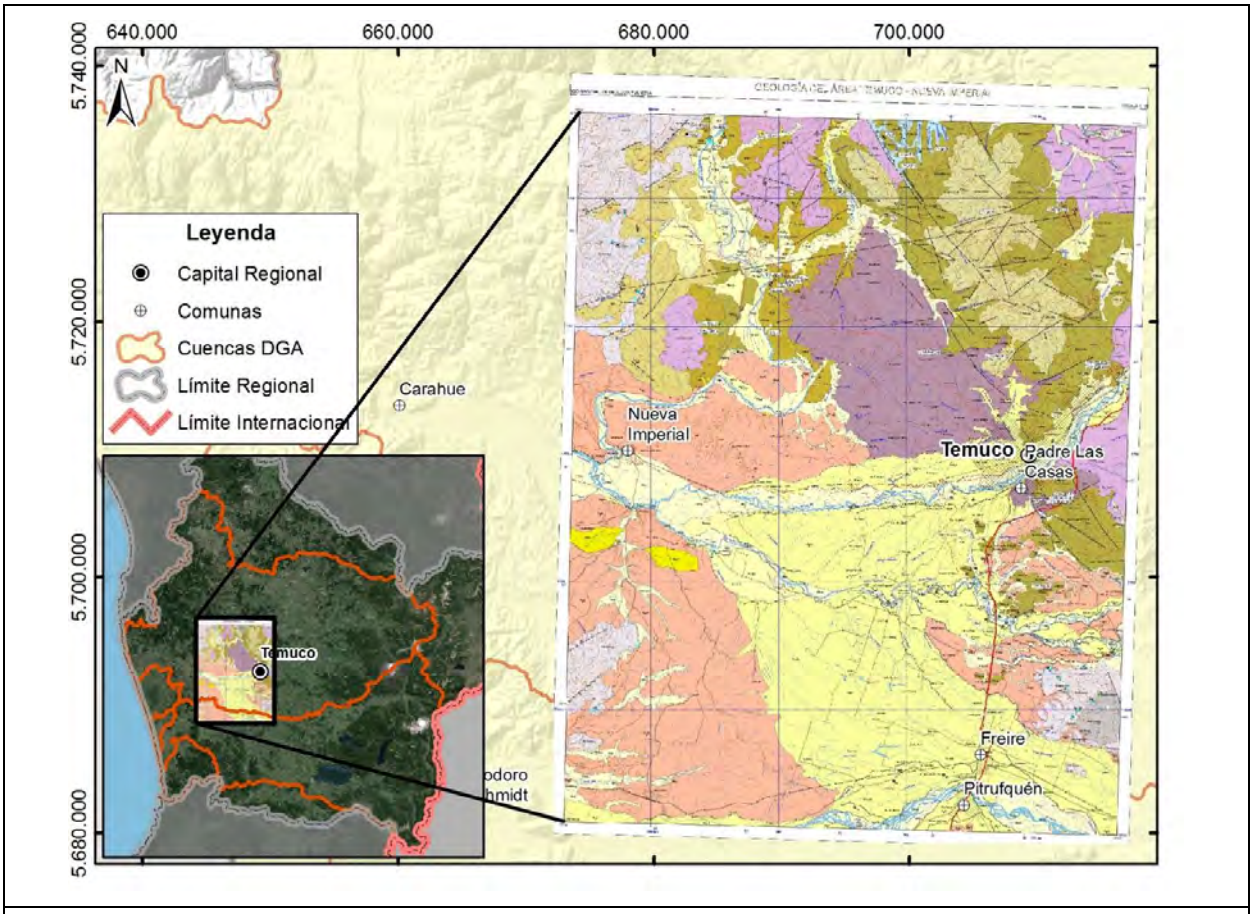


Figura 2-2: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Temuco-Nueva Imperial, escala 1:100.000

11. REF 11-P. Geología del Área Pucón-Curarrehue, regiones de La Araucanía y De Los Ríos. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2008.

La carta geológica de Pucón-Curarrehue (escala 1:100.000) se ubica en la Cordillera de los Andes entre los 39º00' y los 39º30'S. Se han reconocido 30 unidades geológicas que incluyen:

- Rocas volcano – sedimentarias (Estratos de Relicura, Formación Curamallín y Fm. Curarrehue), de edades que fluctúan entre el Paleoceno y el Plioceno.
- Rocas volcánicas (Formación Malleco, entre otras), cuyas edades fluctúan entre el Pleistoceno y el Holoceno.

- Rocas intrusivas granitoideas, cuyas edades fluctúan entre el Cretácico Superior al Mioceno Superior.
- Depósitos de moderada a baja consolidación, de edad Pleistoceno Superior – Holoceno, originados principalmente por acción de la erosión glaciar. Estas Unidades representan la evolución del margen suroccidental sudamericano, desde el Mesozoico hasta el Holoceno y sobreyacen a las unidades anteriormente mencionadas.

Para el área de estudio, como se observa en la Figura 2-3, esta carta entrega información geológica del límite este de la cuenca del río Toltén, además de las estructuras, zonas con atractivo económico, mineralógico y del recurso geotermal de dicha área.

En esta carta se entrega una síntesis de la evolución geológica de las unidades estratigráficas y de la geología estructural del área. También contiene un resumen de la geología económica, de los recursos geotermales y de los peligros geológicos que se encuentran en la zona de Pucón- Curarrehue. Además incluye 33 dataciones radiométricas K-Ar, 13 dataciones en Ar/Ar, 2 dataciones U/Pb SHRIMP, 18 dataciones 14C obtenidas de trabajos anteriores y 2 tablas con información acerca de las 22 termas del área Pucón Curarrehue. El mapa geológico del área Pucón – Curarrehue incluye un perfil geológico de orientación NNO-SSE.

Información Útil para el Estudio: Este estudio entrega información relevante de la geología superficial entre los 39º00' y los 39º30'S y los 72ºW y el límite con Argentina.

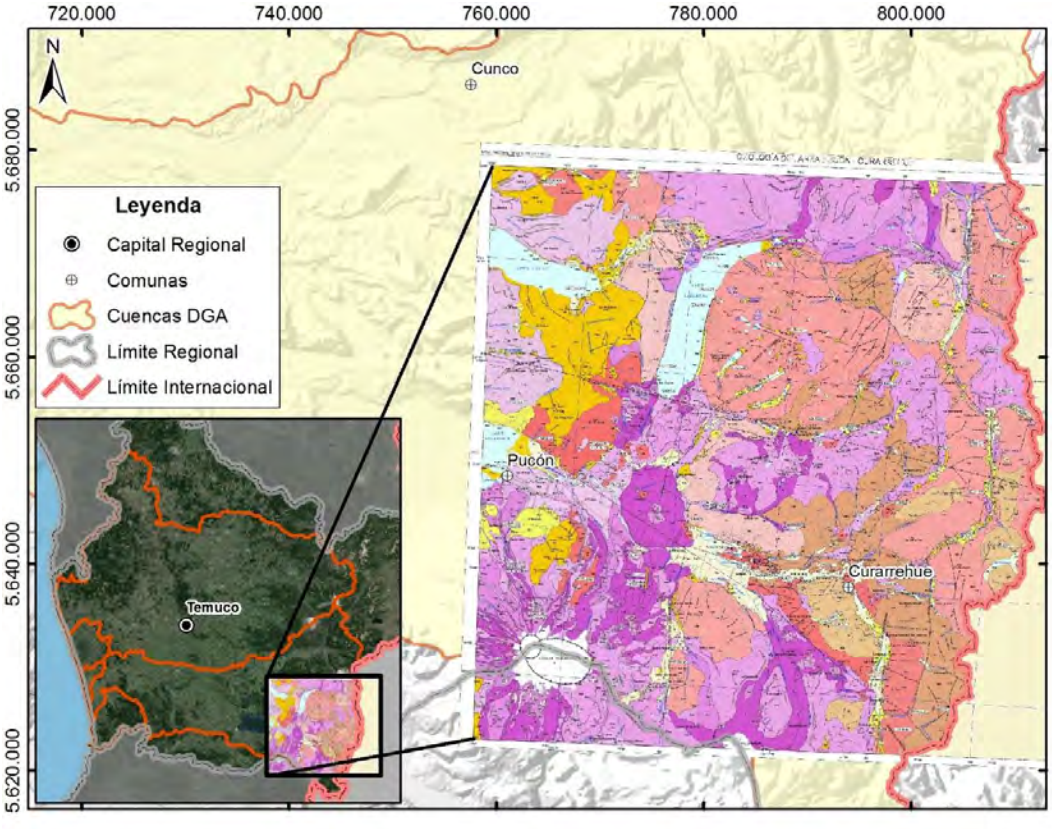


Figura 2-3: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Pucón-Curarrehue, escala 1:100.000

12. REF 12-P. Geología del Área Queule-Toltén: regiones de La Araucanía y de Los Ríos, Escala 1:100.000. Sernageomin, 2008.

Esta carta Geológica, escala 1:100.000, se localiza íntegramente en el borde occidental de la Cordillera de la Costa, abarcando un área total de 1.400 km^2. La geología del mapa Queule - Toltén la conforman las rocas metamórficas que constituyen el Complejo Metamórfico Bahía Mansa, de edad ¿Devónico? – Triásico, el cual constituye la unidad basal de las secuencias sedimentarias del Pleistoceno y Holoceno. Estas secuencias sedimentarias corresponden a depósitos glaciofluviales (fuera del área de interés), fluvioestuarinos, laháricos, fluviales, eólicos y litorales. En esta zona, además, se reconocen ocurrencias de Cu-Zn, placeres auríferos en la región costera del río Toltén y placeres litorales titaníferos. La exploración geoquímica de drenajes ha puesto en evidencia una serie de anomalías de Fe, Ni, Cr-Zn y As.

Para el área de estudio, como se observa en la Figura 2-4, la carta incluye la información geológica del borde oeste de la cuenca del río Toltén, la cuenca del río Queule y parte de la cuenca entre los ríos Queule y Budi.

En este documento se identifican 8 unidades litológicas diferentes, 7 de las cuales se encuentran en el área de estudio. Entrega además una caracterización geológica estructural de la zona, distribución de los recursos minerales y de rocas industriales presentes en el área. El mapa del área Queule Toltén también incluye un perfil geológico de orientación NO-SE.

Información Útil para el Estudio: Este estudio entrega información relevante de la geología superficial entre los 39º30'S y los 73º00' y los 73º30'W.

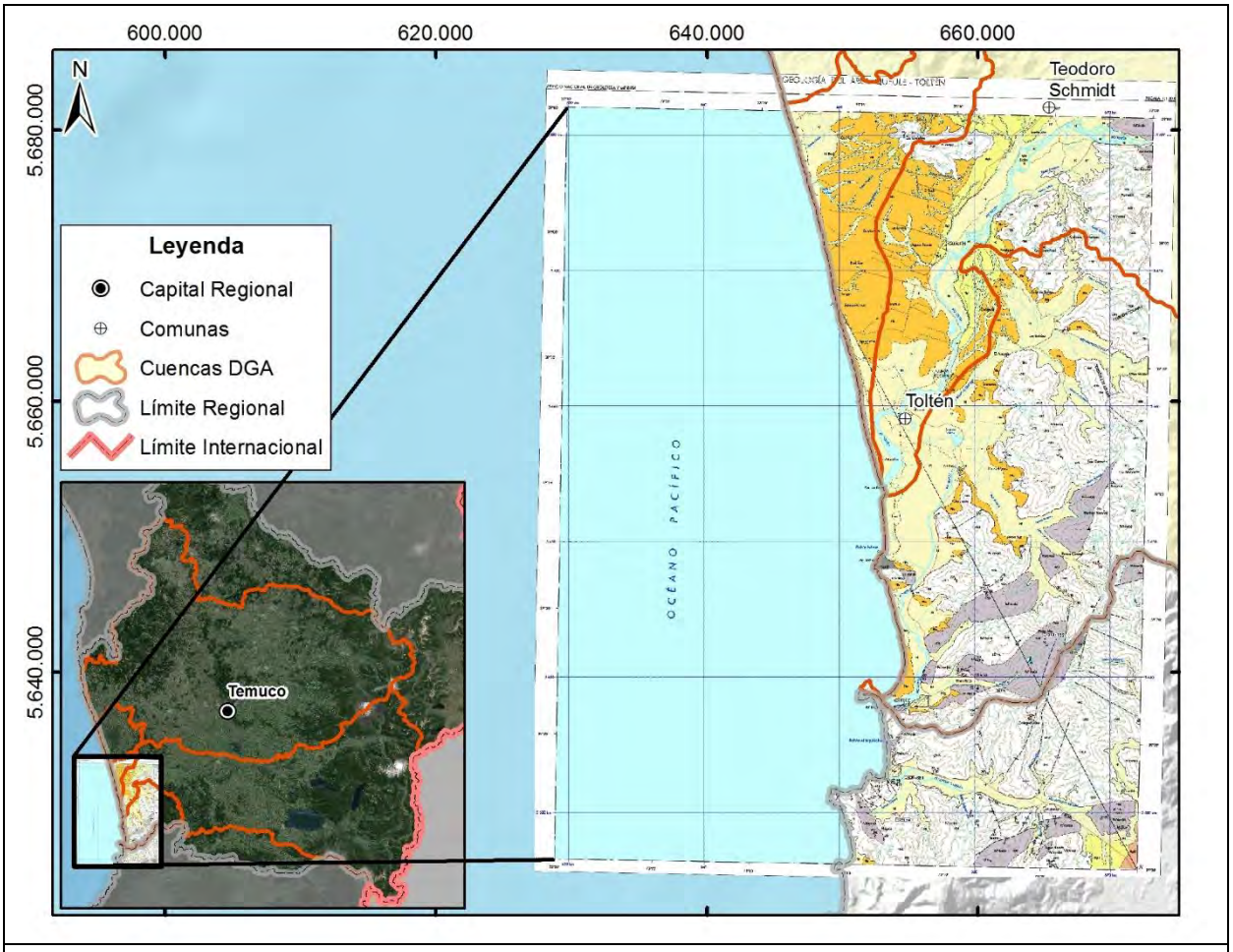


Figura 2-4: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Queule – Toltén, escala 1:100.000.

13. REF 13-P. Geología del área de Villarrica - Huiscapi, Regiones de La Araucanía y de Los Ríos. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2011.

La carta geológica de Villarrica-Huiscapi se ubica en el sur de la región de la Araucanía y parte de la región de Los Ríos, entre los 39º00' y 39º30'S y los 72º30' y 72º00'W. El área que ocupa la carta aproximada es de 2.000 km^2 y abarca la ciudad de Villarrica y los poblados de Huiscapi y Ñancul. La fisiografía de esta zona se caracteriza por altos topográficos correspondientes a parte de la Dorsal de Loncoche, que se acercan a la Cordillera Principal, representada en este sector por los faldeos del volcán Villarrica. Se distinguen también formas lacustres, planicies y lomajes modelados por la acción de los hielos, durante las glaciaciones del Pleistoceno y de los ríos y lagos durante el Holoceno. La geología del área la conforman las rocas de edad Paleozoico Triásico, representadas por las rocas del Complejo Metamórfico Bahía Mansa y las rocas del Complejo Metamorfico Trafún, además de los granitoides correspondientes al Batolito Futrono-Riñihue. Estas rocas constituyen el basamento de las unidades mesozoicas y cenozoicas. Durante el Triásico Superior se depositaron las rocas sedimentarias de la Formación Panguipulli y durante el Oligoceno superior al Plioceno las rocas principalmente volcánicas

y volcanoclásticas de la Formación Curamallín y de la Formación Malleco. Posteriormente en el Pleistoceno, se encuentran los depósitos asociados a los tres últimos ciclos glaciares (glaciaciones Río Llico, Santa María y Llanquihue), tales como depósitos morrénicos y glaciofluviales, entre otros, los cuales cubren prácticamente todas las unidades antiguas. Finalmente durante el Holoceno se originan los depósitos sedimentarios y volcánicos recientes, tales como: Depósitos de playas lacustres, coluviales, de abanico aluvial, fluviales actuales, anillos de lavas recientes y lavas recientes, entre otros. Para el área de estudio, como se observa en la Figura 2-5, esta carta entrega información geológica estructural y la exigua geología económica del centro de la cuenca del río Toltén.

En esta carta se definen y caracterizan 21 unidades litológicas, y todas ellas se encuentran presentes en el área de estudio. También entrega una síntesis de la evolución geológica de dichas unidades, de la geología estructural y de los recursos minerales presentes en el área. Además entrega 1 datación radiométrica K-Ar, 12 dataciones en Ar/Ar, 1 tabla con información acerca de análisis químicos de roca, 1 tabla con la información de los fósiles presentes en el área de estudio, y 2 tablas con los depósitos de rocas y minerales industriales y las ocurrencias metálicas de la zona. El mapa geológico del área Villarrica – Huiscapi incluye un perfil geológico de orientación NE-SO.

Información Útil para el Estudio: Este estudio entrega información relevante de la geología superficial entre los 39º00' y 39º30'S y los 72º00' y 72º30'W.

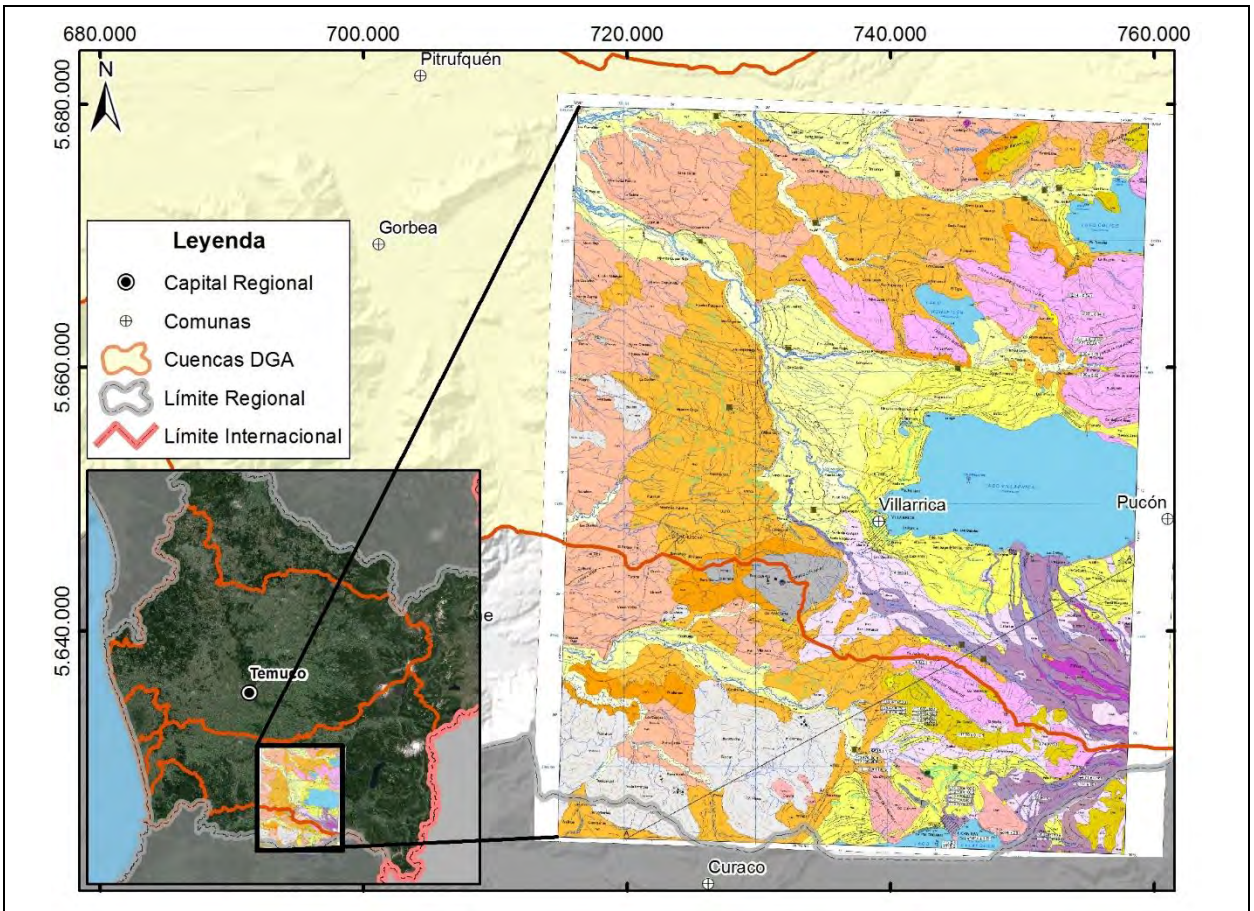


Figura 2-5: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Villarrica-Huiscapi, escala 1:100.000

14. REF 14-P. Geología del área Lanco-Loncoche, región de La Araucanía y de Los Ríos, Escala 1:100.000. Sernageomin, 2007.

El área del mapa Lanco − Loncoche, escala 1:100.000, se localiza en el límite de las regiones de La Araucanía y de Los Ríos, abarcando un área de 2.400 km^2. La geología del sector la conforman las rocas metamórficas que constituyen el Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM), de edad ¿Devónico? − Triásico, el cual constituye el basamento de las unidades del Cenozoico que la sobreyacen. Estas secuencias del cenozoico corresponden a estratos de la formación Pupunahue (secuencia sedimentaria continental-parálica que aflora fuera del área de interés), depósitos morrénicos, glaciofluviales, remociones en masa y fluviales. Además afloran cuerpos granodioríticos y pórfidos riodacíticos del cretácico superior que intruyen a las rocas del CMBM. En esta zona además se reconocen ocurrencias de Cr-Ni y Mn, subeconómicos y se explotan estacionalmente yacimientos de Caolín.

Para el área de estudio, como se observa en la Figura 2-6, la carta incluye la información geológica de una parte de la cuenca del río Toltén y parte de la cuenca del río Queule.

En esta carta se definen y caracterizan 10 unidades litológicas, así como también la evolución geológica de dichas unidades. Del total de unidades descritas 9 afloran en el área de estudio. Además presenta tablas con información acerca de: dataciones radiométricas K-Ar en biotita de 4 muestras, depósitos y ocurrencias metálicas y yacimientos de rocas y minerales en el área de estudio. El mapa geológico estructural del área Lanco − Loncoche incluye un perfil geológico de orientación NE-SO.

Información Útil para el Estudio: Este estudio entrega información relevante de la geología superficial entre los 39º00’ y 39º30’S y los 72º30’ y 73º00’W.

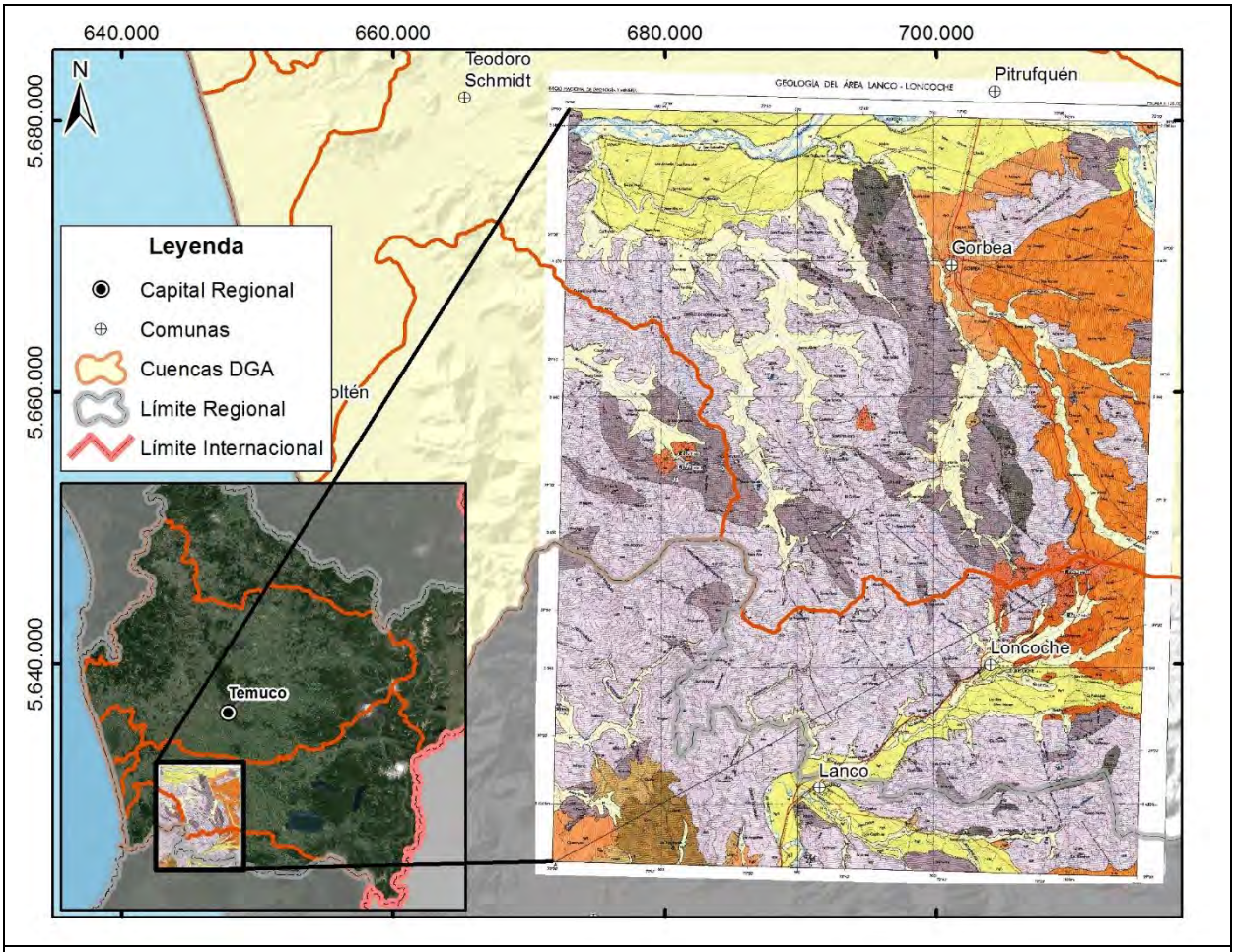


Figura 2-6: Área de estudio incluida en la Carta Geológica del área Lanco-Loncoche, escala 1:100.000

15. REF 15-P. Geología para el ordenamiento territorial: área de Temuco, Región de La Araucanía. Mapa 2: Recursos de Agua Subterránea. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2007.

La carta geológica para el ordenamiento territorial del área de Temuco - Nueva Imperial abarca la zona central de la región de la Araucanía, entre los 38º30' y 39º00'S y los 72º15' y 72º45'W. El área que ocupa la carta aproximada es de 1.850 Km^2 y abarca la ciudad de Temuco, Padre Las Casas, Lautaro, Freire y Pitrufquén. Este documento tiene por objetivo principal definir el marco geológico – ambiental del área antes mencionada con el fin de ser utilizado como herramienta para caracterizar el medio físico y evaluar los recursos naturales presentes en la zona. En general en él se presenta la geología superficial, la geología estructural, el patrimonio geológico y paleontológico, los recursos de agua subterránea, se definen los acuíferos, las isopiezas, la caracterización hidroquímica, la vulnerabilidad de los acuíferos y posibles fuentes contaminantes, las rocas y minerales industriales, los peligros geológicos y problemas para obras civiles, finalizando con

recomendaciones. La carta se emplaza específicamente en el centro oeste de la cuenca del río Imperial y abarca un área reducida, en superficie, de la cuenca del río Toltén.

Dentro de la información relevante que entrega esta carta para la zona de estudio, corresponde a un mapa del uso actual del territorio en el área de Temuco, una descripción de la geología estructural de la zona, incluyendo un mapa geológico - estructural del área de Temuco y una tabla resumen con los sitios propuestos para su protección y preservación como patrimonio geológico y paleontológico.

En el ámbito de la hidrogeología, este estudio aporta con la definición de diferentes acuíferos y su importancia relativa como fuente de recursos hídricos definidos mediante el análisis de la estratigrafía del subsuelo del área de Temuco. De acuerdo con la presencia de agua subterránea y las condiciones de circulación y almacenamiento de ella, se distinguieron acuíferos libres, libres cubiertos, semiconfinados y confinados, tanto granulares como fisurados. De acuerdo con la importancia hidrogeológica, en cuanto a productividad y extensión, se distinguen los siguientes tipos de acuíferos: de alta importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados (A1, //A1, A2 y //A3), de media a baja importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados (//B1, //B2 y //B3), de media a baja importancia hidrogeológica en roca fisurada (B4 y B5), y los sistemas de acuíferos //A3/B4 y B3/B4, conformados por una secuencia de dos acuíferos de alta a media importancia, todos los cuales se plasman en el Mapa de Recursos Subterráneos de la Figura 2-7. La medición de niveles estáticos y la determinación mediante GPS diferencial de coordenadas y niveles piezométricos de 93 pozos y norias correspondientes a los principales acuíferos (A1, //A1 y A2), permitió delinear las isopiezas en las unidades hidrogeológicas. Estas indicarían que, al menos en el tramo comprendido entre Lautaro y Labranza, y en el período de medición, el acuífero libre en depósitos fluviales y glaciofluviales (A1) aporta agua al río Cautín.

En relación a la hidroquímica para la zona de interés, este estudio incluye la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas, mediante el análisis de los resultados de laboratorio de 91 muestras, tomadas en 64 pozos, 21 norias y 6 vertientes, así como de análisis in situ tales como NH4+, PO4-3, conductividad, temperatura, pH y O2. Se presenta también un diagrama de piper con la composición de las 91 muestras, según el cual las aguas se clasificarían principalmente como del tipo bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.

También se efectúa una definición y asignación de vulnerabilidad de acuerdo al método GOD. Se determinó que 5 acuíferos presentan alta vulnerabilidad en depósitos no consolidados, 4 acuíferos de media a baja vulnerabilidad en depósitos no consolidados o semi consolidados y 2 acuíferos de media a baja vulnerabilidad en roca fisurada. Se definieron posibles fuentes contaminantes mediante el catastro de 435 sitios que constituyen una fuente potencial de contaminación para el agua subterránea, superficial y el suelo

Se menciona además, en relación a los minerales industriales y rocas presentes en el área de Temuco, que existen tres tipos: áridos (agregados), arcillas comunes y rocas volcánicas. Finalmente se definen los principales peligros geológicos en el sector que son las remociones en masa y las inundaciones y se entregan recomendaciones acerca de recursos y áreas de protección de agua subterránea, de las actividades potencialmente contaminantes, las áreas potencialmente aptas para disposición de residuos sólidos, peligros geológicos y problemas para obras civiles, rocas y minerales industriales, sitios geológicos y paleontológicos de interés patrimonial. Adicionalmente a partir de este estudio se generó un mapa Hidrogeológico escala 1:100.000 (Figura 2-7) y un perfil hidrogeológico del río Cautín entre la zona urbana de Temuco y Cajón.

Información Útil para el Estudio: Este trabajo entrega información relevante de la geología superficial, la geología estructural, los recursos de agua subterránea, las isopiezas y flujo subterráneo, la caracterización hidroquímica, la vulnerabilidad de los acuíferos y posibles fuentes contaminantes, entre los 38º30' y los 39º00' y los 72º30' y 73º00'W.

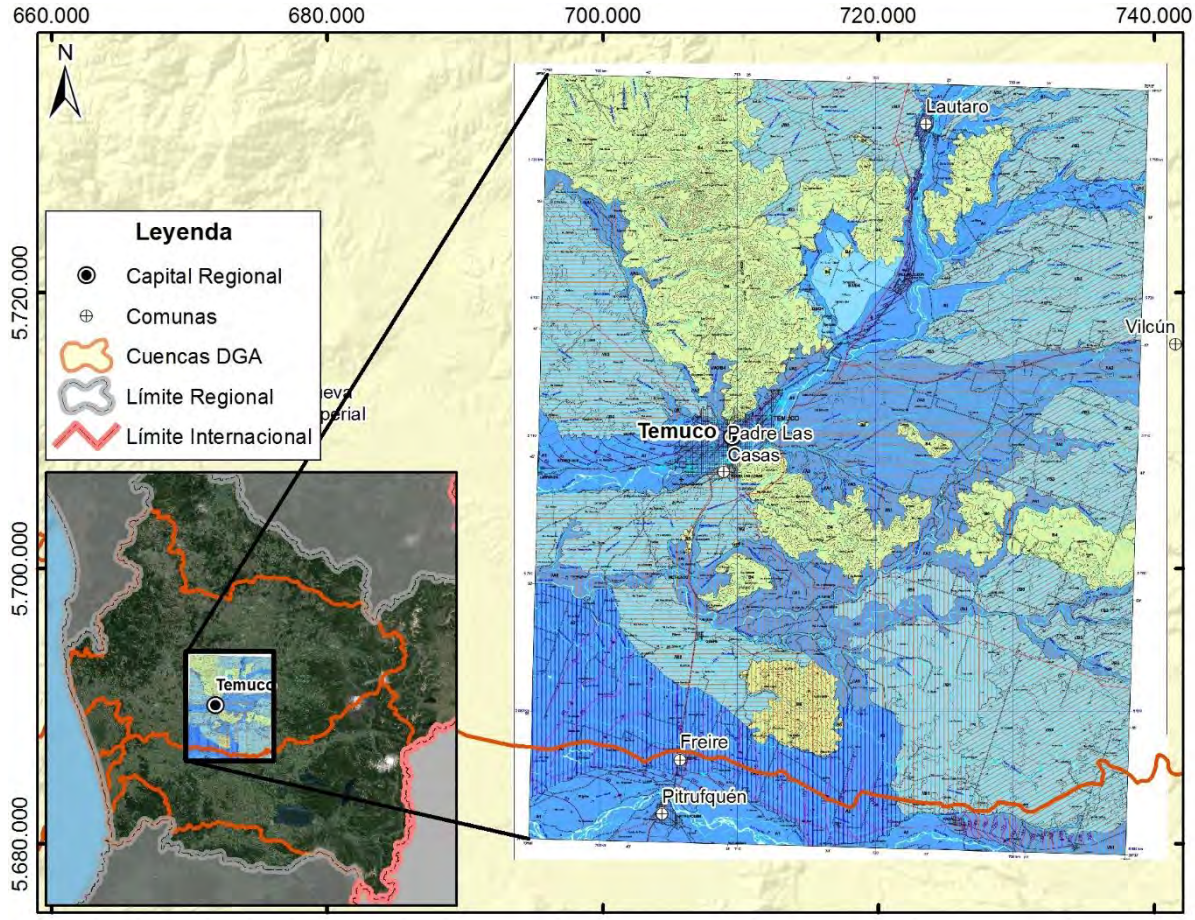


Figura 2-7: Área de estudio incluida en la Carta Geológica Mapa de Recursos Subterráneos, área Temuco, escala 1:100.000

16. REF 16-P. Hoja Curacautín. Escala 1:250.000. Sernageomin, 1997.

La Hoja de Curacautín, escala 1:250.000, abarca las regiones de la Araucanía y parte sureste de la del Bio Bio, entre las latitudes 38º y 39ºS, el límite con Argentina y la longitud 72º15' W, cubriendo aproximadamente 12.000 km^2. En la región cubierta por este mapa afloran rocas cuyas edades confirmadas varían entre el Jurásico y el Reciente y las rocas metamórficas correspondientes a los Estratos de Huinucal Ivante (¿Paleozoico-Triásico?). Las rocas de edad post Jurásico incluyen rocas sedimentarias, volcánicas, hipabisales y plutónicas, así como volcanes activos del Pleistoceno Superior - Cuaternario

(Llaima y Lonquimay), formados por procesos relacionados a una zona de convergencia de placas.

Para el área de estudio, como se observa en la Figura 2-8, esta carta entrega información geológica del límite este de la cuenca del río Imperial y el límite noreste del río Toltén, además de las estructuras y zonas con atractivo económico mineralógico.

En esta carta se definen y caracterizan 18 unidades litológicas, 14 de las cuales se encuentran presentes en el área de estudio. También entrega la evolución geológica de dichas unidades y de la geología estructural, así como también un resumen de la geología económica y las zonas de alteración y/o mineralización presentes en el área. Además en este documento se entregan 113 dataciones radiométricas K-Ar, 2 cuadros litoestratigráficos, 3 asociaciones de facies (una del miembro Lolen- Pacunto, otra del miembro Lonquimay y otra del miembro Río Pedregoso), 7 secciones columnares estratigráficas, 3 tablas de composición química de rocas (Formación Malleco, conjunto volcánico I (fuera del área de estudio) y Conjunto Volcánico III (fuera del área de estudio)), 7 diagramas y triángulos de composición química de rocas y 1 tabla de vetas principales reconocidas durante el estudio. El mapa geológico del área Curacautín escala 1:250.000 incluye dos perfiles geológicos de orientación E-W.

Información Útil para el Estudio: Este trabajo entrega información relevante de la geología superficial entre los 38º00' y los 39º00' y los 72º30' y 73º00'W.

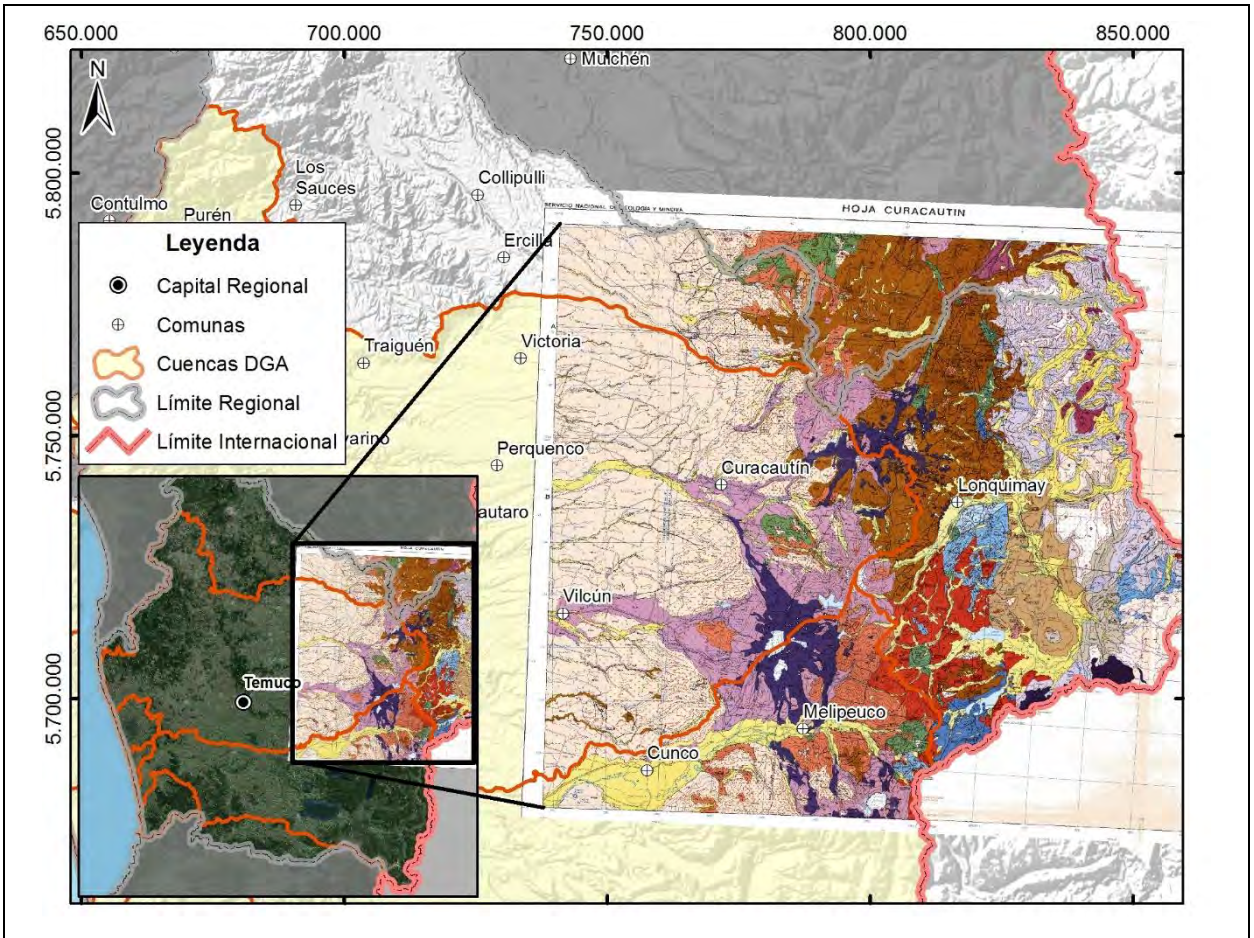


Figura 2-8: Área de estudio incluida en la Hoja Curacautín, escala 1:250.000.

17. REF 17-P. Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídricos al 2021. Región de La Araucanía. MOP, 2012.

Es un estudio orientado a la planificación a futuro (mediano plazo), a entregar iniciativas en materia de Obras Públicas y Gestión de Recurso Hídrico. En este sentido, se enfoca en describir el estado actual en temas que sean relevantes y asociado a estas disciplinas. Así, se presenta a nivel regional descripciones en temas socioeconómicos, hidrográficos y vulnerabilidad de los recursos naturales. Con respecto a la gestión de recursos hídricos, se presenta la disponibilidad espacial de información hidrometeorológica en general, infraestructura de obras hidráulicas (enrocado, espigones conglomerados, gaviones, encauzamiento) y de regadío separados por cuencas, obras de aguas lluvias para las comunas de Temuco y Padre las Casas y un sencillo diagnóstico de la situación de Agua Potable Rural en la Región.

Por otra parte, cuenta con análisis de disponibilidad de cauces por cuenca y un diagnóstico de la demanda hídrica de la región. Además se realiza un análisis de brechas por territorio donde plantean las problemáticas reconocidas en la región, en algunas zonas asociadas a la gestión del recurso hídrico.

Con todo esto se genera una cartera de iniciativas para región planificando obras en materia de Obras Públicas y Gestión de Recurso Hídrico hasta el año 2021.

Información Útil para el Estudio: Desde los objetivos del Estudio Hidrogeológico, Región de La Araucanía, los aportes de este estudio se concentran en la presentación infraestructura actual en materia hídrica con que cuenta la Región, y la definición e identificación de las brechas junto a un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas).

Además se reconoce que la falta de estudio e información en la Región sobre la disponibilidad de aguas subterráneas constituye una deficiencia para la administración correcta del recurso.

18. REF 18-P. Resumen de Pozos ENAP, Región de La Araucanía

Con fines exploratorios de hidrocarburos y gas, entre los años 1966 y 1993 se perforaron una serie de pozos profundos en la región de La Araucanía, tanto en el continente como en el mar. Se recolectaron 17 carpetas de pozos en terreno continental y 2 carpetas de pozos en terreno oceánico. Diez de los pozos en terreno continental, se perforaron en el sector de Labranza, una cuenca profunda donde se encontraron horizontes productores de gas. Dentro de los antecedentes que presentan estos pozos se cuenta con:

- Ubicación
- Fecha de inicio y término del pozo
- Cota del pozo
- Características del pozo (profundidad, diámetro de entubación)
- Litología de detalle y en algunos casos correlación entre unidades reconocidas dentro de la geología de la región
- Descripción de discordancias
- Análisis de pruebas de formación (PF)
- Perfiles geofísicos (en general: densidad compensado, inducción, calibre, sónico, rayos gamma-neutrón, buzamiento, perfil cementación, perfil temperatura)

- Descripción de testigos laterales en algunos pozos donde se realizaron
- Observaciones generales de acuíferos de agua dulce o salada albergados en determinados estratos
- Informe de microfauna o micropaleontología en algunas muestras de pozos

La Figura 2-9 muestra la distribución en planta de estos pozos perforados por ENAP, en donde se observa la alta concentración de estos en la zona de Labranza, cuenca del río Imperial. Otro pozo ubicado en esta cuenca es el pozo Antaro 1, ubicado cerca de Curacautín. En la cuenca del río Toltén hay dos pozos profundos: Cunco 1 y Freire 1, ubicados en las ciudades homónimas, mientras que en la cuenca costera entre río Budi y Toltén se encuentra el pozo Toltén.

Por otra parte, la Tabla 2-5 muestra un resumen con las principales características de los pozos de la ENAP, entre las que se incluye la profundidad del pozo y la profundidad del techo del basamento. La profundidad de estos pozos varía entre 348,5 (pozo Chol Chol 1) y 2.672 m (pozo Freire), por lo cual, la estratigrafía de estos entrega antecedentes de la geología profunda de las cuencas. Además, a la mayoría de los pozos se les realizó pruebas de formación, y a las muestras obtenidas de agua y gas tomadas a diferentes profundidades se les realizó análisis químico.

Información Útil para el Estudio: Este trabajo entrega información relevante de la geología de subsuperficie, con la estratigrafía de detalle y correlaciones con unidades regionales. Además entrega información de perfiles geofísicos y análisis de agua subterránea profunda recopiladas en pruebas de formación.

Figura 2-9: Ubicación de Pozos ENAP construidos en la región de La Araucanía

Tabla 2-5: Características de los pozos perforados por ENAP

Pozo-ID	Este (WGS 84 18S)	Norte (WGS 84 18S)	Cota msnm (*)	Profun-didad (m)	Diámetro ” (*)	Fecha	Litología	Perfiles geofísicos	Nº P.F (*)	Análisis PF	Techo Basamento (mbns)	Observaciones
Labranza Nº1 (E-1)	695088	5709366	76,4	1116	9 5/8 "	12/08/1966	no en detalle	si	2	si (agua)	1105	Descripción micropaleontológica. Agua salada en pruebas de formación
Labranza Nº2 (E-2)	695258	5713372	47	796	7 5/8; 5"	15/01/1972	372,5-762	si	9	si (gas y agua)	771	Productor de gas. Abandonado
Labranza Nº3 (E-3)	695167	5712603	46,3	778,5	7 5/8; 5 1/2"	08/04/1972	0-778,5	si	6	si (gas y agua)	777	Productor de gas
Labranza Nº4 (E-4)	695044	5712513	135	1106,24	7 5/8; 5 1/2"	24/07/1972	0-1106,24	si	3	si (agua)	1098	Pozo seco
Labranza Nº5 (E-5)	697734	5713773	66	505	7 5/8"	30/08/1972	0-505	si	4	si (agua)	483	Pozo seco
Labranza Nº6 (E-6)	693594	5707551	83	1022,5		01/11/1972	0-1020	si	4	si (agua)	1004	Pozo seco
Labranza Nº7 (E-7)	699278	5707873	55,5	887	7 5/8"	19/01/1974	0-887	si	4	si (agua)	855	Abandonado, con horizontes arenosos permeables saturados de agua salada
Labranza Nº8 (E-8)	694310	5712161	54,8	877	7 5/8"	05/03/1974	3-877	si	5	si (agua)	860	areniscas de buena calidad productiva, saturada por agua salada
Labranza Nº9 (E-9)	694454	5713083	57,6	948	7 5/8"	30/12/1974	no en detalle	si	10	si (agua)	933	areniscas permeables saturada por agua salada
Labranza Nº10 (E-10)	695888	5712431	50,6	863	7 5/8"	06/08/1975	no en detalle	si	6	no	835	Abandonado, no productor. se perforó en reemplazo de Labranza 2. cuerpo arenoso superior saturado en agua salada
Chol Chol Nº1 (E-11)	688425	5713691	36,6	348,5	7 y 5"	03/07/1972	0-348,5	S/I	6	si (agua)	345	Seco. Descripción micropaleontológica
Chol Chol Nº2 (E-12)	688310	5724181	31,6	397	7 5/8"	21/01/1973	0-397	S/I	S/I	no	387	Descripción micropaleontológica
Los Pinos (E-13)	695715	5720147	197	1060	7 5/8; 5 1/2"	07/01/1973	0-1060	si	3	si (agua)	1050	Abandonado, pozo seco. Intercalaciones de arenisca arcillosas

Pozo-ID	Este (WGS 84 18S)	Norte (WGS 84 18S)	Cota msnm (*)	Profun-didad (m)	Diámetro ” (*)	Fecha	Litología	Perfiles geofísicos	Nº P.F (*)	Análisis PF	Techo Basamento (mbns)	Observaciones
Freire 1 (E-14)	692152	5687998	77	2672		20/02/1967	no en detalle	si	3	si (agua)	1602	entre los 45 y 50 m hubo afluencia de agua dulce de Q: 200 L/s, napa de arena gruesa. Sin evidencia de hidrocarburos
Cunco Nº1 (E-15)	749582	5693797	314	988	6 5/8"	15/03/1973	0-988	si	S/I	no	-	Análisis de densidad de rocas/distribución de hidrocarburos
Toltén 1 (E-16)	646665	5681050	3,5	805	7 5/8"	17/04/1974	no en detalle	si	3	no	779	Pozo de exploración. No productor. Agua dulce en estratos intermedios del terciario y agua salobre en la arenisca basal
D1 (E-17)	617662	5727759	75,9 bnm	624,5	36 26 12 1/4"	29/03/1972	75,9-624,3	si	no	no	562	Pozo seco
F1 (E-18)	618678	5679398	117 bnm	1702	36;26; 17 1/2; 12 1/4; 8 3/4	22/07/1972	117-1702	si	1	si (gas)	1658	Productor de gas abandonado
Antaro Nº1 (E-19)	755880	5737006	444	1153,25		15/01/1993	4,5- 1153,25	S/I(*)	2	no	600	Pozo seco. correlación con formaciones de la zona. Descripción micropaleontológica

(*)

msnm: metros sobre el nivel del mar

bnm: bajo el nivel del mar

mbns: metros bajo el nivel de la superficie

”: pulgadas

P.F. Prueba de Formación

S/I: Sin información

19. REF 19-P. Cuencas Sedimentarias en el Valle Central (entre Temuco y Golfo del Corcovado). Sergio Céspedes y Carlos Johnson, 1984

En este estudio se presenta la estratigrafía, eventos tectónicos más importantes y la evolución paleogeográfica de las cuencas de Temuco, Lonquimay y Osorno, con extensión hasta el Golfo del Corcovado. La cuenca de Temuco se ubica en el valle central, entre Villarrica o Altos de Loncoche, por el sur y Victoria por el norte, con posible extensión hasta los Angeles. Al occidente limita con la cordillera de la Costa y al oriente, con la cordillera de Los Andes. La cuenca de Lonquimay se ubica al este de Temuco, quedando fuera del dominio del Valle central, pero geológicamente está vinculada a la cuenca de Temuco.

En este informe se hace referencia a los pozos profundos construidos por ENAP, en donde recalcan que el mayor conocimiento geológico se tiene al oeste de Temuco, donde hay más de 1.000 m de sedimentos terciarios sobre el basamento paleozoico. Se realizó la estratigrafía de los sectores Labranza, Cunco (correlación estratigráfica de los pozos profundos, Labranza 1 y Cunco 1, con unidades geológicas reconocidas en la zona), Lonquimay, Temuco, Puello y Huimpil.

Entre las conclusiones que tiene este informe se tiene:

1) Los pozos al occidente de Temuco indican la existencia de una cuenca terciaria con relleno de sedimentos eocénicos y marinos del Mio-Oligoceno. Esta fosa tendría un espesor del orden de 1.200 m de sedimentos, apoyados sobre el basamento metamórfico del paleozoico.

2) El sector más oriental de la cuenca de Temuco se reconocen intercalaciones marinas del Mio-Oligoceno con sedimentos vulcanogénicos, detectados en el pozo Cunco. Así, en este estudio se postula la presencia de un cordón volcánico durante este período, cuyas raíces de este volcanismo corresponderían a las rocas graníticas de la actual cordillera Andina.

3) Los sedimentos terciarios de Lonquimay representan una facie continental de la cuenca marina mio-oligocénica. Por su ubicación paleogeográfica sería tras-arco volcánico

4) La Cuenca de Temuco corresponde a una fosa- relicto que tenía continuidad con la Cuenca de Lonquimay y con la fosa de Ñirihuau en Argentina.

5) De los pozos perforados en el área occidental se detectó producción de gas no comercial en los pozos Labranza 2 y 3. El acumulador de mayor interés corresponde a un horizonte de areniscas del Eoceno. Tal nivel estratigráfico tiene una topografía distinta a la del basamento.

6) El sector oriental de la Cuenca de Temuco, contiene sedimentos terciarios y estratos mesozoicos de ambiente marino y continental. Las rocas jurásicas reconocidas tienen buenas condiciones de roca madre petrolífera.

Dentro de este estudio, se presenta un perfil geológico entre el pozo F (costa afuera) y cerro Callulafquen un mapa de distribución de facies del mio-oligoceno, un mapa de distribución de los sedimentos eocénicos, dos secciones estratigráficas norte-sur y este-oeste de la cuenca de Temuco, un perfil estratigráfico norte sur (Traiguén a Rahue). Además entrega las columnas estratigráficas generalizadas de Estratos de Lonquimay, Triásico de Huimpil, estratos Jurásicos en Lonquimay (cercano al área de estudio), las columnas estratigráficas de los pozos Labranza 1 al 10, Chol Chol 1-2, Los Pinos 1, Freire, Cunco 1 y un mapa geológico del área Temuco − Chiloé.

Información Útil para el Estudio: Este trabajo es de gran utilidad para la caracterización geológica de superficie y subsuperficie de la zona y se utilizará en la caracterización de la geometría de las cuencas en estudio.

20. REF 20-P. El Mesozoico y Cenozoico, en el valle central y Cordillera Andina (entre Temuco y Los Ángeles). Sergio Cespedes, 1987

En este trabajo se analizaron los antecedentes geológicos y geofísicos entre Temuco y Los Ángeles, y su propósito fue definir las perspectivas petrolíferas de la región.

Se realiza una descripción de las unidades geológicas y su distribución, partiendo desde el zócalo paleozoico, la cobertura Mesozoica y la cobertura Cenozoica.

Individualizan la cuenca de Temuco en 4 elementos geomorfológicos, los cuales son:

- Dorsal de Cautín: se identifica por el Triásico de Huimpil-Llafquetué y también por la presencia de rocas del Paleozoico al NE de Pitrufquén, y de rocas del Jurásico en Puello y Monte Alto.
- Volcanitas de Ñielol-Pilmahue: afloramientos de rocas volcánicas y volcanoclásticas se presentan en los alrededores de Temuco extendiéndose hacia el norte, que evidencia un arco volcánico secundario al occidentes del arco volcánico principal.
- Subcuenca Labranza: se ubica en el valle central entre el río Toltén al sur y Galvarino al norte. Al poniente limita con la Cordillera de la Costa y al oriente con la dorsal de Cautín o con las volcanitas de Ñielol-Pilmahue. Se hace una caracterización de la estratigrafía de subsuperficie en base a los pozos profundos perforados por ENAP.
- Subcuenca de Huichahue: se desarrolla en el valle central, entre Villarrica por el sur y Los Angeles por el norte. Al oriente limita con la Cordillera de los Andes y al poniente con rocas paleozoicas de la Cordillera de la Costa o con las rocas volcánicas de Ñielol-Pilmahue. Se realiza la caracterización de la estratigrafía de subsuperficie en base al pozo Cunco 1, ubicado en el sector suroriental de la cuenca.

En este informe se realiza una breve descripción de los análisis geoquímicos de potencial petrolíferos de los pozos profundos, donde las únicas manifestaciones de hidrocarburos se dieron en los pozos Labranza 2 y 3, con producción de gas metano no comercial. Recalcan que la Arenisca Labranza constituye un horizonte de interés prospectivo, pero al parecer de distribución restringida.

En cuanto a la geofísica, se realizó la recopilación e interpretación de los trabajos de sísmica, gravimetría y magnetometría. En base a la interpretación sísmica de los trabajos realizados , se desarrollaron los pozos profundos. En cuanto a la subcuenca de Labranza, se destaca como estructura interesante el Alto de Labranza, con área cerrada de unos 10 Km^2. En la subcuenca de Huichahue, la sísmica muestra espesores del relleno sedimentario de 3.000 m, en estaciones ubicadas entre Victoria y Curacautín.

En cuanto a la caracterización del cenozoico en la Cordillera de los Andes, su evolución puede organizarse en dos ciclos mayores, separados por discordancia angular: 1) ciclo Eoceno-Mioceno que constituye el sistema arco volcánico − cuenca de intrarco (dos unidades volcánicas, una principalmente lávica y la otra piroclástica, separadas por un episodio sedimentario), 2) ciclo Plioceno-Holoceno que constituye el sistema de arco volcánico (estructuras volcánicas que se distribuyen a lo largo de la cordillera).

Posteriormente en este trabajo se presenta un cuadro tectónico del área y las perspectivas petrolíferas en los depósitos del Jurásico y del Terciario de las subcuencas de

Labranza y Huichahue y de la Cordillera Andina. En Labranza se detectan dos horizontes de acumuladores de interés petrolífero: 1) Arenisca Boroa (producción de agua salada) y Arenisca Labranza solo en dos pozos se obtuvo gas, sin valor comercial y en 9 dieron producción de agua salada. Sin embargo, en el cuadro estratigráfico la Arenisca Labranza y sedimentos inferiores aparecen rellenando paleorelieves del basamento, por lo cual ambas superficies de techo no son paralelas. Esto significa que la mayoría de los pozos perforados pueden estar fuera de la trampa, en el horizonte Arenisca Labranza. Mientras que la falta de cierre explicaría la producción de agua salada que se ha registrado en casi todos los pozos. En Hichahue, concluye que la cobertura Cenozoica y Mesozoica sobre rocas del Paleozoico, que se postula que existe según los antecedentes geológicos del área, pueden constituir una cuenca de interés prospectivo de hidrocarburos, con tendencia a producir gas metano. Finalmente, para la Cordillera de los Andes el área de mayor interés petrolífero se encuentra en el sector de río Bio Bio, al sureste de Lonquimay, pero su interés prospectivo petrolífero es menor a las subcuencas Labranza y Huichahue.

Se presentan algunos mapas de interés, como: esquema paleogeográfico, Ciclo Andino Triásico superior − Cretácico Inferior. Presenta una tabla con análisis inmediato, poder calorífero y determincaión de azufre del carbón Huimpil, mapa de distribución de afloramientos del Jurásico, un esquema peleogeográfico del Eoceno-Mioceno, un perfil geológico mejorado entre el pozo F y cerro Callulafquen (Figura 2-10), mapa de ubicación de pozos perforados por ENAP, mapa de elementos geomorfológicos en la cuenca de Temuco y además, la información mencionada en la referencia REF 20-P, mapas de prospección sísmica , en la provincia de Cautín, mapas de isobático del basamento en Labranza, mapa de anomalía de Bouguer en provincias Bio Bio y Cautín y un plano geológico Temuco y Los Angeles.

Información Útil para el Estudio: Este estudio es una completa compilación y análisis de otros estudios realizados por ENAP en la cuenca de Temuco. Es de gran utilidad en el estudio de la geología de superficie y subsuperficie, geofísica y también en la caracterización geotectónica del área de estudio.

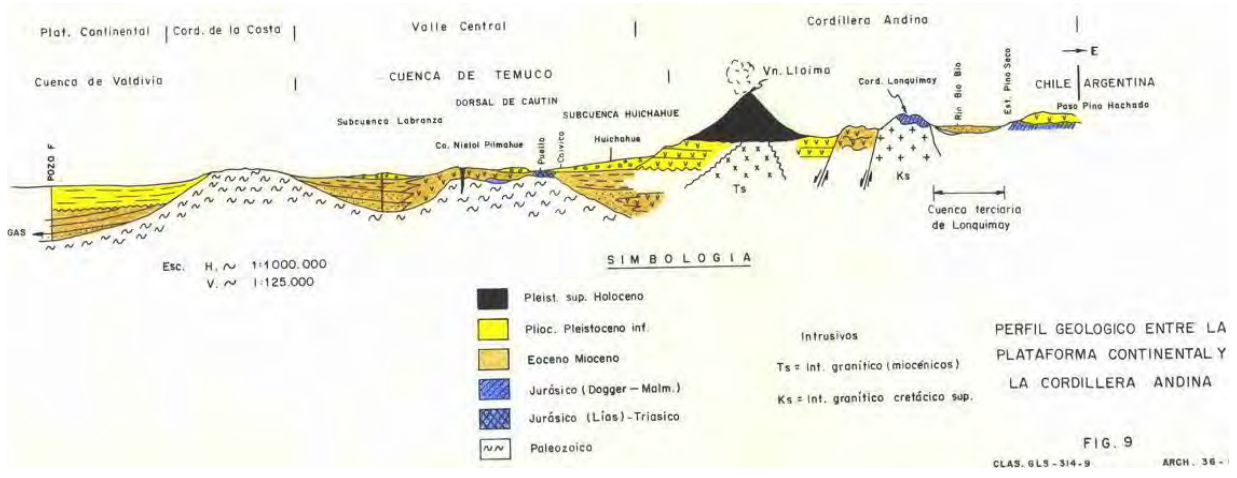


Figura 2-10: Perfil Geológico entre el pozo F y cerro Callulafquen (Fuente ENAP)

21. REF 21-P. Trabajos de Gravimetría en Boroa-Cautín, Toltén-Lago Budi, Cholchol y Labranza. ENAP, 1971-1973

Se incluyen dentro de esta referencia varios trabajos de gravimetría realizados por ENAP, en la subcuenca de Temuco, con el objetivo de estudiar la geometría del techo del basamento con fines de exploración de hidrocarburos. Estos trabajos se resumen a continuación, en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6: Recopilación de trabajos de gravimetría realizados por ENAP

Informe	Año	Observaciones
Gravimetría Labranza	1971	Análisis de la anomalía de Bouguer, anomalía residual e isobático del basamento.
Boroa-Cautín	1972	Análisis de la anomalía de Bouguer, anomalía residual y profundidad del basamento
Gravimetría zona Cholchol	1972	Análisis de la anomalía de Bouguer e isobático del basamento en la zona Cholchol. Incluye además plano compilatorio de la zona Cholchol-Labranza Anomalía de Bouguer, anomalia residual, segunda derivada .
Zona Costera Toltén-Lago Budi	1973	Análisis de la anomalía de Bouguer, anomalía residual e isobático del basamento. Incluye plano estimación gravimétrica del relieve preterciario y plano segunda derivada

Gravimetría Labranza

La gravimetría realizada en Labranza (Figura 2-11), cubrió un área aprox. de 75 km^2 con espaciamiento de 600 m entre cada estación. La anomalía de Bouguer se corrigió considerando como Datum el nivel del mar y como densidad superficial de 2 gr/cm^3, que corresponde a la densidad del material fluvioglacial cuaternario, que cubre casi la totalidad del área. Algunas conclusiones de este trabajo son:

a) Abrupta caída de la gravedad hacia el este, en el flanco del río Cholchol. Se interpreta como una falla cuyo salto llegaría como mínimo a 250 m. Esta falla también se observa en superficie, al oeste del río.

b) Alto gravitacional de superficie cerrada de 2 Km^2 que indica una elevación del zócalo de poco más de 300 m, con lo cual, su culminación llegaría a unos 700 m bajo la superficie del terreno (máximo Labranza).

c) El máximo Labranza Este, ubicado al NE del anterior, alcanza la misma amplitud, pero triplica su área cerrada.

d) Alto gravitacional máximo Cautín, se ubica al oeste de la localidad de Labranza, es la mayor encontrada en la zona. Esta anomalía parece constituida por una intrusión andesítica (por su densidad y forma) y se acercaría hasta los 400 m de superficie

En este informe se presentan los planos de anomalía de Bouguer, anomalía residual, isobático del basamento y dos perfiles con la geometría del basamento.

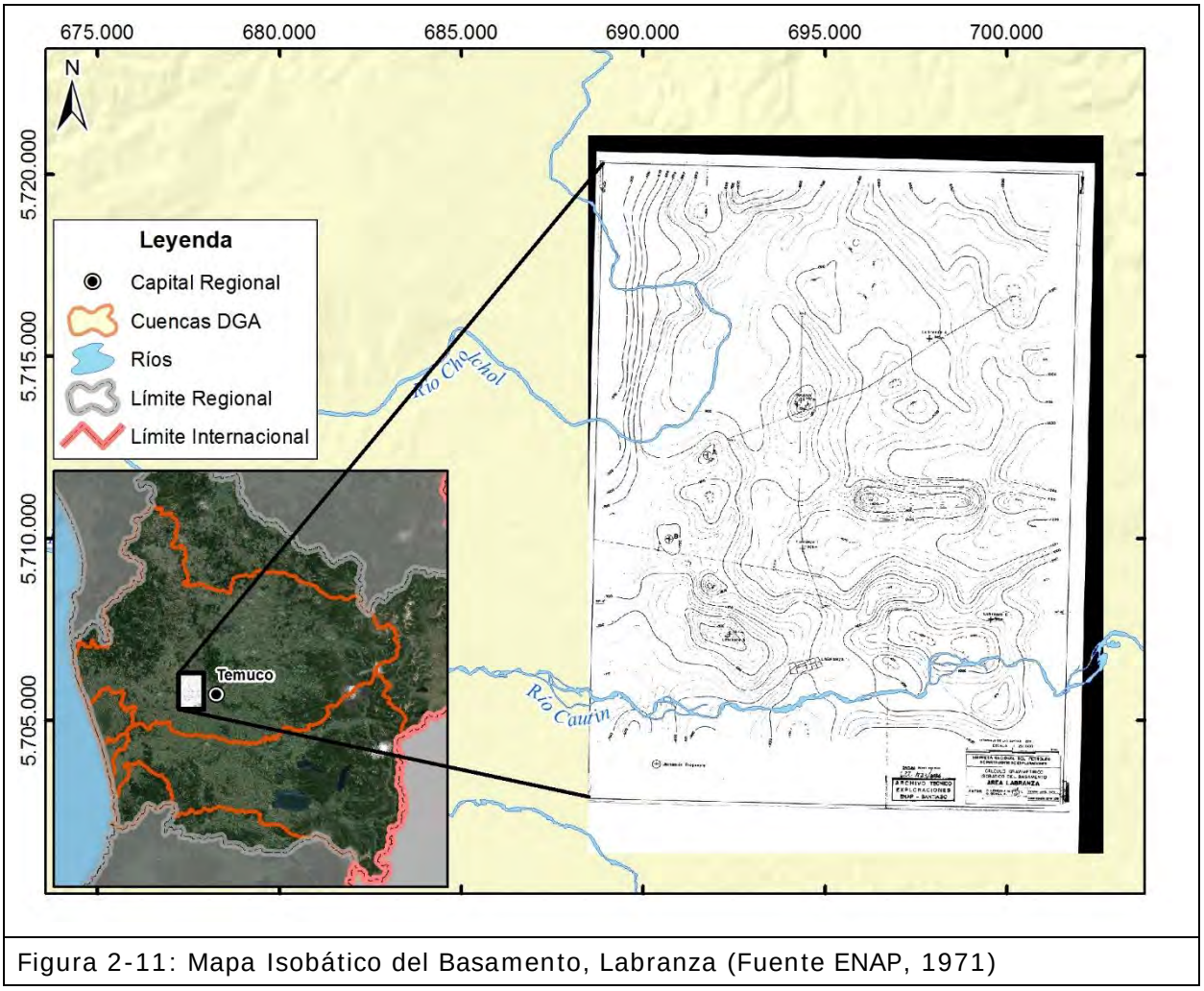


Figura 2-11: Mapa Isobático del Basamento, Labranza (Fuente ENAP, 1971)

Gravimetría Boroa-Cautín

La gravimetría realizada en Boroa-Cautín (Figura 2-12), cubrió un área de 75 km^2 y siguen similar procedimiento que las mediciones de gravimetría en Labranza. Algunas de sus observaciones son:

a) Se observa el máximo Cholchol de extensión 20 km^2 y el bajo que le sigue hacia el sur, abarcando 30 km^2. Este punto del basamento es el más próximo a la superficie llegando a 220 m de profundidad, mientras que el más profundo (mínimo Boroa) no sobrepasa los 740 m.

b) Apreciable elevación de la gravedad hacia el sur, contribuyendo a que las anomalías tengan dirección preferencial E-W. Esta alineación puede ser la de bloques tectónicos que podría atribuirse a la morfología del basamento.

En este informe se presentan los planos de anomalía de Bouguer, anomalía residual e isobático del basamento.

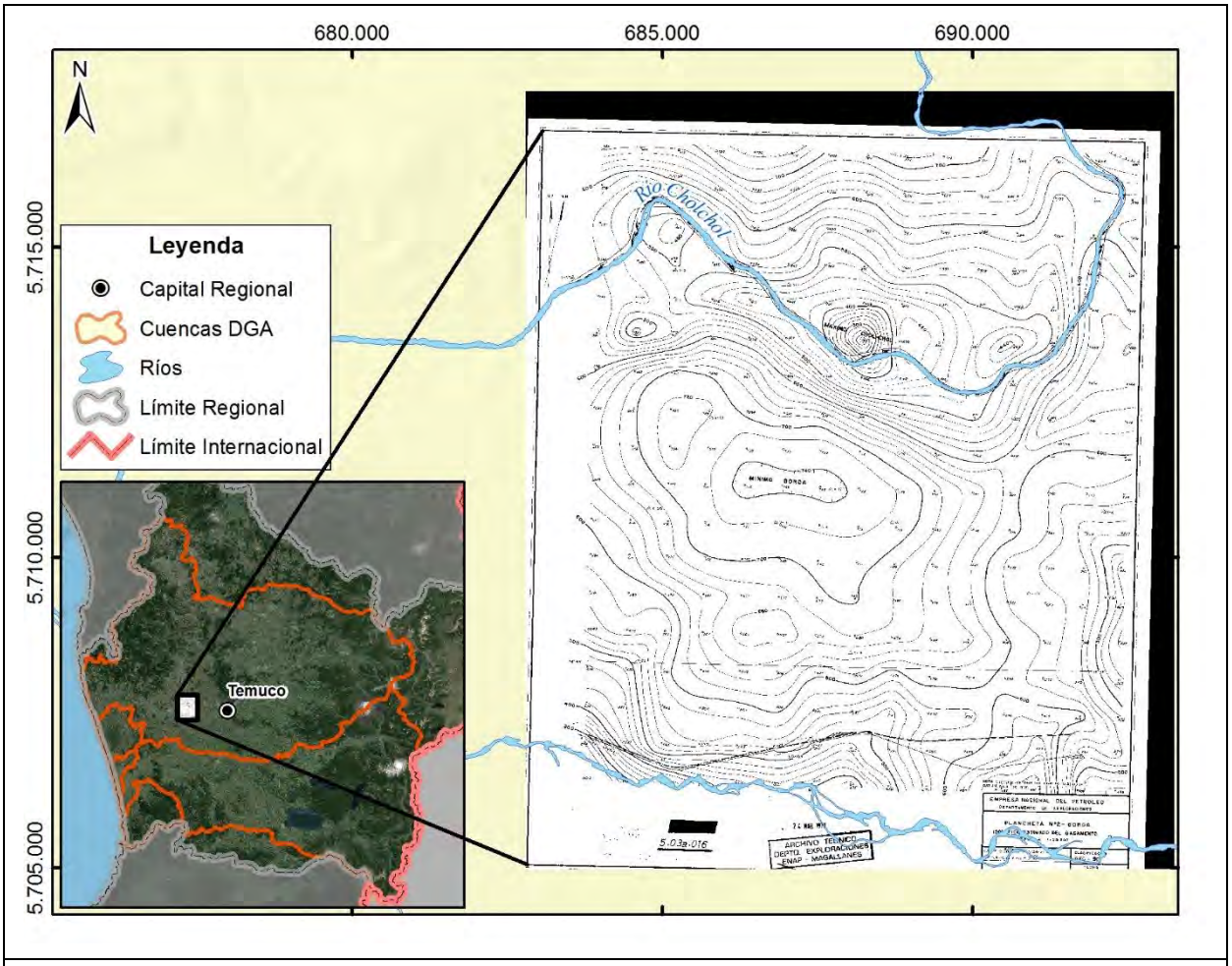


Figura 2-12: Mapa Isobático del Basamento, Boroa-Cautín (Fuente ENAP, 1972)

Gravimetría en Cholchol

La zona cubre un área de 225 km^2 de extensión (Figura 2-13) con un total de 647 estaciones. Entre las observaciones que se hacen en este trabajo se tiene:

a) Anomalía positiva observada al norte de la localidad de Cholchol (Máximo Cholchol Norte). En este sector el basamento se encontraría a la menor profundidad, aunque ligeramente inferior al resto del área.

b) Le sigue en importancia, por su extensión de 10 a 15 km^2 el Máximo Labranza Norte, está en el flanco de los mayores espesores sedimentarios.

c) Las culminaciones menos profundas se encuentran en el flanco oeste. Existen algunas situadas al N y S de Cholchol que llegan a valores menores de 400 mbnm, con posibilidad de llegar a 200 mbm a 5 km al NE de la localidad.

d) Las isoanómalas siguen fielmente la traza superficial de la falla a lo largo del río. Esta falla tendrá en el zócalo un salto del orden de 500 m. Según lo observado, pertenecería a un sistema de fallas de rumbo N-S y de caída hacia el este, que estaría íntimamente ligado al río Cholchol.

En este informe además se adjunta el plano topográfico Zona Cholchol, Anomalía Bouguer, Anomalía Residual, Isobático del basamento (escala 1:20.000). Además planos compilación de anomalía Bouguer, Anomalía Residual y Segunda derivada de zona Labranza-Cholchol (1:40.000).

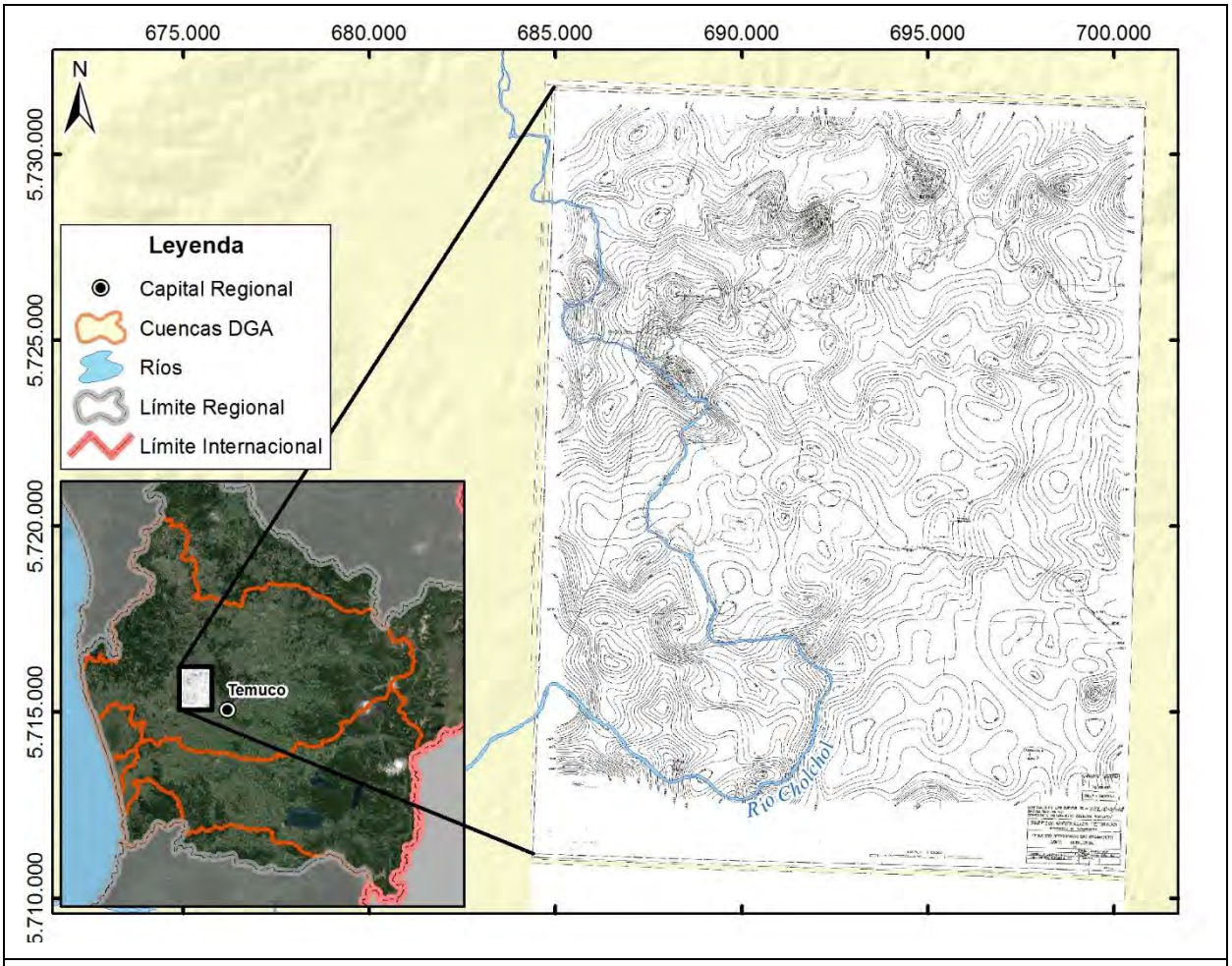


Figura 2-13: Mapa Isobático del Basamento, Cholchol (Fuente ENAP, 1972)

Zona Costera Toltén-Lago Budi

Cubrió un área aproximada de 450 km^2 (Figura 2-14) en sentido norte sur cubriendo casi 40 km y en sentido este-oeste entre 5 y 20 km, dependiendo de la distancia a los afloramientos del basamento. Se midieron 1225 puntos, con espaciamiento promedio entre 500 y 600 m. Algunas observaciones relevantes de este estudio son:

a) Continuo buzamiento hacia el oeste del zócalo, complicado por la aparición de fuertes pendientes que evidencia la presencia de numerosas fallas en la zona.

b) Un rasgo particular en el área, es el Máximo Budi y el situado al oeste, estructuras de considerable cierre y espesor sedimentario: 600 y 1.000, respectivamente.

c) Al oeste del lago Budi, aparecen algunas elevaciones del zócalo en puntos con espesores sedimentarios de 700 a 900 m.

d) Otro punto importante se presenta en la extensa área positiva del Máximo Puyehue.

En este informe se incluye los planos para Toltén y Lago Budi de: anomalía de Bouguer, anomalís Residual, isobático del basamento, plano estimación gravimétrica del relieve preterciario, plano Segunda derivada.

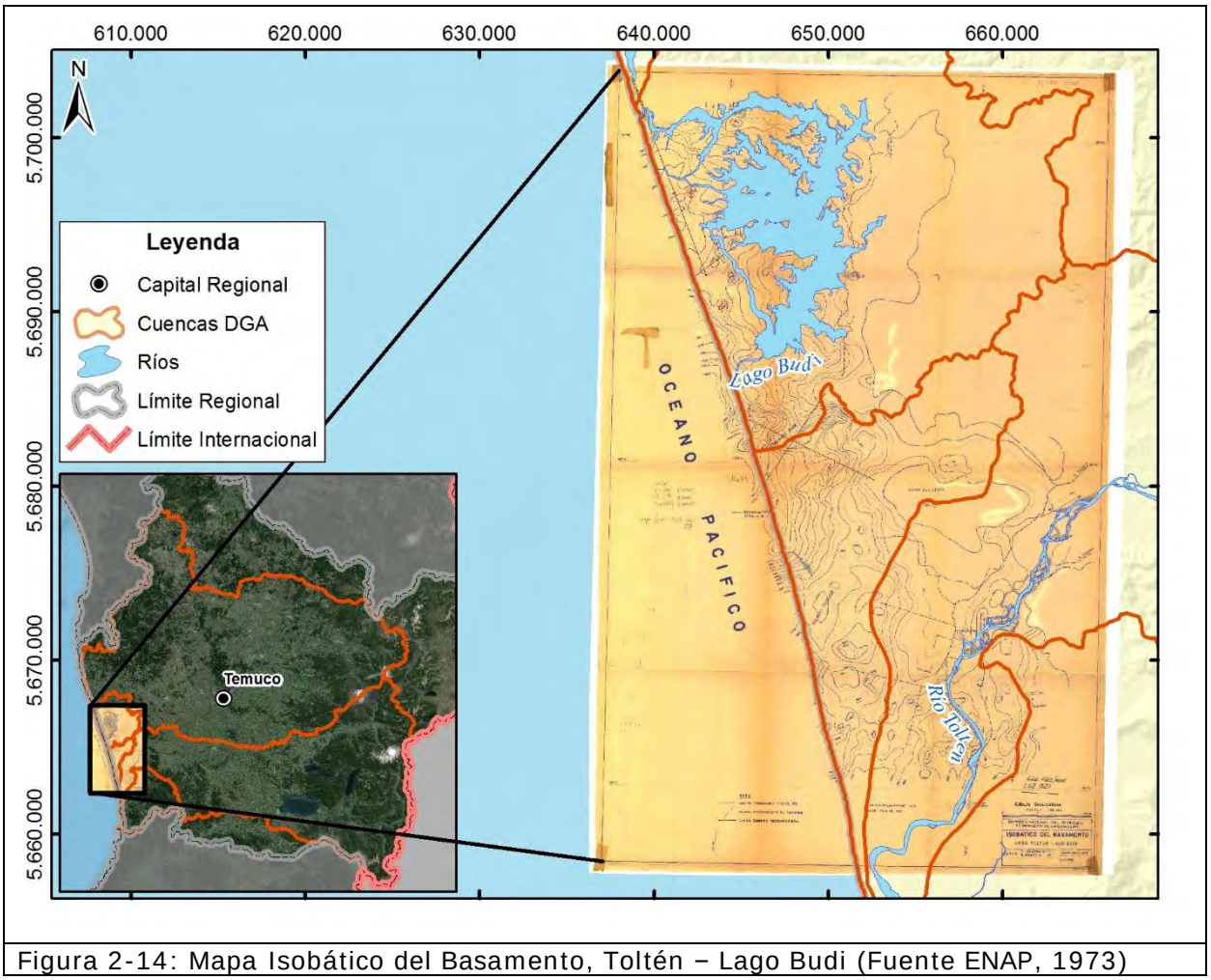


Figura 2-14: Mapa Isobático del Basamento, Toltén – Lago Budi (Fuente ENAP, 1973)

Información Útil para el Estudio: Este trabajo es relevante para conocer la geometría del techo del basamento en las áreas en que se realizó el estudio. Además, estos estudios servirán para calibrar y comparar con los trabajos de prospección gravimétrica que se realizarán en la zona de estudio.

2.2 ESTUDIOS SECUNDARIOS

22. REF 01-S. Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional, Etapa II: Novena Región / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, Álamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda, 1995.

En este trabajo se realizó una descripción hidroquímica básica de las aguas superficiales del Río Toltén, Imperial y sus tributarios principales. El análisis considera una serie de tiempo para la población de datos entre los años 1980 y 1989. La caracterización consistió fundamentalmente en una clasificación de las muestras de las aguas en base a su Conductividad Eléctrica, pH y contenido de iones mayores (Diagramas Piper). La distribución espacial de las muestras es descrita en base a diagramas Stiff.

La base de datos utilizada fue la de Banco Nacional de Aguas (BNA) y del Laboratorio Ambiental perteneciente a la DGA, se utilizó toda la información disponible sin validar la información basada en el cálculo del error por balance iónico u otro método de validación.

Los análisis fueron realizados con las conductividades y pH promedio, diagramas de Stiff modificado basados en las concentraciones promedios de calcio, magnesio, sodio, bicarbonato, sulfato y cloruro. También se realizaron diagramas de barra para los analitos de B, As, Cu y Fe normalizados al límite de la norma chilena para aguas de riego (NCH 1333) y nitratos normalizados con la norma de agua potable (NCH 409).

Se estableció que las aguas del río Imperial son de buena calidad, de condiciones uniformes espacialmente a lo largo de toda la cuenca, no se presentan datos fuera de los límites de la NCH 1333, aguas frescas entre 40 y 70 µm ho/cm (equivalente entre 4 y 7 µS/cm), pH neutro (6,3 a 7,3). Las aguas son bicarbonatadas cálcicas o sódicas.

Se establece que las aguas del río Toltén son de buena calidad, de condiciones uniformes a lo largo de toda la cuenca, no se presentan datos fuera de los límite de la NCH 1333, aguas frescas entre 40 y 90 µm ho/cm (equivalente entre 4 y 9 µS/cm), pH neutro (6,8 a 7,2). En general las aguas son bicarbonatadas cálcicas. No obstante en las zonas cordilleranasy precordilleranas aparece predominio de sodio sobre el calcio, que permite clasificarlas como bicarbonatadas-sódicas.

Información Útil para el Estudio: Aunque es información que debe ser actualizada para los objetivos del Estudio Hidrogeológico, permite tener una primera aproximación a la calidad de la aguas superficiales de la región.

23. REF 02-S. Balance Hidrológico Nacional: regiones VIII, IX y XII DGA. MOP – IPLA, 1983.

El estudio presenta el balance hidrológico a nivel anual de la VIII, IX y X regiones, que fue calculado para un periodo estadístico de 30 años hidrológicos comprendidos entre 1951/52 a 1980/81. Los resultados se presentan en términos de precipitación, evapotranspiración y escorrentía, se tienen además caudales específicos.

El análisis de información contempla precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración real y fluviometría. Se realiza relleno de información, calculando parámetros estadísticos y análisis de frecuencia para los caudales.

Información Útil para el Estudio: Se obtienen balances hidrológicos para las cuencas del Río Imperial, río Toltén y las cuencas costeras de la IX región.

24. REF 03-S. Hoyas Hidrográficas de Chile, 8º Región del Bio Bio, 9º Región de La Araucanía, 10º Región de Los Lagos. DGA, 1980.

En este informe se realiza una caracterización de las hoyas hidrográficas desde la región del Bio Bio a la región de Los Lagos. Respecto a las características de las hoyas hidrográficas de la región de La Araucanía, estas se resumen en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7: Características de las hoyas hidrográficas de los ríos de la Región de La Araucanía

HOYA	Ubicación - Extensión							
	Latitud Sur	Longitud Oeste	Extensión Km2	Origen	Longitud (Km)	Principales Tributarios	Régimen	Gasto medio anual (m3/s)
RÍO IMPERIAL	37°46 - 38°59'	71°27′ - 73°28′	12054	Río Cautín + Río Cholchol	55	Esteros Llancahue, Mañío, Trentren, Lolcura; Río Damas	Pluvial con crecidas de invierno	600
RÍO BUDI	38°44' - 38°59'	73°07' - 73°24'	400	Lago Budi	7	Esteros Llicosa, Pulol, Champillo, Poguilcha, Curilebu.	Pluvial, con crecidas mayores en pleno invierno.	
RÍO TOLTÉN	38°37' - 39°38'	71°33' - 73°15′	7886	Lago Villarrica	123	Esteros Lolén, Antuco, Llollelhue, Pucolón; Ríos Donguil, Mahuidanchi , Quinque, Coipue.	Pluvial, salvo en sus formativos de cordillera donde es mixto	292
RÍO QUEULE	39°05′ - 39°24′	72°51′ - 73°14′	670	Cordillera de la Costa	65	Ríos Boroa, Mailenco; Esteros Guindos, Pirén.	Pluvial, con crecidas de invierno	

Respecto a la cubierta litológica de las hoyas hidrográficas, la calidad del agua, el uso del recurso, en este trabajo se describe lo siguiente:

- **Hoya del Río Imperial**

  Cubierta Litológica: En el tramo del río Cautín las rocas son volcánicas andesítico-basálticas (precordillera) y rocas sedimentarias marinas del Terciario (poniente de Temuco). En el tramo del Río Imperial, las rocas son paleozoicas y/o precámbricas compuestas de gneises, anfibolitas, esquistos y pizarras. Las rocas intrusivas dentro de esta cuenca tienen escasísima representación.

  Calidad del agua: para 19 muestras entre los años 1969 y 1974 la calidad del agua es de pH 7,07; de conductividad 67 m/ mhos.

Uso del recurso: regadío artificial

Observaciones: Pozos profundos perforados en el valle del Traiguén no dieron buenos resultados debido al relleno impermeable del valle central.

- **Hoya del Río Budi**

  Cubierta Litológica: La mayor parte de esta cuenca está inserta en formaciones del Paleozoico, especialmente en pizarras micáceas y gneises, esquistos y cuarcitas. Entre la costa occidental del lago Budi y el océano, se encuentran formaciones cuaternarias y en parte terciarias, como sedimentos fluviales y terrazas marinas.

  Uso del Recurso: Navegación de embarcaciones menores de poco calado

- **Hoya del Río Toltén**

  Cubierta Litológica: Al oriente del lago Villarrica, está dominada por rocas volcánicas andesíticas a basálticas cuaternarias, derivadas de la actividad de los volcanes Llaima, Villarrica, Lanín, Quetrupillán, etc. Más al oriente, afloran rocas volcánicas del Cretácico, con carácter riolítico a basáltico. En el límite internacional y al norte del río Pucón y alrededores del lago Caburga hay intrusiones graníticas. Asimismo las nacientes del río Allipén se labran en extensiones grandes de rocas intrusivas. En pleno Valle Central, los rellenos que corta el río son principalmente cuaternarios, compuestos por materiales fluviales, lacustres y glaciales; pero en la margen oeste de él, se encuentran rocas sedimentarias marinas y continentales con intercalación de carbón y pizarras bituminosas, de edad miocena. En escasos sectores de la hoya afloran rocas del Paleozoico. Se trata de gneises, anfibolitas, filitas, cuarcitas y pizarras.

  Calidad del agua: para 19 muestras de agua entre los años 1969 y 1975 se tiene un pH de 7,7 y conductividad de 65 m/ mhos.

  Uso del Recurso: Las aguas de esta hoya son navegadas por embarcaciones menores y en esta cuenca se encuentran importantes centros turísticos que aprovechan la belleza del paisaje.

  Observaciones: En cuanto al riego artificial, un canal de verdadera importancia es el canal Allipén. Toma en la ribera norte del río Allipén aguas arriba de Los Laureles. Con una capacidad inicial de 22 m^3/s está destinado a regar un área de 25000 ha en los alrededores de la ciudad de Freire. Hay otros pocos canales menores destinados al riego artificial y al uso industrial.

- **Hoya del Río Queule**

  Cubierta Litológica: Rocas sedimentarias y metamórficas del Paleozoico que son características de la cordillera de la Costa en el centro sur chileno. Está formada principalmente por pizarras micáceas, gneises y cuarcitas.

  Uso del Recurso: El tramo final puede navegarse por embarcaciones de poco calado, hasta Cayulfu.

Información Útil para el Estudio: Este estudio se utilizará, en una primera aproximación, para la caracterización fisiográfica de las cuencas de los ríos Imperial, Toltén, Budi y Queule.

25. REF 04-S. Intrusión Salina en el Lago Budi. Análisis Hidrodinámico y estudio de la corriente de densidad. Tesis de Magister. Universidad de Chile. Sandoval L., 2009.

Este trabajo de tesis corresponde a una completa caracterización del sistema hídrico del lago Budi. El desagüe del lago Budi hacia el mar se da a través del río Budi, en la boca del cual se genera una barra de sedimentos debido a la acción de la marea que permanece cerrada durante gran parte del año y es removida artificialmente para evitar inundaciones. Esto altera la calidad del agua debido a una corriente de densidad generando una fuerte estratificación por salinidad en el Lago impidiendo el paso de oxígeno a capas más profundas.

Se realizaron modelos de: 1) corriente de densidad con el Software Mossem, 2) flujo de agua existente entre el lago y el mar, 3) modelación eco-hidrodinámica con los Software Dyresm y Caedym. Se definieron distintos escenarios del manejo de la barra de sedimentos y sus implicancias en la calidad del agua en el lago.

Entre los principales resultados de este estudio se tiene:

- Mediciones de perfiles verticales de salinidad realizadas confirmaron el ingreso de una corriente de densidad a través del río Budi, luego de la remoción de la barra. La calibración de la corriente entregó un factor de mezcla y un coeficiente de arrastre iguales a 1.22 y 0.01.
- Junto con la corriente de densidad, se modeló el flujo de agua existente entre el lago y el mar. Los caudales de intercambio alcanzan magnitudes cercanas a los 130 [m^3/s] para la condición de llenado (alta marea) y de 150 [m^3/s] para la de vaciado (baja marea).
- La estratificación producida por el ingreso de la corriente de densidad, se mantuvo durante la primavera y parte del verano, viéndose destruida por los fuertes vientos de enero de 2007, lo que permitió calibrar la velocidad y dirección del viento sobre el lago Budi.
- Los resultados muestran concentraciones de nutrientes en niveles de eutrofia para agua dulce, e indican la generación de una capa anóxica bajo la haloclina, la que se mantiene hasta producida la mezcla completa de la columna de agua.
- Los resultados de los diferentes escenarios de manejo de la barra indican que su manejo no sería fundamental en determinar el estado trófico del lago.

Información Útil para el Estudio: Presenta información de calidad de agua del lago Budi y su evolución temporal y espacial. Se realiza un estudio de intrusión salina superficial que será de utilidad en el estudio hidrogeológico de la cuenca del río Budi.

26. REF 05-S. Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las regiones del Maule, Bio Bio y La Araucanía. División de Estudios y Planificación, 2010.

A través de un modelo de precipitación-escorrentía a escala diaria se estiman caudales superficiales mensuales en 26 cuencas de las regiones del Maule, Bio Bio y La Araucanía, para distintas probabilidades de excedencia.

La estimación de la escorrentía diaria en las cuencas pluviales, se ha efectuado a través de un modelo lluvia-escorrentía denominado SIMED. En este modelo el ciclo hidrológico se describe a través de un sistema que considera los procesos de evapotranspiración,

infiltración, almacenamiento de humedad, generación de escorrentía directa, percolación profunda y flujo base, los cuales se evalúan a nivel horario. El modelo utiliza como datos de entrada la lluvia diaria y evaporación mensual sobre la cuenca, los cuales son convertidos en magnitudes horarias a través de tablas de distribución horarias para la lluvia y evaporación de la cuenca.

Las cuencas a modelar se seleccionaron bajo dos criterios: i) cuencas pluviales (cuencas con estaciones fluviométricas bajo la "línea de nieves regional", ii) cuencas sin un alto grado de intervención antrópica a través de canales y embalse.

De las 26 cuencas modeladas, 8 están ubicadas en el área de estudio, y corresponden a las cuencas que drenan hacia las siguientes estaciones fluviométricas (DGA): i) Río Lumaco en Lumaco, ii) Estero Chufquén en Chufquén, iii) Río Quillén en Galvarino, iv) Río Cautín en Rari-Ruca, v) Río Allipén en Los Laureles, vi) Río Trancura antes Río Llafenco, vii) Río Puyehue en Quitratúe, y viii) Río Donguil en Gorbea.

Información Útil para el Estudio: Se presenta un modelo de precipitación-escorrentía que será utilizado para compararlo con el modelo que se aplicará en este estudio.

27. REF 06-S. El Riego en Chile. Julio Sandoval Jeria, 2003

Este trabajo resume la historia del riego en Chile, de las instituciones gubernamentales encargadas de su manejo, y se resumen las principales obras hidráulicas construidas para estos efectos a nivel nacional y sus fuentes, separadas por Región.

Información Útil para el Estudio: Principalmente la descripción de las obras presentes en la Hoya del Río Imperial (Canal Pillanlelbún e Imperial, Canal Quepe Norte y Quepe Sur, Canal Perquenco y Popeta, Regadío Victoria − Traiguén −Lautaro y Canal La Victoria de Vilcún) y de la Hoya del Río Toltén (Canal Allipén y Regadío Faja Maisan).

28. REF 07-S. Determinación del Comportamiento de las Precipitaciones y de su agresividad climática, en las regiones del Bio Bio y de La Araucanía. Claudio Olivares, 2009.

Estudio del comportamiento temporal y espacial de las precipitaciones, a través del análisis mensual y anual (hasta el año 2006) de 72 estaciones en la región del Bío-Bío y la Araucanía (36 en cada una).

En base a cálculos de distintos índices (de Concentración, Fournier, etc) se analizó tendencias y agresividad climáticas de las precipitaciones.

Ambas regiones presentaron una Moderada Agresividad en gran parte de sus estaciones. Además, se constató que muestran valores anuales de agresividad pluvial bastante heterogéneos, lo que determina una alta variabilidad de estas zonas.

Información Útil para el Estudio: Caracterización temporal y espacial de las precipitaciones, en el largo plazo, con período de análisis entre 1930-2006.

29. REF 08-S. Curvas de intensidad duración frecuencia en estaciones pluviométricas. Labra, 2005.

Se presenta la construcción de curvas IDF en cinco estaciones pluviográficas de la región del Bío-Bío y cuatro en La Araucanía (Curacautín, Pucón, Pueblo Nuevo (Temuco) y Traiguén). Se calcularon las intensidades máximas para 1,2,4,6,8,12 y 24 horas de

duración, asociadas a períodos de retorno de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 y 100 años. Además se determinó que las intensidades máximas se ajustan a la distribución de probabilidad de Gumbel.

Información Útil para el Estudio: Este análisis permite comprender el comportamiento de las precipitaciones de la región, y permitiría la extrapolación de la información pluviográfica a zonas de características similares, con sólo registros pluviométricos.

30. REF 09-S. Caudales de reserva para abastecimiento de la población y usos de interés nacional en el río Toltén. Departamento de Estudios y Planificación, DGA, 2007.

El estudio determina los caudales de reserva estructurado en tres ejes: medio ambiental-turístico, acceso al recurso hídrico para desarrollo de supervivencia y/o productivo de las comunidades e individuos indígenas, y abastecimiento de agua potable a la población. Por ello se determinaran tres tipos de caudales de reserva asociados a estos tres ejes.

Esto se realiza para la cuenca del río Toltén aguas arriba de la ubicación de los puntos de captación de una solicitud de derecho de aprovechamiento de aguas superficiales no consuntivo solicitados correspondiente al expediente ND-0902-467 (N:5679,7 kms; E: 673,1 kms).

Del análisis realizado, se concluye que el caudal de reserva asociado al abastecimiento de la población y al interés nacional, en la zona en estudio al año 2025 es de un total de 6.500 L/s.

Información Útil para el Estudio: Presentación de usos y demandas de agua, básicos y vulnerables, en la cuenca del río Toltén.

31. REF 10-S. Catastro y Caracterización de las Fuentes de Aguas Minerales y Termales de Chile. Arturo Hauser, 1997

Este estudio da cuenta de la distribución y características fisicoquímicas de las fuentes de aguas termales y minerales en Chile. Realiza un catastro de estas fuentes, caracterizando la temperatura y química de las aguas, realizando consideraciones referente a los factores que determinan su origen, carácter fisicoquímico y potencial económico.

En este estudio se vincula la génesis de las aguas termales, según un determinado ambiente geográfico, climático, geológico y tectónico, los que pueden ser: 1) Ambiente Andino Volcánico, que presenta dos subcategorías: Ambiente Volcánico Altiplánico y Ambiente Volcánico Sur); 2) Ambiente Andino Tectónico, que presenta dos subcategorías: Ambiente Falla Pocuro y Ambiente Falla Liquiñe-Ofqui; 3) Ambiente Litoral o Costero; y 4) Ambiente Cordillera de la Costa Central. Las fuentes termales y minerales de la región de la Araucanía se clasifican mayormente dentro de la categoría ambiente Falla Liquiñe-Ofqui y menormente en ambiente Volcánico Sur. La traza de la falla Liquiñe-Ofqui es de rumbo ~N-S y se prolonga por cerca de 1.000 km, desde la IX a la XI Región, concentrándose el 30% de las fuentes de aguas termales de Chile. Es así como en este ambiente, los niveles de precipitaciones de tipo pluvial, nival y mixto proporcionan los caudales iniciales, para activar estos sistemas hidrotermales, mientras que la proximidad a centros volcánicos activos, ayuda a incrementar la temperatura de las aguas (35 - 90ºC).

Este estudio detectó la existencia de 244 fuentes termales, 46 fuentes minerales y 14 fuentes mixtas en Chile. En las cuencas de los ríos Imperial y Toltén se contabilizaron 20

fuentes de aguas termales y 3 fuentes de aguas minerales. Las aguas involucradas en los sistemas geotermales tendrían, mayoritariamente, un origen meteórico.

Información Útil para el Estudio: Este estudio aporta con la recopilación y caracterización hidroquímica de varias fuentes termales y minerales reconocidas en la zona de estudio, que serán de utilidad para la caracterización hidroquímica de las cuencas de los ríos Imperial y Toltén.

32. REF 11-S. Remociones en masa en Chile. Arturo Hauser, 2000

En este estudio se identifican y caracterizan los principales procesos de remoción en masa de ocurrencia común en Chile. Estos se subdividen en flujos (de barro, detritos, lahares, solifluxión), deslizamientos, desprendimientos, subsidencia, hundimientos, avalanchas o taludes y jokulhlaups. La Figura 2-15 detalla en forma general la localización territorial de los principales procesos de remoción en masa de la IX Región.

Entre los factores condicionantes y ambientes geográficos que favorecen las remociones en masa de la región de La Araucanía, se consideran los siguientes:

- Los suelos residuales resultantes de la alteración in situ de rocas graníticas paleozoicas de la cordillera de Nahuelbuta, favorecen el desarrollo de flujos (detritos y/o barro)
- En relación con fases de erupción de algunos volcanes activos como el Llaima, Villarrica, han ocurrido voluminosos flujos laháricos)

En este estudio se hace hincapié a la intensa acción de los procesos físico-químicos, químicos y climáticos sobre las rocas graníticas de la cordillera de Nahuelbuta, cuya altura media se sitúa en el rango 600-800 m.s.n.m. Estos procesos condicionan el desarrollo de gruesos suelos residuales ("maicillo") los que en algunas zonas alcanzan hasta 25-35 m. Este tipo de suelo, cuando incorpora importantes contenidos arcillosos, resultan propicios para conformar carpeta de rodados en caminos secundarios. Además, bajo los efectos de las altas precipitaciones locales, estos suelos pierden su cohesión cuando se encuentran en laderas empinadas y donde escasea la cobertura vegetal. Los flujos en esta zona se describen como de gran movilidad, favorecida por morfologías empinadas, y que con reiterada frecuencia, son inducidos por la acción del hombre debido al sobretalaje y/o producción de carbón vegetal.

Los flujos laháricos son flujos hiperconcentrados vinculado a procesos de origen volcánico y sus característica y potencial de destrucción depende de sus procesos de iniciación y de cómo estos cambian en la medida del avance ladera abajo. En las laderas del volcán Llaima se han reconocido varios flujos laháricos y el mayor de ellos corresponde a 35 Km encausados por el valle del río Trufultruful, originado por una violenta fase eruptiva en el año 1957. En cuanto al volcán Villarrica, su actividad eruptiva ha provocado el desarrollo de voluminosos y destructores flujos laháricos, que siguen esteros preexistentes que irradian desde el cráter del volcán.

Remociones locales que provocan desplazamientos lentos, caracterizados por continuas deformaciones que pueden dar lugar a posteriores deslizamientos bajo la influencia del agua y/o gravedad (reptación lenta), se reconocen en el segmento de terreno comprendido entre los 36 y 40ºS. Corresponden a extensas secuencias sedimentarias de origen marino y terrígeno (limolitas y lutitas de edad terciaria englobadas en las formaciones Chol-Chol y Mininco) que enmantan las rocas metamórficas y/o graníticas que forman parte del relieve, ocurriendo el fenómeno de reptación.

Deslizamientos puntuales, desencadenados por actividad sísmica se han reconocido en el lago Caburga, cerro Añiques ubicado al sur del volcán Villarrica. También vinculados a erosión de ríos por crecidas como ocurre en el kilómetro 7.000 camino Collipulli-Angol.

Información Útil para el Estudio: Este estudio aporta, a muy grandes rasgos, los principales riesgos geológicos de la región.

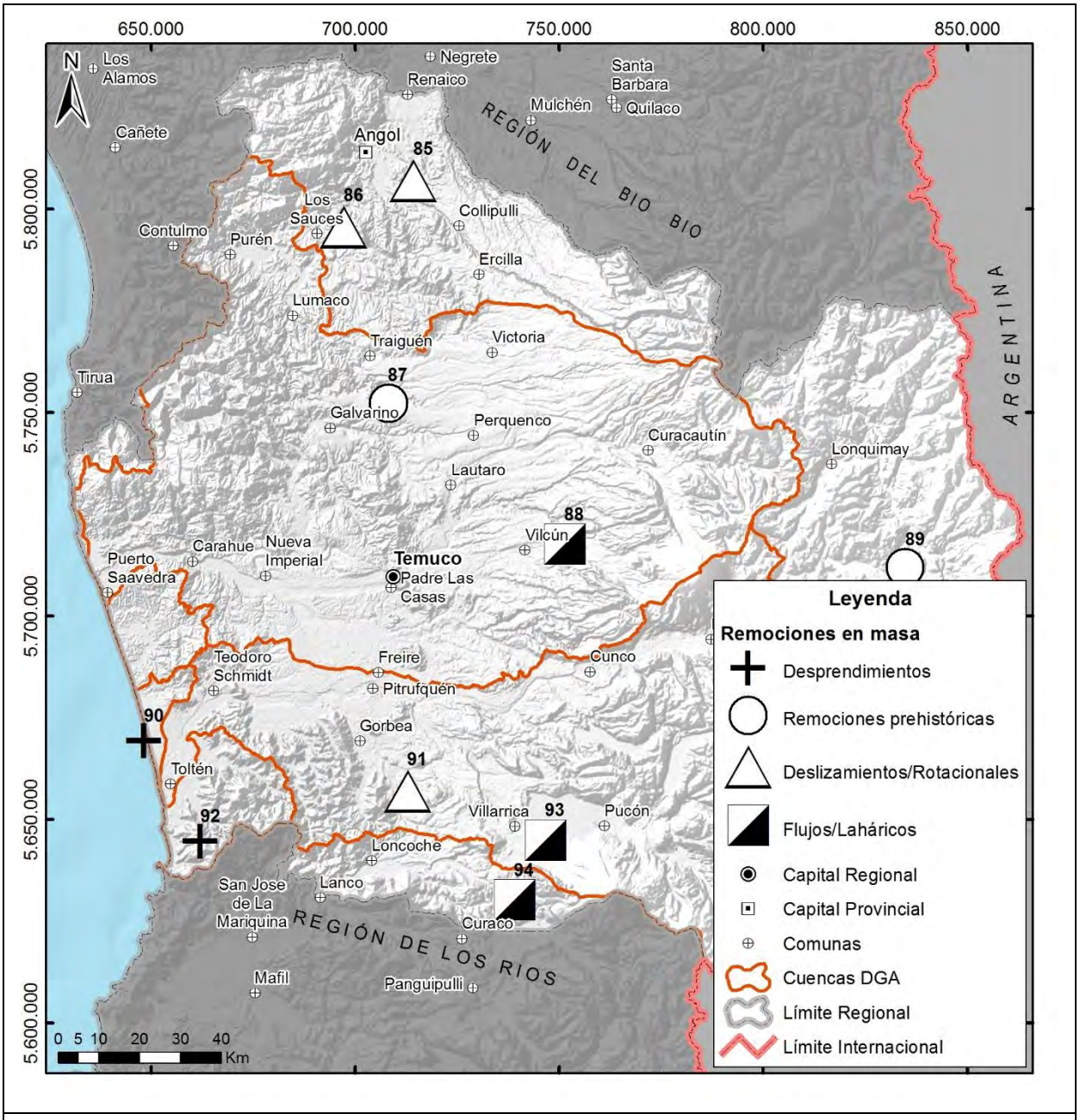


Figura 2-15: Mapa de ubicación de diversos tipos de remosiones en masa en la región de La Araucanía, (modificado de Hauser, 2000)

33. REF 12-S. Depósitos Metalíferos, de rocas y minerales industriales y de recursos energéticos del sector occidental de la IX Región de La Araucanía. Sernageomin, 2005

En este estudio se reconocieron dos provincias metalogénicas en base a la relación existente entre los recursos minerales identificados y las diferentes unidades geológicas, que coinciden con los rasgos morfológicos mayores de la región:

1) Provincia de la Cordillera de la Costa: Se caracteriza por la presencia de anomalías geoquímicas y ocurrencias y/o depósitos metalíferos de: 1) Cr-Ni, Cu-Zn, Fe de pequeñas dimensiones y bajas leyes, hospedados en Complejo Metamórfico Bahía Mansa del ¿Devónico?-Triásico. 2) Placeres de Au, asociados con sedimentos fluviales y de playa de Pleistoceno-Holoceno, explotados artesanal y esporádicamente. 3) Ti, Fe, Cr en arenas de playas y dunas del Pleistoceno-Holoceno. 4) yacimientos de rocas y minerales industriales explotados para la fabricación de ladrillos, cerámica blanca (arcilla plástica y caolín), abono en floricultura y en la elaboración de tiza (talco), fundente siderúrgico (grava de cuarzo), lajas para construcción y ornamentación (esquistos máficos), obras viales y elaboración de hormigones (áridos). 5) mantos de carbón antracítico y subbituminoso, en rocas sedimentarias triásicas y terciarias, no son explotados debido a que son de reducida potencia y extensión.

2) Provincia de la Depresión Intermedia: Se caracteriza por la presencia de depósitos metalíferos y yacimientos de rocas y minerales industriales y ha sido explorada en la búsqueda de recursos energéticos. En esta región se tienen: 1) Placeres de Au explotados de manera intermitente y artesanal relacionados con depósitos fluviales y glaciofluviales del Pleistoceno-Holoceno. 2) Yacimientos de rocas y minerales industriales (arcilla común, caliza, andesita-dacita, esquisto y áridos). 3) Hidrocarburos han sido explorados en la cuenca Temuco, sin resultados positivos.

Este trabajo proporciona 2 mapas de anomalías geoquímicas de elementos metálicos no ferrosos (Co, Ni, Cr, Al) y ferrosos (Cu, Zn, Mn), una tabla con los depósitos metalíferos y recursos energéticos (nombre, ubicación, minerales de mena, roca de caja, ambiente geológico, observaciones de explotación) y una tabla con la geoquímica en sedimentos de drenaje.

Información Útil para el Estudio: Las anomalías geoquímicas y depósitos metalíferos reconocidos y recopilados en este estudio son útiles para reconocer anomalías en la calidad de las aguas subterráneas y superficiales, al estar en contacto con la litología del terreno.

34. REF 13-S. Trabajos de Sísmica en Toltén-Lago Budi, bloque Toltén (costafuera), Selva Oscura, Cunco y Labranza. ENAP, 1973-1978

En la zona se han realizado variados trabajos de sísmica de refracción y reflexión llevados a cabo por ENAP con fines exploratorios de hidrocarburos. Dentro de estos trabajos se recopiló 5 estudios en la zona, los cuales se resumen en la Tabla 2-8.

Tabla 2-8: Cuadro resumen con trabajos de Sísmica en el área de estudio (Fuente ENAP)

Estudio	Tipo	Zona	Observaciones	Incluye
Zona Toltén-Lago Budi, 1980	Refracción 1973	entre desembocadura del río Toltén y el Lago Budi	Las velocidades de los paquetes sedimentarios atravesados se calibraron con las unidades geológicas del pozo Toltén 1	Mapa geológico e interpretación sísmica entre el Lago Budi y Toltén escala 1:100.000
Prakla-Bloque Toltén, 1981	Reflexión 1978	costafuera a 30 km en dirección SW del lago Budi. Se extiende 40 km en sentido NS y 30 km EW	Objetivo fue conocer la extensión del yacimiento de gas y proponer nuevas perforaciones. Las velocidades de los paquetes sedimentarios atravesados se calibraron con las unidades geológicas del pozo F	* Plano Isocrónico basamento metamórfico * Plano Isocrónico Techo Eoceno-Cretáceo * Plano Isocrónico Techo Arenisca Basal del Oligoceno * Plano Isopático Techo Eoceno/Cretáceo y Basamento Metamórfico
Curacautín-Selva Oscura 1975	Refracción 1975	Pueblo Selva Oscura	Dos líneas de refracción con el fin de confirmar los espesores de sedimentos de una cuenca que se prolongaría hacia el este de Curacautín	Planos con secciones de refracción en corte
Cautín-Cunco 1975	Refracción 1975	Al N del río Allipen, entre los pueblos Cunco y Las Hortensias	Una línea de refracción con rumbo N82E y longitud 14 km	Planos con secciones de refracción en corte
Labranza 1975	Refracción 1975	Labranza	Tres líneas de refraación ubicadas al norte de los pozos Labranza Nº2 y 3	* Plano Isobático del basamento (reflexión y refracción) * Planos con secciones de refracción en corte

Información Útil para el Estudio: La información de sísmica recopilada se utilizará, en conjunto a la gravimetría y antecedentes estratigráficos, en la definición de la geometría de la cuenca.

35. REF 14-S. Informe situación hídrica regional, Región de La Araucanía, GORE, 2012.

En este informe se presenta un análisis sobre la situación hídrica de la Región de la Araucanía. En primer lugar presentan un diagnóstico actual sobre escasez hídrica a la Región, disponibilidad de recursos de agua, tanto superficiales como subterráneos y riego. En este sentido se menciona que la escasez hídrica se ha presentado con una mayor frecuencia y podría incidir en los procesos de desbalance hídrico provocado por las alteraciones en el ciclo del agua. Respecto a la disponibilidad de agua, mencionan que la relación extracción/disponibilidad se presenta favorable en la Región, según fuente del Banco Mundial 2011. En términos de aguas superficiales hay disponibilidad pero mayoritariamente de manera eventual, ver Tabla 2-9 con disponibilidad mensual por cuenca y subcuenca de la región.

Tabla 2-9: Disponibilidad mensual de aguas superficiales para uso consuntivo

Cuenca	Subcuenca	Punto de análisis	Nº meses con disponibilidad permanente	Nº meses con disponibilidad eventual
Río Imperial	Río Chol Chol	Río Chol Chol entre río Renaco y río Imperial	6	11
	Río Imperial	Río Imperial entre junta ríos cautín y Chol Chol y río Damas	8	12
	Río Cautín	Río Cautín aguas abajo estero Truf-Truf	0	1
Río Toltén	Río Toltén Bajo	Río Toltén sector Teodoro Schmidt	0	8
	Río Toltén Alto	Río Toltén aguas abajo río Pedregoso	0	8
	Río Allipén	Río Allipén en bocatoma canal Allipén	3	8
Río Bío Bío	Río Bío Bío Alto	Río Bío Bío aguas arriba embalse Ralco	0	7
	Río Vergara	Río Vergara en Tijeral	7	12
Río Valdivia	Río Cruces	Río Cruces en límite regional	6	10
Costeras	Río Queule	Río Queule antes junta estero Piren	8	12

En cuanto a las aguas subterráneas existe una sola cuenca que estaría con sobreotorgamiento de agua. Respecto al riego, la región ha presentado una disminución del 2% del total de superficie regada, mostrando un aumento en las preferencias de utilizar sistema de microriego, favoreciendo la eficiencia del uso del agua. Ver Tabla 2-10.

Tabla 2-10: Evolución de la superficie de riego, 1997-2007 por sistema de riego

Tasa de variación (%) de superficie de riego (ha)				
Región	**Total superficie regada**	**Gravitacional**	**Mecánico**	**Microrriego**
IX	-2%	-24%	97%	673%
Nacional	**3,4%**	**-22%**	**85%**	**298%**

Además se presentan las áreas de déficit hídrico de la Región, notando que las cuencas del NorOriente son las más afectadas, fundamentalmente se observa por una baja en los niveles de las napas freáticas que abastecen a pozos y norias de las familias distribuidas en el territorio.

Por otro lado, presentan un diagnóstico sobre antecedentes pluviométricos de la Región, mostrando que existe un déficit de precipitaciones acumulado a octubre de 2012 de un 25,7%, desde el punto de vista de la agricultura no necesariamente será un problema, esto dependerá de la distribución de las precipitaciones y de la época de siembra de los cultivos y del tipo de cultivo.

También existe una afección en la población que requiere de agua potable, en la provincia de Cautín se reportan 8.735 familias y en Malleco, 1.781. De acuerdo a lo antes mencionado se han activado bonos de emergencia para apoyar a las familias. En este mismo sentido, se han implementado algunas medidas de emergencias de parte de

algunos servicios públicos, ONEMI, DOH, INDAP, DGA, Municipalidades, que apuntan a informar constantemente sobre las condiciones hídricas de la Región.

Finalmente, muestran las acciones realizadas el año 2012 y las acciones a realizar, señalando el número de beneficiario, costos y fuentes de financiamiento.

Información Útil para el Estudio: Información de disponibilidad de agua, déficit hídrico en la región y su afectación en la población, actores relevantes tanto públicos como privados.

36. REF 15-S. Informe situación pluviométrica y otros en la Región de la Araucanía, INIA, 2012.

Informe elaborado por INIA Carillanca con información agrometeorológica al 21 de octubre de 2012 y basada en la red de estaciones meteorológicas (EMAS) de INIA de la Región de La Araucanía. El informe entrega un análisis de la pluviometría mensual y temperatura del año 2012 y acumulada al 21 de octubre de las distintas estaciones, además entrega antecedentes adicionales de humedad del suelo en la localidad de Carillanca y como inciden estos resultados en los cultivos. Respecto a la pluviometría menciona, que si bien es cierto existe un déficit de precipitación acumulada, eso dependerá de la magnitud de las precipitaciones hasta el mes de diciembre de 2012 y a su vez determinará si este déficit hídrico afectará la producción de los cultivos de la Región. Esta situación podría afectar a cultivos de hortalizas que se riegan con agua de pozo, debido a la disminución de las napas a consecuencia del déficit de precipitación. Lo mismo podría ocurrir eventualmente para el agua de bebida de las personas como también para los animales, de persistir la disminución de precipitaciones.

El informe como antecedente adicional, entrega información de humedad de suelo bajo pradera de trébol, en la localidad de Carillanca, mostrando una situación de déficit hídrico (agua aprovechable) para este tipo de praderas al 18 de octubre. Esto puede variar con las lluvias que ocurran desde esta fecha hasta fines de octubre.

Información Útil para el Estudio: Se presenta una red pluviométrica con información histórica, que complementa la red monitoreada por la DGA.

37. REF 16-S. Informe Técnico APR 2012, Proyectos de Agua Potable Rural Financiamiento FNDR, GORE, Agosto 2012.

Este informe reporta el estado de los Proyectos de Agua Potable Rural (APR). El objetivo principal de los APR es dotar del vital elemento a las familias de escasos recursos del sector rural, que no cuentan con un sistema que les permita acceder a un agua de calidad, es decir, apta para el consumo. Estos proyectos se dividen en tres etapas de trabajo: Prefactibilidad, Diseño y Ejecución. Estas iniciativas nacen del trabajo de las familias, las cuales se agrupan en Comités de APR que presentan su necesidad a los municipios, los cuales de acuerdo a sus prioridades, postulan las iniciativas de inversión a su etapa de prefactibilidad a financiamiento FNDR o sectorial. Dicha etapa es primordial para el desarrollo del proyecto, ya que tiene por finalidad dotar al comité, física y legalmente, de una fuente de agua que cumpla con los requerimientos de calidad y cantidad, a su vez, se legalizan los terrenos y servidumbres de paso a nombre de los Comités de APR, necesarios para materializar las futuras obras. Posterior a ello, se está en condiciones de elaborar el diseño de ingeniería del proyecto el que entregará los antecedentes necesarios para poder ejecutar la obra. Finalmente, una vez terminada y

recepcionada la obra, se entrega el sistema de APR al Comité, quienes tendrán la responsabilidad de administrarlo y mantenerlo en el tiempo.

A continuación en la Tabla 2-11 se presenta una tabla resumen sobre las inversiones en APR para el periodo 2010-2012 y en la Tabla 2-12 las viviendas con agua potable y las proyecciones de Nº de viviendas beneficiadas para el segundo semestre de 2012, año 2013 y 2014

Tabla 2-11: Inversión en Ejecución periodo 2010-2012

Inversión en Ejecución Periodo 2010-2012		
Etapa	**Nº Proyectos**	**Monto M$**
Ejecución	15	1.874.649
Diseño	49	644.649
Prefactibilidad	83	2.352.308
	Total	**4.871.606**

Tabla 2-12: Viviendas de Agua Potable y Proyección

Año	**Nº Viviendas**
2010 – Julio 2012	306
Agosto 2012- Diciembre 2012	542
2013	1.286
2014	5.601
Total	**7.735**

Información Útil para el Estudio: Información útil porque da cuenta de las inversiones que se están realizando en APR.

38. REF 17-S. Minuta de Antecedentes de Plantas Potabilizadoras, DOH, octubre 2012.

La presente minuta tiene por objeto presentar los antecedentes de las Plantas Potabilizadoras de Agua, ubicadas en algunas comunas de la Región de La Araucanía y en Bodega DOH Regional. Las plantas potabilizadoras tienen por objeto desinfectar el agua, lo que en general se realiza mediante la adición de hipoclorito de sodio líquido. En plantas de mayores dimensiones se cuenta, adicionalmente, con un tratamiento y desinfección por hipoclorito de calcio granulado, sistema de decantación y filtración con carbón de sílice y sulfato de aluminio. Otras plantas cuentan con un sistema de desinfección a través de un sistema de UV, con lámparas ultravioleta.

Estas plantas son instaladas de acuerdo a los requerimientos de los municipios para atender y apoyar la situación de sequía que afecta a algunas comunas de la Región. En total son 14 plantas, de las cuales 5 están esperando ser instaladas. En la Tabla 2-13 se muestra un resumen de las plantas instaladas y su localidad.

Tabla 2-13: Información de plantas potabilizadoras de agua

Planta	Ubicación	Comuna	Nº Familias abastecidas	Estado
1	Escuela Municipal Llufquentue	Galvarino	40	Operativa
2	Sector Lolonco	Purén	30	Sin Funcionar
3	Comunidad de Chanco	Lumaco	15	Operativa
4	Comunidad Indígena Luis Paillai	Lumaco	25	Operativa
5	Comunidad Indígena Treque	Toltén	60	Sin Funcionar
6	Comunidad Indígena Francisco Catrilef	Padre Las Casas	80	Operativa
7	Empresa Forestal Masisa	Chol Chol	S/I	Operativa
8	Bodega de Municipio Victoria	Victoria	S/I	Por destinar
9	Melirrehue	Gorbea	S/I	Por destinar
10-14	Por definir	Por definir	S/I	Por destinar

Información Útil para el Estudio: Información útil porque da cuenta del estado de las plantas potabilizadoras de la DOH para estimar la demanda en cuanto a agua potable rural.

39. REF 18-S. Plan Regional de Ordenamiento Territorial. Región de La Araucanía

El Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT) consiste en cuatro documentos que exponen los componentes: Amenazas Naturales, Cuencas Hidrográficas, Urbano y Rural de la Región de La Araucanía.

El componente de Amenazas Naturales, expone antecedentes referente a las amenazas naturales que afectan frecuentemente a la región, que corresponden a: amenazas sísmica, inundación por tsunami, volcánica, inundación, déficit hídrico, nevazones y remoción en masa.

El componente de Cuencas Hidrográficas presenta un análisis de la legislación y regulación vigentes, en donde se revisan los derechos de agua y comunidades Mapuches, la asignación de Derechos de Aprovechamiento de Aguas, trámite, derechos entregados, cantidad y calidad de agua, entre otros. Se realiza en este trabajo una caracterización y análisis del sistema de cuencas hidrográficas de la región, en donde se presenta la hidrografía, características de las cuencas principales, la disponibilidad de agua, la demanda actual, balances hídricos, entre otros. Finalmente este componente presenta los tipos de infraestructura existente.

El componente Urbano realiza una caracterización del sistema urbano regional, en donde describe la físico-geografía del territorio, la red vial, los subsistemas de conectividad,

transporte y energético. Se realiza la localización, descripción y categorías de los centros poblados de la región. Incluye un capítulo de análisis del sistema Urbano-Regional, en donde se realiza un análisis de la funcionalidad y estructural de este sistema, entre otros.

El componente Rural trae una caracterización de los terrenos mapuches y de terrenos rurales no mapuches, describiendo la infraestructura, economía y medioambiente. Presenta un capítulo de la caracterización del territorio, en su geomorfología, unidades agroclimáticas, área de importancia ecológica-ambiental, áreas silvestres protegidas, de los Usos de suelo y de la distribución de la población indígena en la Región. En este componente presentan también la caracterización de la estructura y funcionalidad económica regional, en donde caracteriza los sectores: población, silvoagropecuario por territorio y región, educación y capital humano, trabajo, habitabilidad e ingresos y pobreza en los territorios de la Región. Por último, se presenta la zonificación regional, tanto histórica como actual.

Información Útil para el Estudio: Todos los componentes descritos se consideran como relevantes para el desarrollo de este estudio, en especial los componentes Cuencas Hidrográficas y Amenazas Naturales los que se tuvieron como referentes para la caracterización geológica e hidrogeológica.

2.3 OTROS ANTECEDENTES

2.3.1 Bases de datos DGA

40. REF 01-O. Bases de datos: derechos concedidos y solicitudes en trámite

En esta referencia se muestra información basada en el Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA y actualizada a agosto del año 2013.

La información referida a derechos concedidos muestra información de derechos subterráneos y superficiales, cada uno con su ubicación respectiva, comuna, provincia, nombre del peticionario, Nº de Resolución o Sentencia y fecha, tipo de derecho, clasificación de las fuentes, uso del agua, cuenca, ejercicio del derecho entre otros. El número de derechos concedidos con su caudal asociado y de acuerdo a la naturaleza del agua, se muestra en la Tabla 2-14. El detalle de los derechos superficiales y subterráneos en cuanto a tipo y ejercicio del derecho se muestra en la Tabla 2-15.

Tabla 2-14: Nº de derechos y caudal asociado (L/s) según naturaleza del agua

Naturaleza del Agua	Nº Derechos	Caudal (L/s)
Subterránea	3.008	16.481
Superficial	11.180	6.198.904
Sin Información	1	40

Tabla 2-15: Nº de derechos y caudal asociado (L/s) según tipo y ejercicio del derecho.

Naturaleza del agua	Tipo de derecho	Permanente						Eventual				Total Caudal (L/s)
		Continuo		Discontinuo		Alternado		Continuo		Discontinuo		
		Nº Der.	Caudal (L/s)	Nº Der.	Caudal (L/s)	Nº Der.	Caudal (L/s)	Nº Der.	Caudal (L/s)	Nº Der.	Caudal (L/s)	
Superficial	Consuntivo	4.405	482.957	1.206	29.045	6	25	1.079	74.895	1.803	19.133	**606.055**
	No Consuntivo	1.543	2.812.896	196	294.576	1	25	475	1.710.017	466	775.335	**5.592.849**
Total Caudal Superficial (L/s)												**6.198.904**
Subterráneo	Consuntivo	3.000	16.471	2	0,8	5	5,3	1	3,9	0	0	**16.481**

Respecto a la información contenida en solicitudes en trámite ingresadas a la DGA, se muestran "solicitudes que han sido aprobadas" (A), que corresponderían a derechos concedidos u otorgados y es preferible, a nuestro juicio, llamarlas solicitudes porque no cuentan con la información de caudal otorgado. Además se muestran solicitudes pendientes (Pendiente Región, P-REG, Pendiente Departamento de Administración de Recursos Hídricos, P-DARH, Pendiente Departamento Legal, P-LEGAL, Denegado Región, D-REG, D-DARH, Denegado Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Denegado Departamento Legal, D-LEGAL, entre otras) y las que están Denegadas (D). Es importante mencionar que el caudal (L/s) que aparece en las "solicitudes aprobadas" es el caudal solicitado y por lo tanto, no hay certeza del caudal otorgado. El caudal fue verificado de acuerdo a lo establecido en el Acápite 3, mediante una verificación según lo establecido en los Juzgados de Letras correspondientes. En la Tabla 2-16 se muestra el N° derecho y caudal para las "solicitudes aprobadas", pendientes y denegadas según naturaleza del agua.

Tabla 2-16: Nº de derechos y caudal asociado (L/s) para solicitudes en trámite según naturaleza del agua

Naturaleza del Agua	Aprobadas		Pendientes		Denegadas	
	Nº Derechos	Caudal (L/s)	Nº Solicitudes	Caudal (L/s)	Nº Solicitudes	Caudal (L/s)
Subterráneas	60	444	705	2.627	2.529	15.137
Superficial	4.038	99.832	1.572	20.930.364	6.516	1,76E+09

41. REF 02-O. Catastro de Expedientes de solicitudes de derechos de aguas subterráneas de la Dirección General de Aguas (DGA) del MOP

A partir del análisis de esta base de datos, se realizó la solicitud de expedientes a la DGA de algunos de las 6.302 captaciones de agua subterránea con derechos otorgados, en trámite y denegados. Los criterios que se utilizaron para esta selección, son los siguientes:

a) Se solicitaron los expedientes de todas captaciones de aguas subterráneas con un caudal otorgado/solicitado mayor a 5 L/s

b) Realizado el primer criterio, en los sectores en que se observó un déficit de información de captaciones, se consideraron aquellas cuyo caudal otorgado/solicitado fuera entre 2 y 5 L/s

De esta forma, se solicitó a la DGA los expedientes de 471 propietarios con derechos otorgados y 86 propietarios con derechos en trámite, de los cuales se obtuvo la información de 401 expedientes con derechos otorgados (equivalentes a 464 captaciones) y 36 expedientes con derechos en trámite (o solicitados, equivalentes a 46 captaciones) tal como se muestra en la Figura 2-16.

En el Anexo A.1.2 se presenta una planilla resumen con la información disponible de los expedientes de captaciones entregados por la DGA. Algunos de los datos relevantes que se muestran son: coordenadas en WGS-84 Huso 18S, caudal, profundidad de la captación, diámetro de habilitación, si dispone de información: estratigráfica, pruebas de bombeo, curva de agotamiento, análisis de pruebas de bombeo (parámetros hidráulicos), análisis químico, geofísica de pozo, valor y fecha de medición del nivel estático. Se

considera que esta información es importante para el posterior análisis y caracterización geológica e hidrogeológica del área de estudio. En el Anexo A.3 se presenta un plano de detalle, con la distribución y ubicación de estas captaciones.

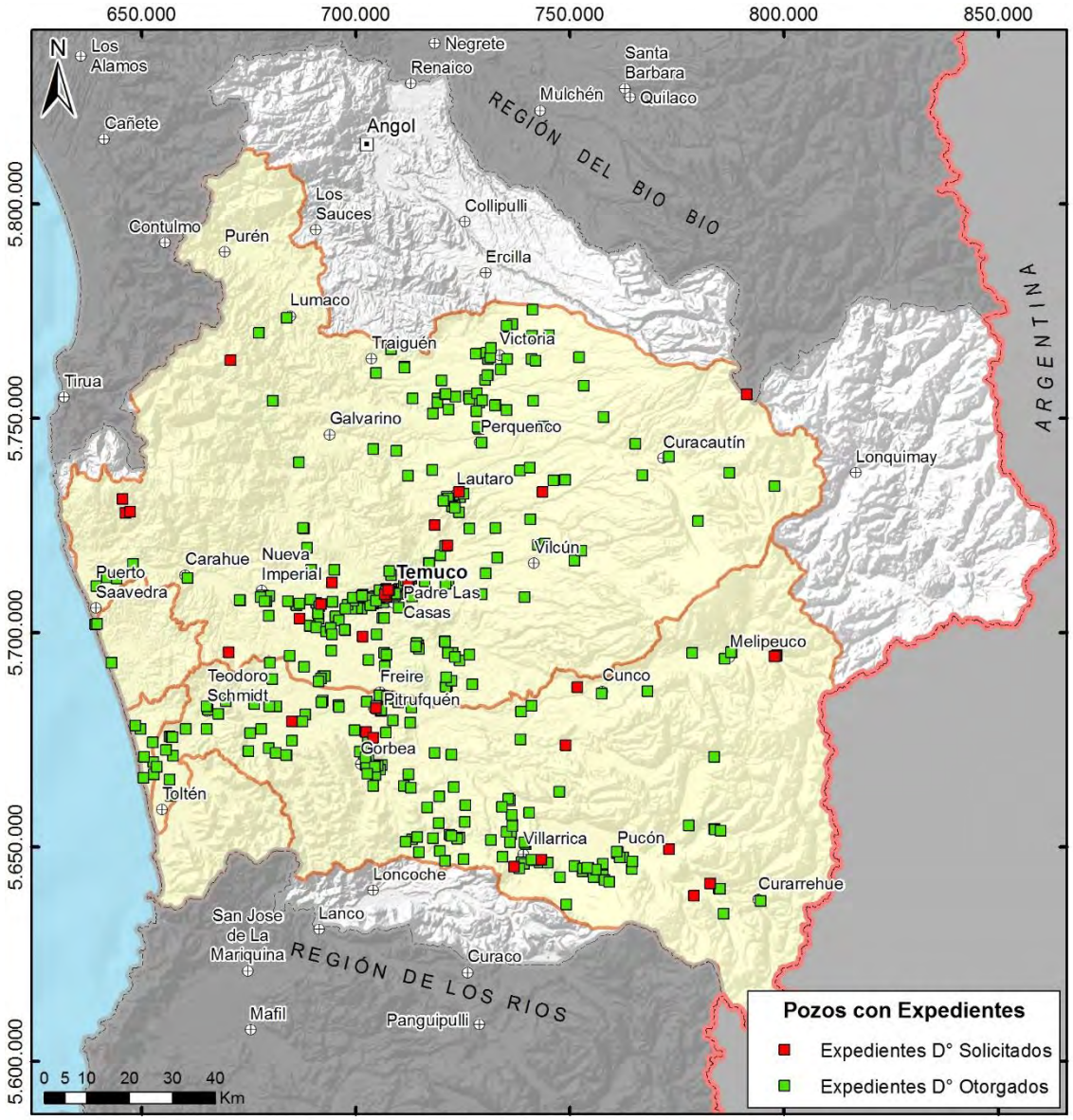


Figura 2-16: Mapa de ubicación de pozos con información de expedientes

42. REF 03-O. Bases de datos: Bases de datos hidrología/meteorología

En esta referencia se muestra información basada en el Banco Nacional de Aguas (BNA) de la DGA. Corresponde a la información de tres tipos de estaciones: meteorológicas, fluviométricas y niveles de lagos, aunque es importante mencionar que algunas de las estaciones miden una o más de estas variables. La Figura 2-17 muestra todas estas

estaciones, subdivididas en los parámetros de medición, ya sea: temperatura, precipitación, fluviométrica (caudal), nivel de lagos o evaporación. En la Tabla 2-17 se presentan las características de las estaciones.

Tabla 2-17. Información general de estaciones meteorológicas, fluviométricas y de medición de niveles de lago

ID	Nombre	Código BNA	UTM WGS 84 (m)		Estado *	Pará-metro **	Período de registro	
			Norte	Este			Inicio	Fin
1	Encimar Malleco	08343002-8	5.778.667	752.579	V	P	ago-88	-
2	Collipulli	08351003-K	5.795.247	725.949	S	P,T,E	oct-62	dic-09
3	Ercilla (Vida Nueva)	08353001-4	5.785.633	722.146	V	P,T,E	may-98	-
4	Angol (La Mona)	08358002-K	5.815.593	707.853	V	P,T,E	ene-75	-
5	Parque Nahuelbuta	08358005-4	5.811.607	679.346	V	P,T	nov-02	-
6	Tranaman	09101003-8	5.791.833	675.350	V	P	jul-88	-
7	Lumaco	09102003-3	5.774.992	683.803	V	P	may-48	-
8	Las Mercedes (Victoria)	09104003-4	5.764.436	733.175	V	P	ene-86	-
9	Traiguén	09105002-1	5.762.729	705.074	V	P,T,E	ene-79	-
10	Quillén	09111002-4	5.738.664	724.788	V	P	nov-59	-
11	Perquenco	09112000-3	5.743.767	728.718	V	P	may-02	-
12	Galvarino	09113003-3	5.745.549	693.837	V	P,T,E	ene-79	-
13	La Cabaña	09114001-2	5.737.453	653.184	V	P	oct-88	-
14	Río Cholchol en Cholchol	09116001-3	5.724.084	687.170	V	P,F	mar-85	-
15	Cholchol	09116002-1	5.724.542	687.375	S	P	oct-87	-
16	Río Cautín en Rari Ruca	09123001-1	5.741.774	760.727	V	P,F	mar-85	-
17	Rari Ruca	09123002-K	5.742.359	760.746	V	P	jul-92	-
18	Lautaro	09124001-7	5.733.130	721.894	V	P,T	jul-53	-
19	Río Cautín en Cajón	09129002-2	5.714.598	716.978	V	P,F	mar-85	-
20	Cerro Ñielol	09129004-9	5.710.183	709.027	S	P	jul-74	feb-89
21	Pueblo Nuevo (Temuco)	09129005-7	5.711.825	712.285	V	P,T	jul-53	-
22	Vilcún	09131002-3	5.716.084	740.435	V	P	feb-65	-
23	Freire	09135002-5	5.685.057	705.955	S	P	jul-39	dic-73
24	Freire Sendos	09135003-3	5.684.598	707.003	V	P,T,E	ene-81	-
25	Freire Campamento Fiscal	09135004-1	5.683.806	705.417	S	P	ene-69	dic-81
26	Río Cautín en Almagro	09140001-4	5.705.199	678.107	V	P,F	may-65	-
27	Almagro	09140002-2	5.705.484	677.799	S	P	nov-94	abr-05
28	Carahue	09151001-4	5.713.032	660.835	V	P	jun-95	-
29	Puerto Saavedra	09153001-5	5.705.020	639.287	V	P,T,E	ene-79	-
30	Río Malleco en Collipulli	08351001-3	5.794.563	725.002	V	P,F	feb-20	-
31	Temuco Centro	09129006-5	5.708.604	709.227	V	P,T	dic-09	-
32	Cunco	09403001-3	5.686.649	758.759	V	P,T	mar-70	-
33	Los Laureles	09404002-7	5.683.652	742.345	V	P	feb-39	-
34	Quecheregua	09404003-5	5.678.631	753.799	V	P	feb-70	-
35	Villarrica	09420003-2	5.655.432	733.600	V	P	nov-61	-
36	Chanlelfu	09420004-0	5.625.031	737.661	V	P	sep-87	-
37	Quitratue	09433003-3	5.663.449	702.819	V	P	nov-61	-
38	Río Toltén	09437002-7	5.679.435	665.759	V	P	feb-91	-
39	Teodoro Schmidt	09438001-4	5.677.947	666.137	V	P,T,E	nov-88	-
40	Toltén	09439001-K	5.658.987	655.176	V	P	dic-94	-
41	Lican-Ray	10106003-9	5.627.006	743.631	V	P	may-96	-
42	Loncoche	10130001-3	5.639.072	702.928	V	P	sep-93	-
43	Liucura	08301001-0	5.714.190	839.895	V	P,T	may-87	-
44	Lonquimay	08304004-1	5.737.772	816.241	V	P,T,E	may-87	-
45	Río BioBio	08307002-1	5.764.988	823.890	V	P	sep-02	-
46	Laguna Malleco	08350002-6	5.764.878	778.716	V	P,T	oct-55	-
47	Manzanar	09120002-3	5.737.207	787.785	S	P,T,E	mar-72	sep-88

ID	Nombre	Código BNA	UTM WGS 84 (m)		Estado *	Pará-metro **	Período de registro	
			Norte	Este			Inicio	Fin
48	Malalcahuello	09120003-1	5.736.009	798.568	V	P,T,E	nov-88	-
49	Curacautín	09122001-6	5.739.531	770.655	V	P	mar-70	-
50	Tolhuaca	09122003-2	5.762.493	786.888	S	P	jun-71	abr-75
51	El Morro	08341003-5	5.789.803	763.450	S	P	ago-73	ago-75
52	Tricauco	09401001-2	5.693.712	799.184	V	P,T	oct-88	-
53	Río Allipen en Melipeuco	09402001-8	5.692.665	783.186	V	P,F	ene-85	-
54	Curarrehue	09412002-0	5.637.451	794.935	V	P,T	nov-76	-
55	Puesco (Aduana)	09412003-9	5.619.477	796.548	V	P,T	sep-87	-
56	Llafenco	09414002-1	5.641.151	774.881	V	P	feb-65	-
57	Lago Tinquilco	09416002-2	5.659.174	782.897	V	P	jun-96	-
58	Ojos del Caburga	09417002-8	5.651.748	772.903	S	P,T,E	may-98	mar-09
59	Pucón	09420002-4	5.647.802	762.854	V	P,T,E	jul-84	-
60	La Cascada	09421001-1	5.644.947	764.221	S	P	nov-58	feb-69
61	Río Renaico en Longitudinal	08342001-4	5.807.167	730.001	V	F	jun-82	-
62	Río Mininco en Longitudinal	08343001-K	5.805.359	728.482	V	F	jun-63	-
63	Río Malleco en Lolenco	08352001-9	5.805.829	710.883	S	F	dic-20	abr-23
64	Río Los Sauces en Las Balsas	08355001-5	5.795.235	690.097	S	F	nov-29	nov-46
65	Rio Rahue en Quebrada Culen	08356001-0	5.797.807	692.259	V	F	ene-95	-
66	Río Vergara en Tijeral	08358001-1	5.820.665	709.796	V	F	mar-85	-
67	Río Purén en Tranamán	09101001-1	5.788.196	673.833	S	F	feb-48	oct-06
68	Río Purén en Purén	09101002-K	5.790.526	671.614	S	F	ago-94	abr-09
69	Río Lumaco en Lumaco	09102001-7	5.775.024	683.781	V	F	mar-85	-
70	Río Lumaco en San Gerardo	09102002-5	5.782.390	685.410	S	F	dic-48	mar-49
71	Río Lumaco en Chanco	09103001-2	5.763.993	680.612	S	F	dic-47	dic-49
72	Río Traiguén en Victoria	09104001-8	5.766.306	734.693	V	F	oct-50	-
73	Río Dumo en Santa Ana	09104002-6	5.773.663	736.368	V	F	dic-86	-
74	Río Traiguén en Triguén	09105001-3	5.763.437	703.951	S	F	ene-80	abr-83
75	Río Quino en Longitudinal	09106001-9	5.757.224	728.593	V	F	ene-69	-
76	Estero Chufquén en Chufquén	09107001-4	5.757.887	703.809	V	F	ago-87	-
77	Estero Chanco camino a Curacautín	09107002-2	5.760.585	740.366	S	F	oct-69	dic-86
78	Río Quillén en Longitudinal	09111001-6	5.740.699	723.756	S	F	ago-59	abr-83
79	Río Quillen en Galvarino	09113001-7	5.747.042	693.340	V	F	sep-59	-
80	Río Cholchol en Nueva Imperial	09118001-4	5.710.385	677.958	S	F	dic-28	feb-54
81	Río Collín en Codahue	09126001-8	5.725.916	744.903	V	F	ene-95	-
82	Río Muco en Puente Muco	09127001-3	5.722.161	724.691	V	F	ene-69	-
83	Río Cautín en Temuco	09129001-4	5.709.646	708.386	S	F	dic-14	oct-32
84	Río Quepe en Vilcún	09131001-5	5.714.295	740.434	V	F	ene-69	-
85	Río Huichahue en Faja 24000	09134001-1	5.696.054	731.193	V	F	dic-85	-
86	Río Quepe en Quepe	09135001-7	5.696.735	706.600	V	F	mar-85	-
87	Río Allipén en Los Laureles	09404001-9	5.680.996	739.424	V	F	mar-85	-
88	Río Curaco en Colico	09405001-4	5.675.039	752.238	V	F	dic-86	-
89	Río Allipén en Allipén	09406001-K	5.678.004	714.775	S	F	dic-29	ene-38
90	Río Toltén en Villarrica	09420001-6	5.649.545	738.465	V	F	ene-69	-
91	Río Pedregoso en Santa	09422001-7	5.660.377	747.446	S	F	dic-46	jun-47

ID	Nombre	Código BNA	UTM WGS 84 (m)		Estado *	Pará-metro **	Período de registro	
			Norte	Este			Inicio	Fin
	Filomena							
92	Río Toltén en Coipue	09423001-2	5.668.430	726.055	S	F	dic-29	mar-83
93	Río Toltén en Pitrufquén	09430001-0	5.683.823	704.817	S	F	dic-28	ene-03
94	Río Puyehu en Quitratue	09433001-7	5.663.549	701.406	V	F	oct-47	-
95	Estero Puyehue en Lastarria	09433002-5	5.655.224	701.191	S	F	dic-47	feb-50
96	Río Donguil en Gorbea	09434001-2	5.669.135	700.107	V	F	mar-85	-
97	Río Mahuidanche en Santa Ana	09436001-3	5.671.507	678.527	V	F	dic-86	-
98	Río Toltén en Huilo	09437001-9	5.679.221	664.264	S	F	dic-48	mar-57
99	Río Toltén en Teodoro Schmidt	09437002-7	5.679.435	665.759	V	F	feb-91	-
100	Río Santo Domingo en Rinconada de Piedra	10140001-8	5.638.584	660.539	V	F	ene-91	-
101	Río Lonquimay antes junta Bio Bio	08304001-7	5.738.945	828.582	V	F	jul-95	-
102	Rio Renaico en Jauja	08341001-9	5.785.611	768.929	S	F	dic-48	ago-69
103	Río Malleco en La Laguna	08350001-8	5.765.231	777.466	S	F	jun-60	mar-84
104	Río Blanco en Curacautín	09122002-4	5.739.073	773.290	V	F	dic-86	-
105	Estero Melipeuco	09402002-6	5.694.463	780.378	S	F	dic-52	dic-56
106	Río Trancura en Curarrehue	09412001-2	5.637.257	794.378	V	F	sep-68	-
107	Río Trancura antes Río llafenco	09414001-3	5.640.807	778.466	V	F	dic-70	-
108	Río Liucura en Liucura	09416001-4	5.649.557	773.790	V	F	oct-71	-
109	Lago Budi	09200001-K	5.693.024	651.053	V	L	sep-02	abr-13
110	Lago Calafquen	10106008-K	5.623.584	743.499	V	L	jun-97	may-13
111	Lago Caburga	09417007-9	5.673.575	784.260	V	P,L	ene-00	feb-13
112	Lago Villarrica	09420009-1	5.647.955	761.084	V	L	mar-85	abr-13
113	El Vegel (Angol)	08358003-8	5.811.429	706.622	S	P,T,E	abr-81	ene-96
114	Cherquenco	09130001-K	5.713.593	760.729	V	P,T	sep-87	-
115	Río Bio Bio en Llanquén	08307002-1	5.764.988	823.890	V	T,F	sep-02	-

*V: Vigente
S: Suspendida

** P: Precipitación
T: Temperatura
E: Evaporación
F: Fluviométrica
L: Niveles de lagos

Se tienen en total 63 estaciones meteorológicas en la región, de las cuales 51 se encuentran vigentes. De estas estaciones todas miden precipitación, 14 miden evaporación y 26 miden temperatura. Tal como se observa en la figura siguiente, la distribución de estas estaciones es homogénea dentro de la región.

Existen 55 estaciones con registros de caudales a nivel mensual al año 2013, de las cuales 35 estaciones están vigentes. Las estaciones se concentran en la zona media de la cuenca (Figura 2-17).

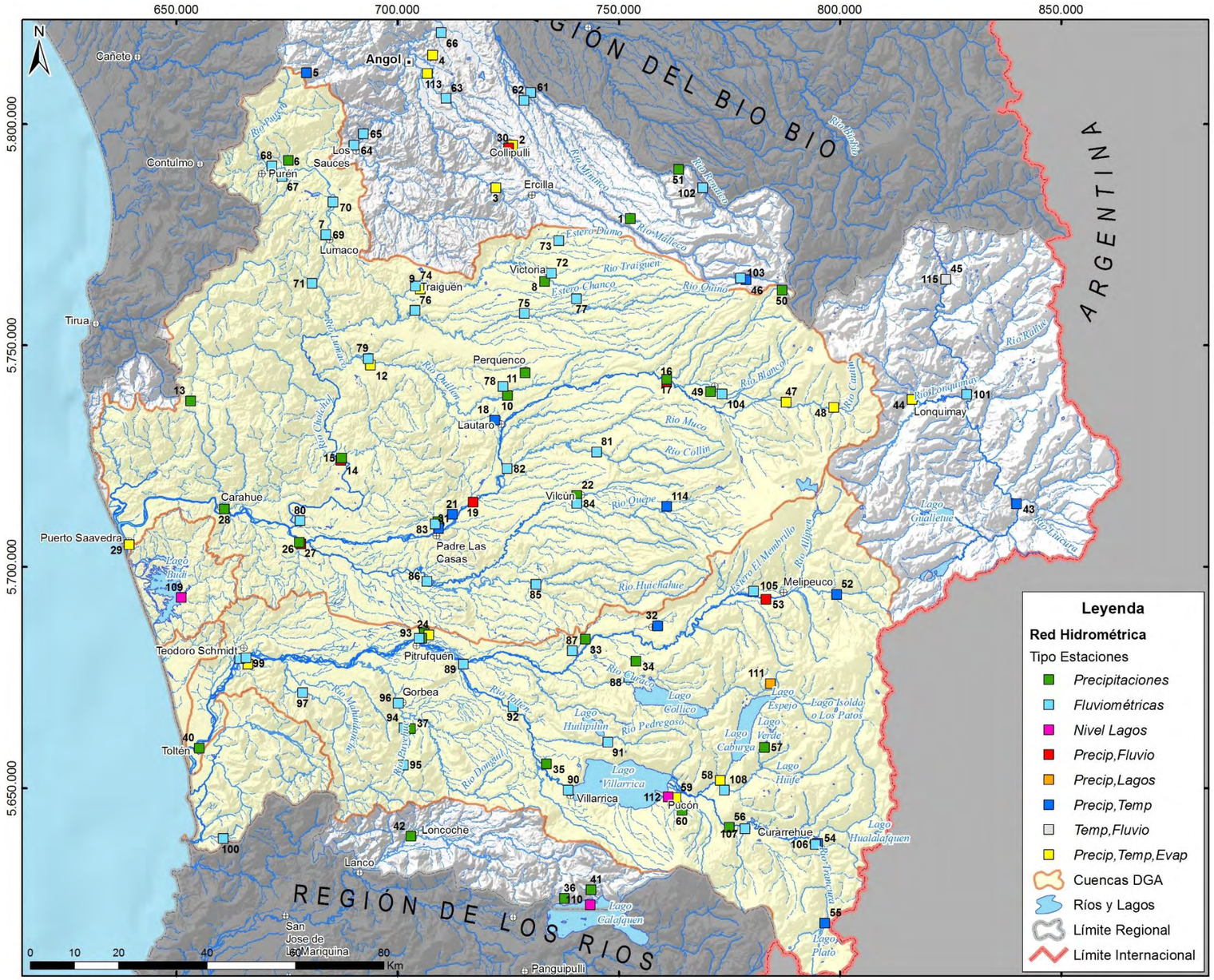


Figura 2-17: Mapa de ubicación de estaciones de monitoreo de variables meteorológicas e hidrológicas de la DGA

43. REF 04-O. Bases de datos: Bases de datos Calidad de Aguas

La principal base de datos de calidad de aguas superficiales lo monitorea la DGA, con sus 25 estaciones vigentes y otras 12 estaciones no vigentes. La Figura 2-18 muestra la ubicación de todas las estaciones que presentan calidad de aguas subterráneas, según su estado de vigencia. La Tabla 2-18 resume algunas características de estas estaciones, como su Nº BNA (Figura 2-18), nombre de la estación, ubicación (en WGS84, 18S), su estado (vigente/no vigente), el período de registro y el número de muestras.

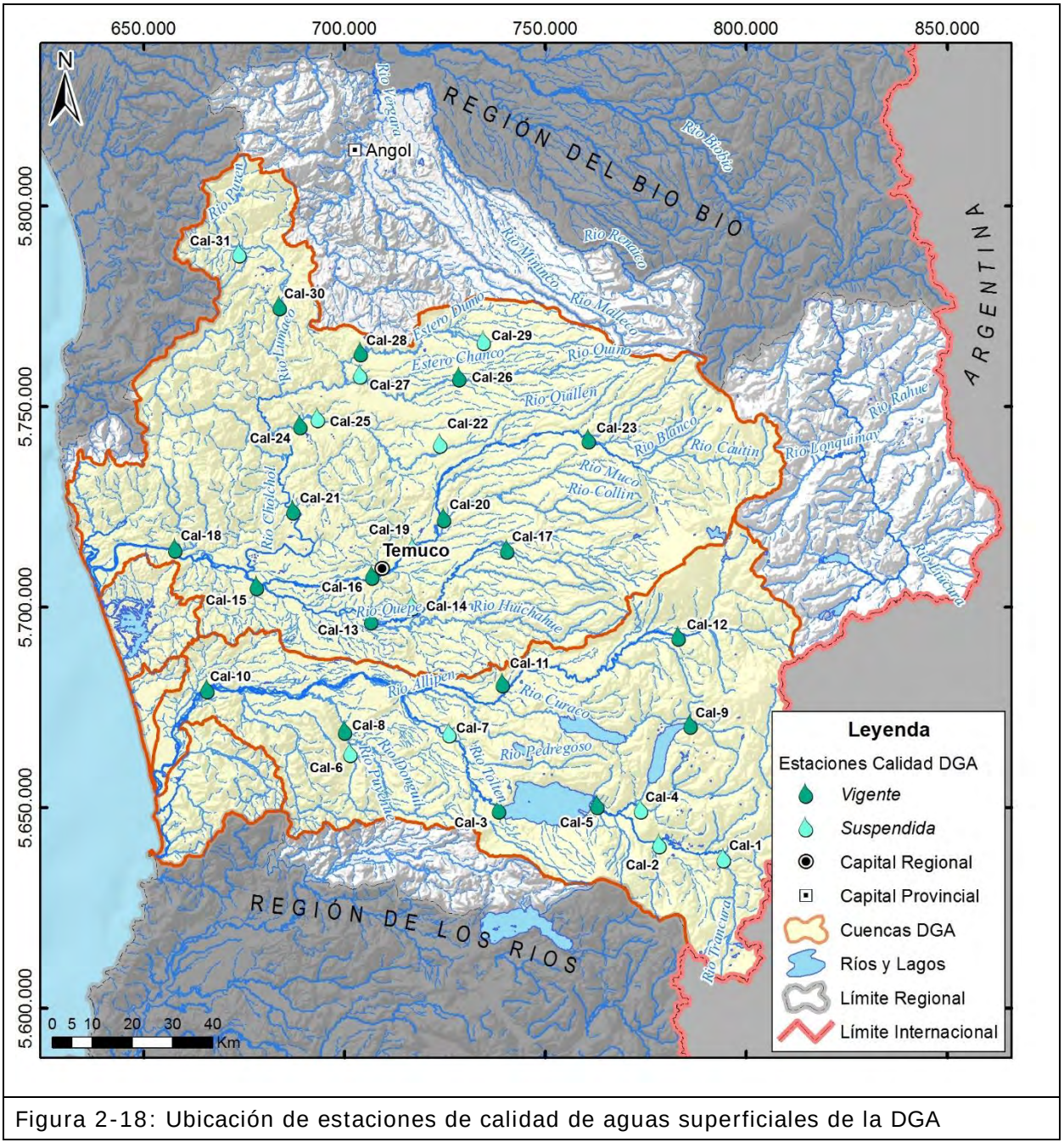


Figura 2-18: Ubicación de estaciones de calidad de aguas superficiales de la DGA

Tabla 2-18: Estaciones con calidad de aguas superficiales de la DGA, en las cuencas estudiadas (wgs84, 18S)

Código BNA	ID	Estación	E	N	Estado	Inicio	Fin	N	Observaciones
09412001-2	Cal-1	Río Trancura en Curarrehue	794389	5637326	NV	16/10/1969	17/08/1983	11	Solo un dato después del 74
09414001-3	Cal-2	Río Trancura antes Río Llafenco	778478	5640876	NV	24/09/1970	18/07/1974	8	
09420001-6	Cal-3	Río Toltén en Villarrica	738478	5649613	V	12/11/1969	10/04/2013	124	Sin Muestras entre feb-75 y feb-84
09416001-4	Cal-4	Río Liucura en Liucura	773802	5649626	NV	27/09/1971	04/07/1974	7	
09418001-5	Cal-5	Río Pucón en Balseadero Quelhue	762985	5650676	V	22/02/1984	10/04/2013	106	
09433001-7	Cal-6	Río Puyehue en Quitratue	701420	5663617	NV	10/11/1969	11/07/1974	22	
09423001-2	Cal-7	Río Toltén en Coipue	726068	5668497	NV	11/11/1969	01/07/1974	19	
09434001-2	Cal-8	Río Donguil en Gorbea	700121	5669202	V	10/11/1969	11/04/2013	121	Sin muestras entre ago-74 y jul-83
09417006-0	Cal-9	Lago Caburga en Río Blanco	786162	5670703	V	31/01/2001	26/01/2010	25	
09437002-7	Cal-10	Río Toltén en Teodoro Schmidt	665775	5679502	V	23/02/1984	15/04/2013	99	
09404001-9	Cal-11	Río Allipén en Los Laureles	739437	5681063	V	26/08/1969	12/04/2013	124	Sin muestras entre ago-74 y jul-83
09402001-8	Cal-12	Río Mellipén en Melipeuco	783198	5692732	V	20/02/1984	12/04/2013	107	
09135001-7	Cal-13	Río Quepe en Quepe	706614	5696801	V	10/12/1969	02/04/2013	130	Sin muestras entre feb-75 y jul-83
09132001-0	Cal-14	Río Quepe después Estero Puelo	716839	5700229	NV	24/10/1974	24/10/1974	1	Solo 1 muestra
09140001-4	Cal-15	Río Cautín en Almagro	678122	5705265	V	11/11/1969	09/04/2013	88	Sin muestras entre ago-74 y feb-90
09129003-0	Cal-16	Río Cautín Bajo Temuco	706901	5707899	V	29/01/1975	15/04/2013	102	Solo una muestra previa a jul-84
09131001-5	Cal-17	Río Quepe en Vilcún	740447	5714360	V	12/11/1969	01/04/2013	165	Sin muestras entre feb-75 y mar-84
09150001-9	Cal-18	Río Imperial en Carahue	657763	5714578	V	24/02/1984	09/04/2013	105	
09129002-2	Cal-19	Río Cautín en Cajón	716992	5714663	NV	12/12/1969	08/08/1974	19	
09127001-3	Cal-20	Río Muco en Puente Muco	724704	5722226	V	28/11/1969	16/04/2013	120	Sin muestras entre ago-74 y sep-83
09116001-3	Cal-21	Río Cholchol en Cholchol	687185	5724149	V	26/11/1969	08/04/2013	122	Sin muestras entre ago-74 a jul-83
09111001-6	Cal-22	Río Quillen en Longitudinal	723769	5740764	NV	17/11/1969	08/07/1974	14	
09123001-1	Cal-23	Río Cautín en Rari-Ruca	760739	5741839	V	28/11/1969	01/04/2013	119	Sin muestras entre mar-72 y jul-83
09113002-5	Cal-24	Río Quillen en Botrolhue	688944	5745360	V	25/02/1984	08/04/2013	103	
09113001-7	Cal-25	Río Quillen en Galvarino	693355	5747106	NV	13/11/1969	17/07/1974	16	
09106001-9	Cal-26	Río Quino en Longitudinal	728606	5757289	V	13/11/1969	03/04/2013	119	Sin muestras entre jul-74 y ene-84
09107001-4	Cal-27	Estero Chufquén en Chufquén	703823	5757952	NV	13/11/1969	23/08/1983	18	Solo 1 muestra después de 1974
09105001-3	Cal-28	Río Traiguén en Traiguén	703965	5763501	V	25/02/1984	16/04/2013	103	
09104001-8	Cal-29	Río Traiguén en Victoria	734706	5766370	NV	13/11/1969	25/08/1983	25	Solo un dato desde jul-74 para luego suspender nuevamente
09102001-7	Cal-30	Río Lumaco en Lumaco	683796	5775088	V	17/11/1969	16/04/2013	126	Sin muestras entre ene-74 a jul-83
09101001-1	Cal-31	Río Puren en Tranamán	673849	5788259	NV	17/11/1969	30/07/1974	26	

2.3.2 Información SIG

Por parte del GORE y DGA se recibió un gran volumen de información cartográfica, la cual debió ser revisada y filtrada. Entre los criterios de filtro se consideró eliminar la duplicidad de datos y enfocarse sólo en variables y temáticas de relevancia para el presente estudio hidrogeológico.

De esta forma, se cuenta con una base de datos geoespacial conformada por los elementos que se muestran en la Tabla 2-19 y completándose dentro de las bases de datos con la referencia:

REF 05-O. Imágenes Satelitales de la región, Landsat y Aster.

Tabla 2-19: Resumen de Información Cartográfica que se utilizará en este estudio

Temática	Coberturas	Fuente
Ambiental	Área Protección Hídrica	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Área Restricción Natural	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Déficit Hídrico	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Sitios Prioritarios Biodiversidad	Sinia
	Snaspe	Conaf
Análisis	Peligro Anegamiento	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Peligro Inundación	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Peligro Remoción masa	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Peligro Tsunami	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Peligro Volcánico	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Vulnerabilidad Acuífero	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
Área Estudio	DGA Área estudio	Dga
Clima	Clima	Mapoteca GeoH
	Isotermas	Mapoteca GeoH
	Isoyetas	Mapoteca GeoH
	PP Máximas Diarias	Mapoteca GeoH
Cultural	Atractivos Turísticos	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Sitios Arqueológicos	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
Derechos	Derechos Concedidos	Catastro Público de Agua - Dga
	Solicitudes Denegadas	Catastro Público de Agua - Dga
	Solicitudes En Proceso	Catastro Público de Agua - Dga
Geología	Contactos_1	Sernageomin
	Fallas_1	Sernageomin
	FuentesTermales_1	Sernageomin
	Geologia_1	Sernageomin
	Geologia_2	Sernageomin

Temática	Coberturas	Fuente
	Geomorfo_L	Sernageomin
	Geomorfo_P	Sernageomin
	Hidrogeologia_1	Dga
	Pliegues_1	Sernageomin
	Volcanes	Sernageomin
Indígena	ADI_IX	Conadi
	Comunidades Mapuche	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Identidad Territorial	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Población Indígena	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
Infraestructura	APR	Ministerio de Derarrollo Social
	Cobertura Agua Potable	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
Mapa Base	Capitales Provinciales	Mapoteca GeoH
	Capitales Regionales	Mapoteca GeoH
	Ciudades	Mapoteca GeoH
	Hidro Áreas	Mapoteca GeoH
	Limites Administrativos	Mapoteca GeoH
	Mascara	Mapoteca GeoH
	Países vecinos Chile	Mapoteca GeoH
	Poblados	Mapoteca GeoH
	Red Hídrica	Mapoteca GeoH
	Red Vial	Mapoteca GeoH
	Regiones	Mapoteca GeoH
Población	Localidades Censo	Ine
Red Hidrométrica	Evaporación	Dga
	Fluviométricas	Dga
	Lagos	Dga
	Precipitación	Dga
	Temperatura	Dga
Territorio	Altitud	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Capacidad Uso Suelo	Ministerio de Derarrollo Social
	Catastro2004	Conaf
	Demanda Territorio	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Series Suelo	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Territorios	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Unidades Territoriales	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Uso Optimo	SEREMI de Vivienda y Urbanismo
	Vegetacion2004	SEREMI de Vivienda y Urbanismo

Temática	Coberturas	Fuente
DemChile	Dem Chile	SRTM 90m
GoogleEarth	GoogleEarth	Imagen GE 16m
Landsat	Landsat	Imagen Landsat, Feb. 2008

2.3.3 Otros

44. REF 06-O. ESIIR de la CNR

El Sistema de Información Integral de Riego de la Comisión Nacional de Riego, es una plataforma web (http://esiir.cnr.gob.cl) desarrollada por la empresa SIIGSA.

El objetivo del desarrollo e implementación de esta plataforma, responde a la necesidad de tener un soporte geográfico y alfanumérico visualizado en línea (web) que integre información estratégica. Esto permite a la CNR orientar su accionar según su misión institucional de asegurar el incremento y mejoramiento de la superficie regada del país mediante la formulación de la política, estudios y programas y proyectos que aporten a la competitividad de los agricultores/as y las organizaciones de regantes. La información contenida en el sistema con alcance territorial corresponde a: Estaciones Fluviométricas, Infraestructura de Riego, Organizaciones de Regantes, Recursos Hídricos, Principales Embalses a nivel nacional, Potencial Hidroeléctrico, entre otras.

La plataforma actual del ESIIR presenta algunos inconvenientes para los usuarios por lo que actualmente se encuentra en desarrollo de un proceso de mejoramiento del sistema por parte de la CNR.

2.4 ESTUDIOS REVISADOS NO INCORPORADOS

A continuación se detalla una lista de estudios que fueron revisados, pero que no fueron incorporados debido a que no contienen información útil para la realización de este estudio.

- La protección y uso de las aguas entre los mapuches de La Araucanía. Problemas y Perspectivas para el desarrollo indígena. Miguel Díaz Gacitúa, Raúl Elgueta Riquelme, 2001.
- Boletín nacional de Análisis de riesgos agroclimáticos para las principales especies frutales y cultivos, y la ganadería, Región de La Araucanía. Ministerio de Agricultura, INIA, septiembre 2012.
- Observaciones del Sernageomin en localidades de la IX Región, con motivo del terremoto del 27 de febrero de 2010.
- Análisis de criterios hidroambientales en el manejo de recursos hídricos. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, 1998.
- Estimación Potencial Hidroeléctrico asociado a obras de riego existentes o en proyecto. Procivil Ingeniería, 2007.
- Análisis y evaluación comparativa de siete modelos Pp-escorrentía en la cuenca del río Malleco. Tesis U de Talca, Sánchez 2001.
- Base de datos eco-hidrológica de los ríos de Chile: Una herramienta de Gestión para los ecosistemas acuáticos. Peredo-Parada M., et al., 2009.

3 SISTEMATIZACIÓN DE DEMANDAS Y USOS

Se ha efectuado el levantamiento de demandas y consumos de aguas subterráneas en toda la región mediante la realización de un catastro de captaciones en terreno. Esta actividad en particular tuvo como objetivo principal la estimación de la demanda real de agua en la región. De la misma forma, se determinaron los principales usos y usuarios de aguas subterráneas en la región. La información recopilada será incorporada, en capítulos posteriores, en el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual (capítulo 9) y numérico (capítulo 10) siendo los antecedentes recopilados un input relevante para comprender el estado de demanda, usos y usuarios actual de aguas subterráneas en la región.

Finalmente, se presentan los resultados correspondientes a las actividades de catastro de captaciones subterráneas, sistematización de información de derechos y usos y determinación de las demandas y consumos.

3.1 CATASTRO DE CAPTACIONES

El catastro de captaciones subterráneas tuvo por objetivo levantar información hidrogeológica relevante de terreno, específicamente para identificar y caracterizar las demandas y consumos reales de agua, en base a algunos parámetros predefinidos. Estos parámetros son:

1. Ubicación geográfica (coordenadas UTM)
2. Características físicas de las captaciones (profundidad, diámetro, entre otros)
3. Características físico-químicas de las aguas (pH, Conductividad, entre otros)
4. Características de uso y riego de las aguas (uso/fin de las aguas, superficie de riego, tipo de cultivo, método y horas de riego, entre otros)

En el marco del catastro en terreno, se realizaron las siguientes tareas:

1. Creación base de datos para el catastro: Definiéndose las captaciones a ser catastrados en terreno. Esta actividad se realizó en conjunto con la DGA y GORE, identificando, en base al Catastro Público de Aguas (CPA) el total de captaciones catastrales en terreno
2. Elaboración material de apoyo de terreno: Generándose aquellos materiales a ser utilizados por parte de los equipos en terreno para el catastro, entre ellos: cartas de apoyo, credenciales personales, encuesta de uso, protocolo de terreno, etc.
3. Programación en gabinete de los equipos de terreno: Definiéndose, en gabinete, la planificación de levantamiento de información en terreno por parte de los distintos equipos de trabajo
4. Catastro de captaciones subterráneas: Realizándose una campaña de medición de niveles estáticos en pozos localizados en las cuencas en estudio. Esta labor se desarrolló entre los meses marzo y agosto del año 2014, levantándose información de más de 3.000 captaciones subterráneas
5. Análisis de resultados: Evaluándose, con los resultados en terreno, las principales características de las captaciones catastradas, en cuanto a la demanda de recursos por sector en estudio, los principales usos del agua y sus usuarios predominantes.

A continuación se detallan las tareas señaladas anteriormente.

3.1.1 Creación base de datos para el catastro

Se solicitó la información de derechos de aprovechamiento subterráneos y solicitudes en trámite contenida en el Catastro Público de Agua (CPA) de la Dirección General de Aguas (DGA), encontrándose actualizada hasta agosto de 2013. De la información recibida se puede mencionar lo siguiente:

- Existe un total de 3.008 derechos de aprovechamiento otorgados en la región, los cuales tienen asociados un caudal total de 16.481 L/s.
- Existe un total de 765 solicitudes en trámite en la región, con un caudal asociado a dichas solicitudes en trámite de 3.071 L/s
- De la suma de las captaciones con derechos otorgados y solicitudes en trámite, (3.773 en total), se llegó a una base de datos final de 3.082 captaciones, correspondientes a aquellas captaciones contenidas dentro de los límites del estudio y con coordenadas correctamente definidas.
- A cada número de expediente seleccionado se le asignó un número correlativo, donde se diferenciaron los derechos otorgados (OTOR-01 hasta OTOR- 2.617), solicitudes en trámite (SOL-01 hasta SOL-465)

Por otro lado, con el objetivo de complementar la información de la DGA se solicitó información de Sistemas de Agua Potable Rural (APR) al Gobierno Regional de La Araucanía (GORE Araucanía) y la DGA. En este sentido se logró rescatar información de nombre y ubicación de 158 APR. Luego de revisar y comparar la información, se encontró que 22 APR estaban contenidos en el CPA, de los cuales 18 corresponden a solicitudes en trámite y 4 a derechos otorgados. Del total de 22 APR que tenían asociado un expediente, 17 no habían sido seleccionadas para formar parte del catastro en una primera instancia, por no contar con sus coordenadas de ubicación. Por lo tanto, son 136 captaciones correspondientes a APR que no tienen asociado un expediente DGA.

De acuerdo a información del GORE Araucanía, de las 136 captaciones, el 75% corresponden a proyectos existentes, 15% a proyectos en etapa de diseño y el 9% a proyectos en etapa de prefactibilidad (1% sin información).

Finalmente, los 17 APR fueron agregados al catastro de derechos otorgados y solicitudes en trámite, junto a los 136 APR sin expediente, sumando un total de 3.235 captaciones. Estas se clasificaron como se detalla a continuación:

Derechos otorgados (OTOR-01 hasta OTOR- 2.620)

- Solicitudes en trámite (SOL-01 hasta SOL-479)
- APR (APR-01 hasta APR-136)

En base a lo anterior, se creó una base de datos a través de un Sistema de Información Geográfica y se crearon las coberturas correspondientes para la zona de estudio. Esta información es la base para la programación de los equipos de terreno.

En la Figura 3-1 se muestra la distribución de las 3.235 captaciones en la zona de estudio.

Estas captaciones han sido agrupadas en 2 categorías, de acuerdo a su profundidad: (1) pozos someros y norias, para captaciones con profundidad menor o igual que 20 m y (2) pozos profundos, para captaciones con profundidad mayor que 20 m.

Es importante mencionar que las captaciones comprometidas a visitar son 3.153, selección que se efectuó priorizando los pozos profundos del área de estudio. En el

caso de no tener acceso a alguna captación definida como profunda, se visitará en reemplazo una captación somera.

Como se observa en la Figura 3-1, se seleccionaron 125 captaciones fuera del área de estudio. Estas se ubican al norte del área de estudio, en la cuenca del río Bio Bio y al sur del área de estudio, en la cuenca del río Valdivia. Estas captaciones fueron incluidas en el catastro con el objetivo de evaluar la existencia de flujos subterráneos hacia o desde las cuencas vecinas, lo cual repercutirá en el balance hídrico general de las cuencas en estudio y en las condiciones de borde que se utilizarán en el modelo numérico.

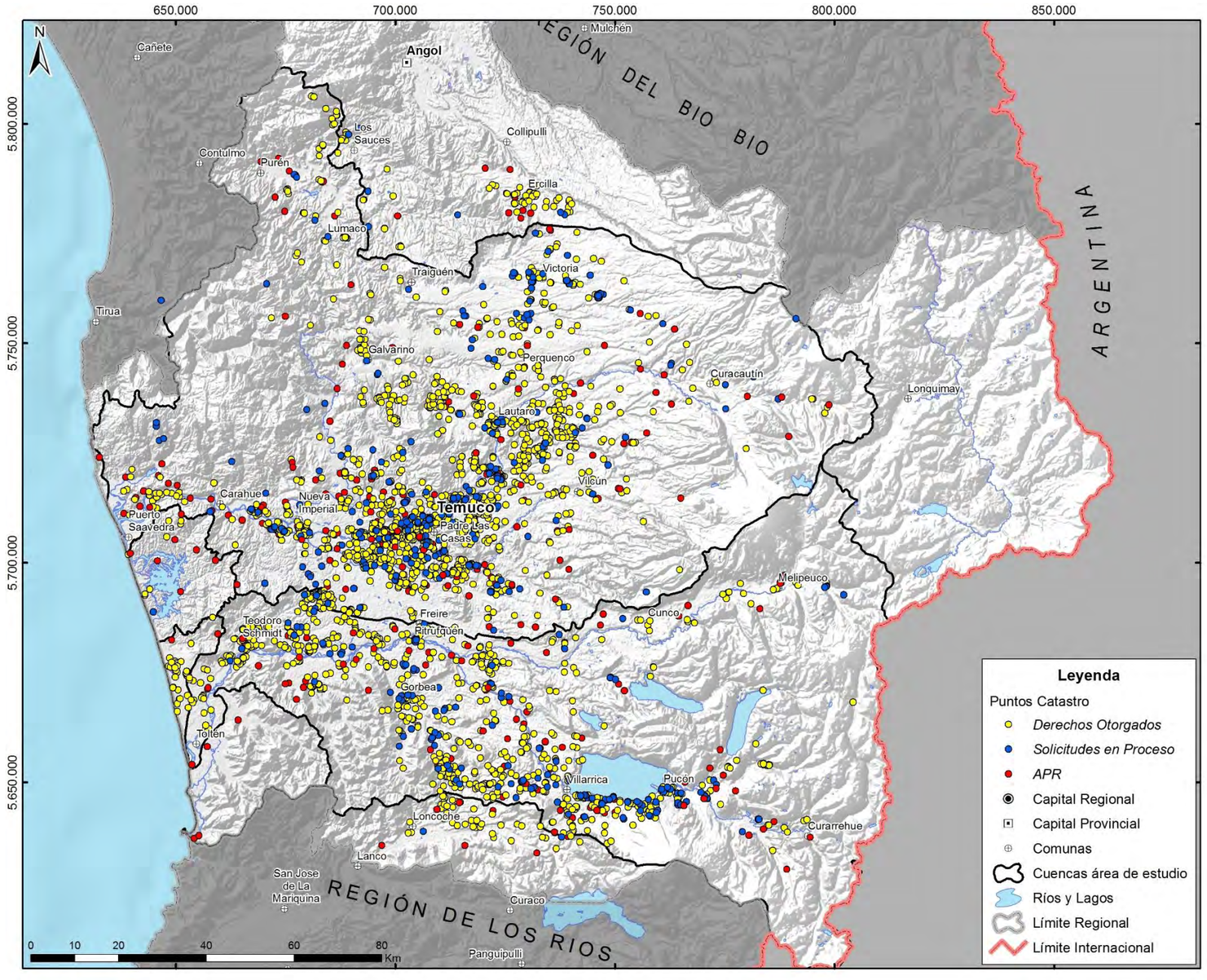


Figura 3-1: Distribución espacial de captaciones a visitar en catastro

3.1.2 Distribución de captaciones por territorio

La Región de La Araucanía está dividida en 32 comunas (Figura 3-2), de las cuales 28 se ubican dentro del área de estudio (4 comunas fuera del área de estudio corresponden a Angol, Renaico, Collipulli y Lonquimay).

Las 28 comunas dentro de la zona de estudio fueron agrupadas en 6 sectores o territorios (Tabla 3-1). Estos territorios son (Figura 3-2):

1. Malleco-costa
2. Valle cordillera
3. Temuco-Imperial
4. Padre Las Casas-cordillera
5. Costa sur
6. Lacustre-sur

A cada uno de los territorios se le asignó un equipo de terreno (Tabla 3-1).

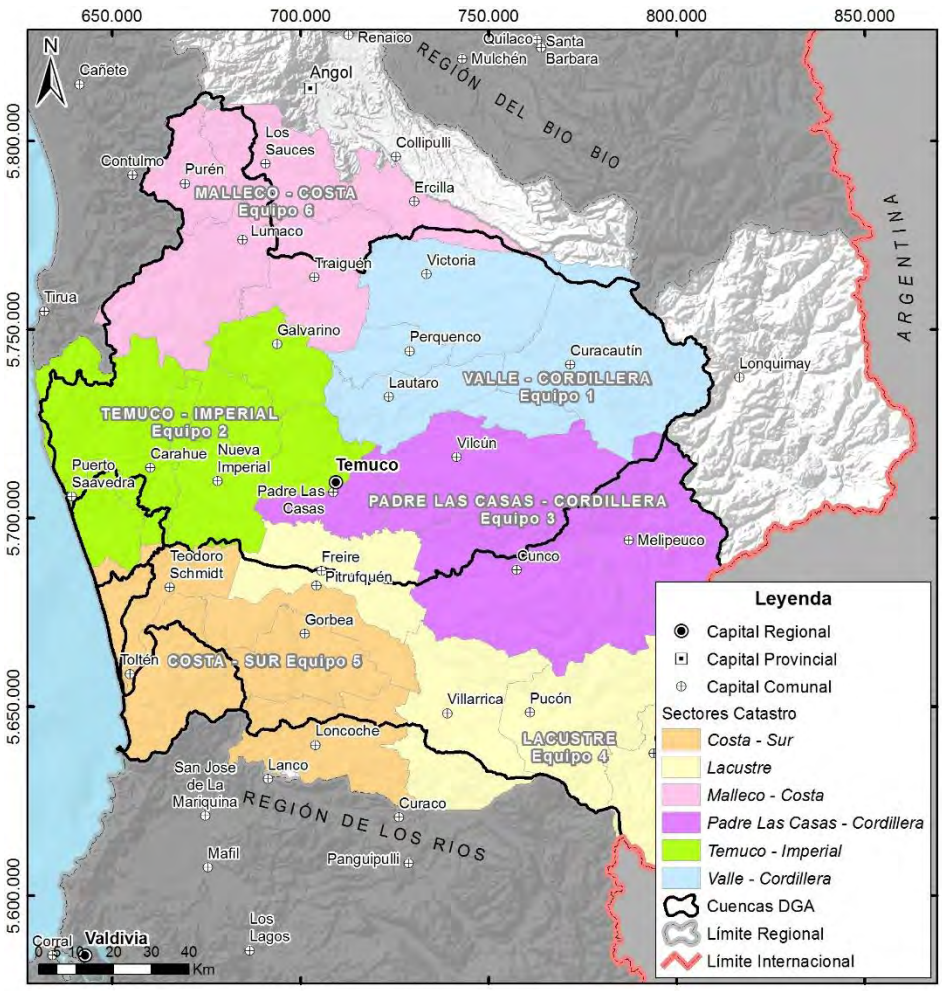


Figura 3-2: Territorios y equipos definidos para el catastro de captaciones

Previo a la distribución de las captaciones, por territorio, se realizó nuevamente una revisión de la información y se estimó que de las 3.235 captaciones mencionadas en la actividad 3.1.1, 82 estaban ubicadas en comunas conflictivas. Por precaución se decidió no catastrar estas captaciones, por lo que el universo a catastrar disminuyó a 3.153 captaciones.

Dentro de las 3.153 captaciones, distribuidas en 28 comunas y 6 territorios, un total de 3.017 captaciones corresponden a derechos otorgados y solicitudes en trámite de la DGA y 136 corresponden a APR con captaciones profundas. Cada territorio fue visitado por un equipo de trabajo en particular. Como se mencionó en el punto anterior, se priorizó la visita de pozos profundos que son de mayor interés hidrogeológico, como por ejemplo los APR.

Cada territorio está compuesto por al menos cuatro comunas y en entre 540 y 707 captaciones (Tabla 3-1). La excepción es la comuna de Malleco Costa, que sólo posee 73 captaciones.

Tabla 3-1: N° de captaciones a visitar por territorios.

Territorios	**Equipos**	**Comunas**	**N° captaciones**
Valle-Cordillera	1	Lautaro-Perquenco - Victoria-Curacautín.	579
Temuco-Imperial	2	Temuco-Imperial-Carahue-Pto.Saavedra-Cholchol- Galvarino.	707
P.L.Casas-Cordillera	3	P.L. Casas, Cunco-Melipeuco-Vilcun.	637
Lacustre Sur	4	Freire-Villarrica-Pucon-Curarrehue	540
Costa Sur	5	Gorbea-Pitrufquen-Loncoche-Teodoro Schmidt- Tolten.	617
Malleco-Costa	6	Ercilla-Traiguen-Los Sauces-Lumaco-Purén.	73
Total	**6 equipos**	**28 comunas**	**3.153**

3.1.3 Descripción de actividades en terreno

Previo a la visita en terreno, a cada profesional se le entregó la base de datos con toda la información de sus captaciones separadas por comuna. Además, fueron entregadas las coberturas en archivos KMZ para hacer más eficiente la programación y ubicación de las coordenadas, apoyados con Google Earth.

Cada equipo de terreno, que consta de un profesional más un acompañante, contó con los siguientes equipos y materiales que son revisados previamente a cada salida:

- Vehículo;
- Multiparámetro Hanna: Para medición de T°, pH y Conductividad Eléctrica;
- Bailer desechable: Utilizado en la obtención de muestras de agua en captaciones que no tengan descarga;
- Carrete de bailer: Utilizado en la toma de muestras para descender el bailer;
- Pozómetro: Utilziado para la medición de nivel del agua, con un alcance de 60 m con indicador de luz y sonido ajustable. Para captaciones más profundas se utilizó un pozómetro de 200 m.
- GPS: Instrumento utilizado para conocer la ubicación de la captación en coordenadas UTM Datum WGS 84.
- Cámara fotográfica digital: Utilizada para tomar fotografías de cada captación en diversos ángulos.
- Huincha de medir: utilizada para la medición de diámetro de la captación.

Una vez identificada la captación, se desarrolló el proceso de consulta, mediciones y fotografías de la obra de captación y su entorno (Figura 3-3), mostrándose la credencial que cada profesional porta y la carta de apoyo firmada por las autoridades. En la Figura 3-3 se presenta el proceso de consulta, mediante encuesta de uso, por parte de los equipos de trabajo en distintos sectores.

Figura 3-3: Fotografías de aplicación de encuesta de uso y mediciones

GEOHIDROLOGÍA

ANEXO C: CATASTRO DE USOS DE AGUA
"CUENCA RÍO TOLTEN E IMPERIAL"

Nº DE FICHA	0754
Nº EXPEDIENTE DGA	ND-0902 – 6453
ESTADO	OTOR – 2438

I. INFORMACIÓN ENTREVISTADO

Nombre:	JUANA ELENA MARILLAN INAIPIL
Dirección:	SECTOR QUEIPUE KM 10 (DESDE BARROS ARANA A IMPERIAL)
Teléfono/email:	97825191

II. INFORMACIÓN TITULAR

Nombre:	JUANA ELENA MARILLAN INAIPIL
Dirección:	SECTOR QUEIPUE KM 10 (DESDE BARROS ARANA A IMPERIAL)
Teléfono/email:	97825191
Nombre del predio:	HIJUELA Nº 8
Superficie Física (há):	NO LO SABE
Comuna:	TEODORO SCHMIDT
Localidad:	SECOR QUEUPUE DE BARROS ARANA

III. DERECHOS DE APROVECHAMIENTO SUBTERRÁNEO

Caudal Otorgado o Solicitado **1,0 L/s**

Ejercicio del Derecho:

■ Continuo ☐ Discontinuo ☐ Alternado (detalle)_____

Tipo de Captación:

☐ Pozo ■ Noria ☐ Dren ☐ Zanja ☐ Puntera ☐ Otro (especifique) _____

Uso de las Aguas:

■ Riego ☐ Agua Potable ☐ Forestal ☐ Industrial ☐ Otro (especifique)

Periodo de Uso **AGOSTO A MAYO**

Nivel de las Aguas en Captación:

☐ Dinámico ■ Estático **Nivel 4,40 (m)**

Fecha de medición: **18 – 03 – 2014**

Características de la Captación:

Diámetro de Pozo/Noria/Puntera **1,20 (m)** Profundidad de Pozo/Noria/Puntera **6,0 (m)**

Longitud Dren_____ (m) Radio Dren _____ (m)

Longitud 1 Pozo Zanja _____(m) Longitud 2 Pozo Zanja _____(m)

Tipo de Revestimiento **SIN REVESTIMIENTO** (sin revestimiento, hormigón, ladrillo, PVC, Acero, otro)

Año Construcción **NO LO RECUERDA (APROX 30 AÑOS)**

Estado de la Captación:

■ Buena ☐ Regular ☐ Mala Descripción: **NORIA CON CUBIERTA CON MADERA**

Figura 3-4: Encuesta de uso con información recogida en terreno

Características de la Bomba:
Potencia **0,5 (HP)** Diámetro de Salida **1" (Pulgadas)** Profundidad **ELÉCTRICA SUPERFICIAL, LA BOMBA SE ENCUENTRA A NIVEL DEL SUELO**
Coordenadas UTM (WGS 84, Huso 18)
UTM Norte **5690889** (m) UTM Este **682786** (m) Cota **80 (m)**
Características Físico Química del Agua:
Temperatura **15,0** (°C) pH **6,32** Conductividad Eléctrica **0,10** (us/cm)

IV. CAUDAL EXPLOTADO PARA DISTINTOS USOS DE AGUA

Uso*	Caudal Explotado (L/s)	Horas de Extracción	Periodo (invierno y/o verano, especificar)
N° 1	**0,1**	**1 HRS/DIA**	**AGOSTO A MAYO**
N°____			
N°____			
N°____			

*: 1: Riego; 2: Agua potable o consumo doméstico; 3: Forestal; 4: Industrial; 5: otro (especificar)

V. USOS DEL AGUA (Sólo para Riego)

Temporada de Riego: AGOSTO A MAYO (mes/año)
Superficie Regada Total 0,08 (há)

Figura 3-4: Encuesta de uso con información recogida en terreno

GEOHIDROLOGÍA
UNA EMPRESA DE AGUAS

GOBIERNO REGIONAL DE LA ARAUCANÍA

Información de Cultivo, Sistema de Riego, Superficie					
	Tipo Cultivo	Sistema de Riego	Variedad	Superficie (há)	Captación
(a)	HUERTA	ASPERSIÓN	VARIAS	0,08	NORIA
(b)					
(c)					
(d)					
(e)					

Funcionamiento del sistema de riego													
		Ene	Feb	Mar	Abri	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
(a)	Hr/día	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1
	Día/Sem	3	3	3	3	3			3	3	3	3	3
	otra												
(b)	Hr/día												
	Día/Sem												
	otra												
(c)	Hr/día												
	Día/Sem												
	otra												
(d)	Hr/día												
	Día/Sem												
	otra												
(e)	Hr/día												
	Día/Sem												
	otra												

VI. INFORMACIÓN ENTREVISTADOR

Nombre:	CARLOS EUGENIO MORA OPAZO
RUT:	10.222.731 – K

OBSERVACIONES: **ESTE POZO ES USADO PARA RIEGO DE INVERNADEROS**

Figura 3-4: Encuesta de uso con información recogida en terreno

GEOHIDROLOGÍA
UNA EMPRESA ARCADIS

GOBIERNO REGIONAL
DE LA ARAUCANÍA

ANEXO. FICHA FOTOGRAFÍAS POZO

Figura 3-4: Encuesta de uso con información recogida en terreno

3.1.4 Resultado de actividades en terreno

Del total de 3.153 captaciones, se lograron catastrar 2.701, lo que equivale al 86%.

Durante la actividad en terreno se recopiló información de 48 captaciones adicionales, que no estaban incluidas en la base original. Dichas captaciones fueron denominadas PZN, de las cuales 16 pertenecen a Aguas Araucanía. De estes pozos, 6 se pudieron asociar a un expediente DGA, los cuales no se habían incluido en la base de catastro original por no contar con coordenadas. Por consiguiente, son 42 los pozos nuevos identificados como PZN, y 6 pozos relacionados al CPA, de los cuales se consideran como catastrados 41.

Por otra parte, se revisó información de la SISS y expedientes de la DGA y se logró contar con información de 54 captaciones más, las cuales no tenían coordenadas registradas en el CPA. De estas captaciones, 39 corresponden a pozos de Aguas Araucanía.

Finalmente, considerando 41 pozos nuevos catastrados, y la revición de información para 54 captaciones, el total catastrado asciende a 2.796 captaciones (Figura 3-5).

En la Tabla 3-2 se presenta la distribución de las captaciones catastradas por territorio. Se observa que en 4 sectores se logra el 90% o más del total de captaciones. El territorio que presenta menos % de captaciones catastradas es el Lacustre Sur, debido principalmente a que en esta zona se concentra una gran cantidad de viviendas que sólo se usan en periodo de verano, por lo que no se encontraban los moradores.

Tabla 3-2: Catastro de captaciones, por territorio

Territorio	**Total captaciones**	**Captaciones catastradas**	**% del Total**
Costa Sur	617	578	94%
Lacustre Sur	540	414	77%
Malleco Costa	73	59	81%
P. las Casas - Cordillera	637	573	90%
Temuco - Imperial	707	635	90%
Valle Cordillera	579	537	93%
Total general	3.153	2.796	89%

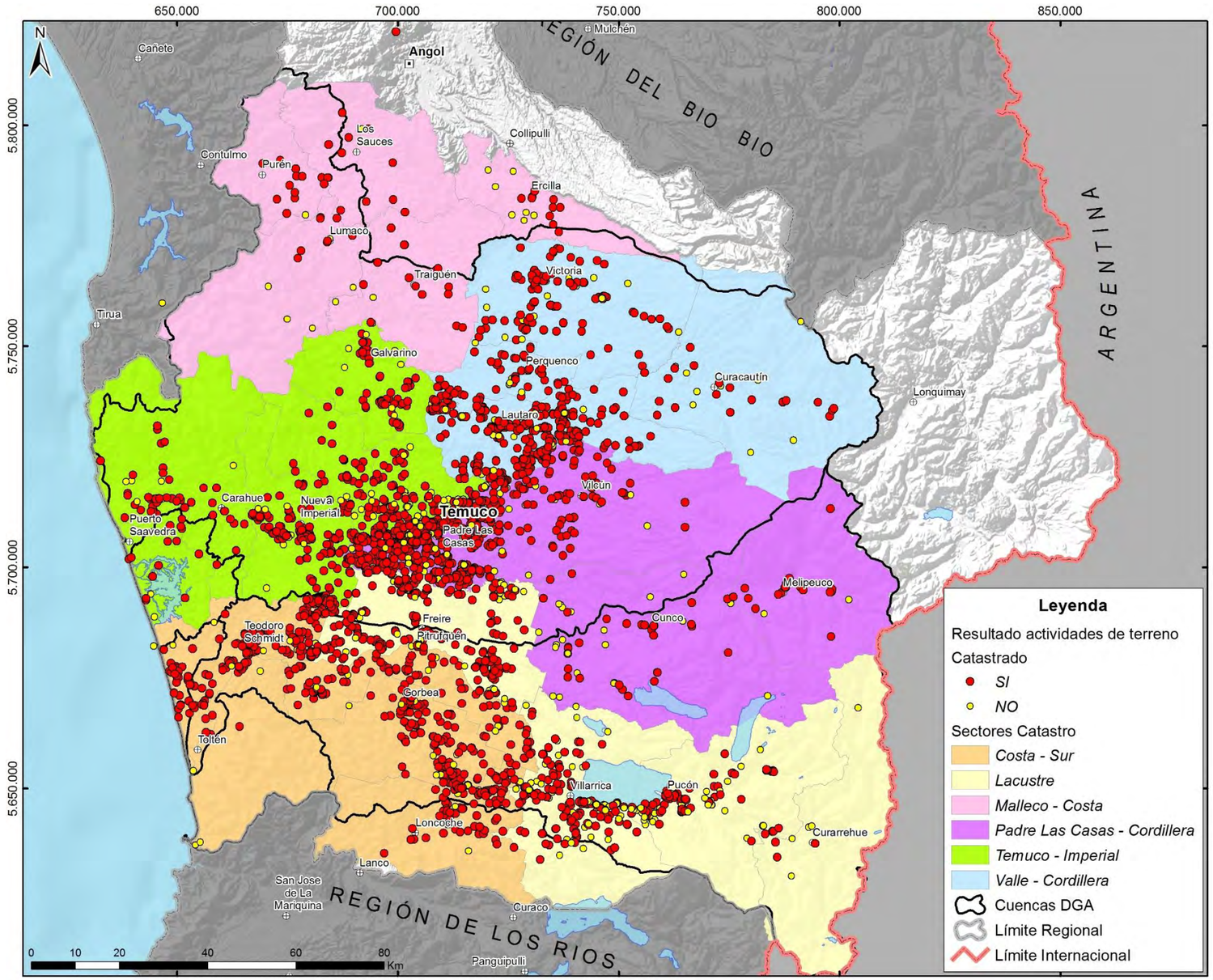


Figura 3-5: Captaciones catastradas

3.1.5 Dificultades en actividades de terreno

Las principales dificultades encontradas en terreno, y que influyeron de forma negativa en la imposibilidad de catastrar el total de captaciones esperado fueron las siguientes:

- Dificultades de acceso.
- No se encuentra la captación: Errores en las coordenadas del catastro disponible por parte de la DGA.
- Personas no autorizan entrada al predio: Esto se produjo por distintos motivos, entre ellos falta de interés en entregar la información y en el estudio mismo o por razones de seguridad.
- Predios sin moradores: en varios casos, especialmente en zonas con alta concentración de viviendas de veraneo (Pucón, Villarrica), no fue posible acceder a las captaciones debido a que las casas están vacías, con acceso restringido y sin vecinos cercanos que puedan entregar información.
- Captaciones selladas.
- Captaciones en desuso.

3.2 SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE DERECHOS Y USOS

Se realizó la sistematización de la información de derechos de aguas subterráneas constituidos y en trámite en las cuencas en estudio, mediante el desarrollo de las siguientes actividades:

1. Revisión de información del Catastro Público de Aguas DGA
2. Revisión de información del catastro de terreno
3. Comparación de información DGA con catastro de terreno
4. Revisión de expedientes en Juzgado de Letras
5. Revisión de información adicional

Toda esta información fue incorporada a una base de datos con la sistematización de la información.

3.3 REVISIÓN INFORMACIÓN CATASTRO PÚBLICO DE AGUAS DGA

La DGA, en su nivel regional, facilitó a este consultor la información completa de los derechos constituidos, tanto superficiales como subterráneos, así como los que se encuentran actualmente en trámite, información correspondiente al Catastro Público de Aguas (CPA). A continuación se presenta el análisis de los derechos subterráneos otorgados y solicitudes pendientes en la cuenca, así como una síntesis de los derechos definidos por su uso para las cuencas en estudio. En el Anexo B.1 se presenta el CPA disponible por parte de la DGA a Agosto de 2013, mientras que en el Anexo B.2 se presenta la base de datos generada a partir del CPA con motivos del presente estudio.

En la Tabla 3-3 se muestran los derechos de aguas subterráneas otorgados y en trámite en las cuencas en estudio. Se observa que la cuenca del río Imperial presenta el mayor porcentaje de derechos otorgados y en trámite, con un 66,1% y un 60,6% respectivamente. Por el contrario, la cuenca que presenta el menor porcentaje de derechos otorgados es la del río Queule, con menos de un 1,0% (0,12%). En el caso

de las solicitudes en trámite, no existen solicitudes en la cuenca Costeras Entre Río Budi y Toltén.

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

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

En conjunto con lo anterior, el CPA dispone de información de los usos asignados a los derechos concedidos, usos que se pueden definir principalmente como: Bebida-Uso Doméstico, Energía Hidroeléctrica; Otros Usos, Pisciultura, Riego y Otros. En las tablas Tabla 3-4 y Tabla 3-5 se presenta una síntesis de los derechos subterráneos por uso de agua, otorgados y en trámite, para las cuencas en estudio.

Tabla 3-4. 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
Total	188	29	18	10	10.072	1.727	18	3	4.948	828	15.244	2.597

*B/U D/S: Bebida/Uso Doméstico/Sanitario;**E. H: Energía Hidroeléctrica; *** S/I Sin Información

Fuente: CPA de la DGA, 2013.

Tabla 3-5. 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
Total					1.500	345	0,5	1	970	210	2.477	559

*B/U D/S: Bebida/Uso Doméstico/Sanitario;**E. H: Energía Hidroeléctrica; *** S/I Sin Información

Fuente: CPA de la DGA, 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 3-6. 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.

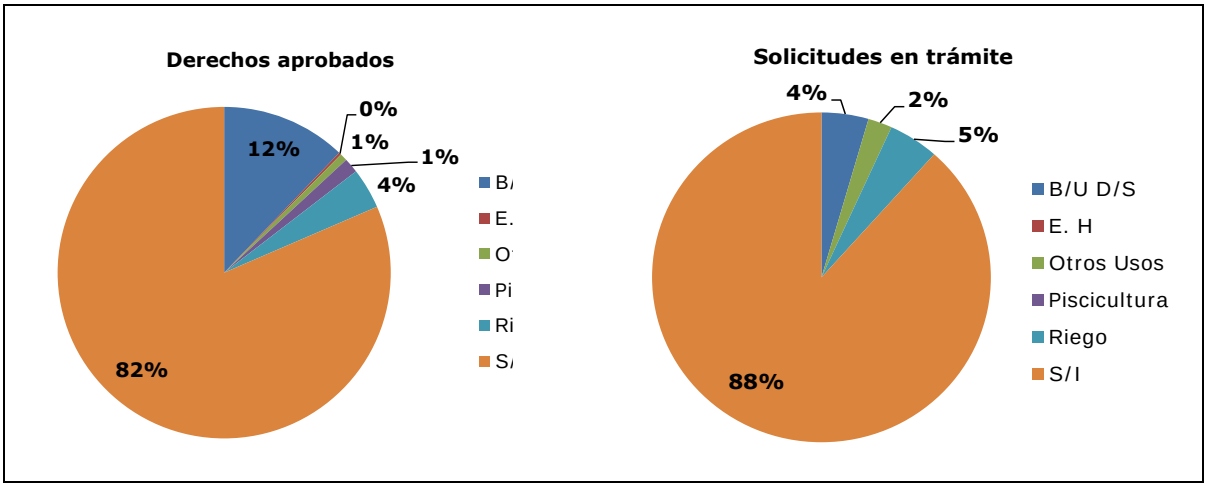


Figura 3-6: Caudal de derechos subterráneos de acuerdo a uso

3.3.1 Revisión información catastro de terreno

De las 2.796 captaciones catastrados, 1.956 corresponden a captaciones someras y 495 corresponden a captaciones profundas (Figura 3-7). Cabe señalar que en el trabajo en terreno se constató que 50 captaciones, de los 136 APR, tenían como fuente agua superficial, por lo que se tiene un total de 2.746 captaciones catastradas. En la Tabla 3-6 se muestra el total catastrado, clasificado por profundidad y diferenciando las captaciones con fuente superficial.

Tabla 3-6. Captaciones catastradas clasificadas en someras y profundas

Clasificación captaciones	**Nº captaciones**
Someras (Profundidad ≤20 m)	1.956
Profundas (Profundidad >20 m)	495
Sin información (S/I)	295
TOTAL CAPTACIONES	**2.746**
Fuente Superficial	50
TOTAL CATASTRADO	**2.796**

La base de datos completa del catastro de terreno se encuentra en el Anexo 0. En dicha base de datos se excluyeron los APR con fuente superficial. Por otra parte las fichas de catastro escaneadas se encuentran en el Anexo B.3.

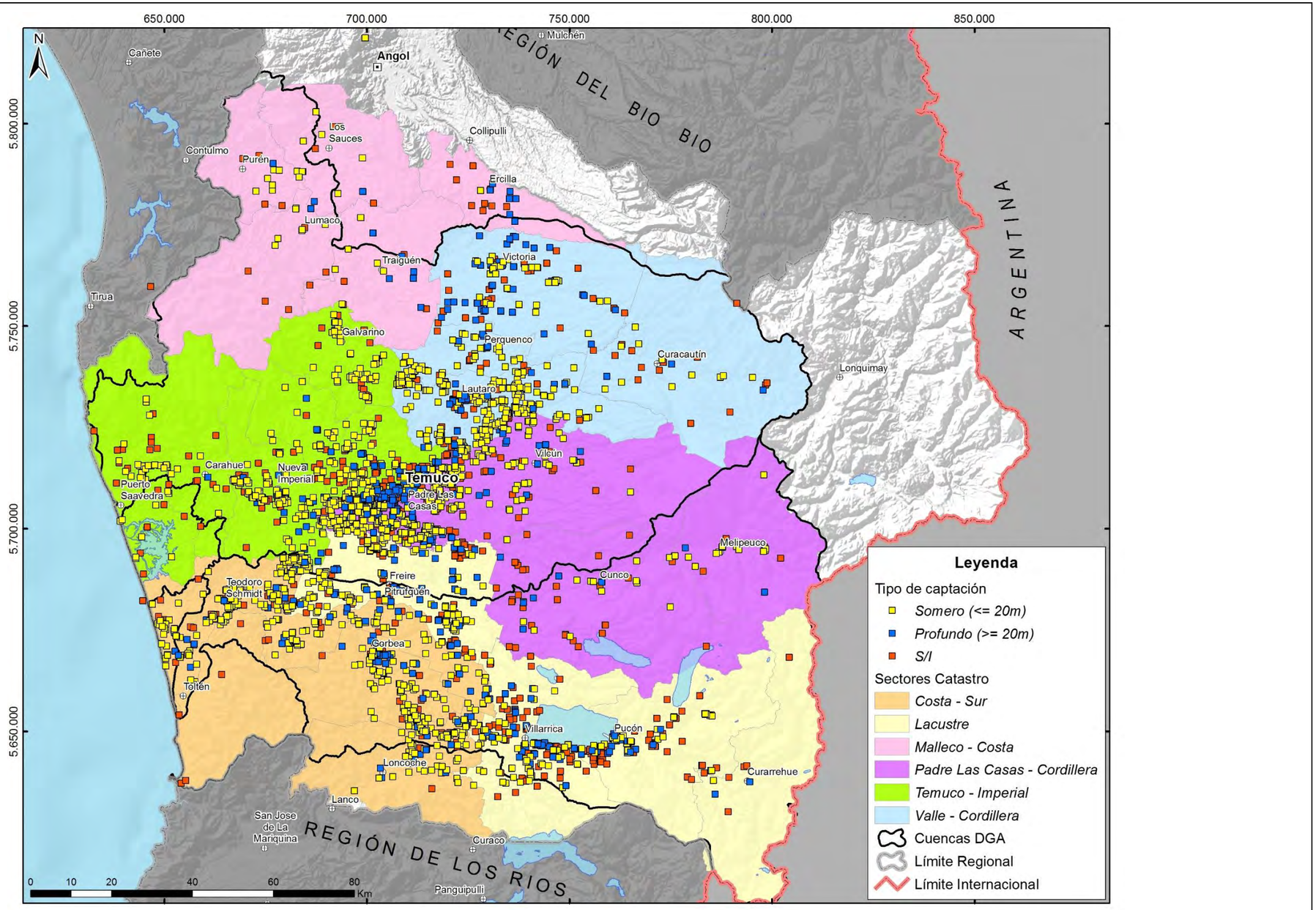


Figura 3-7: Captaciones visitadas en terreno, agrupadas en someras y profundas

3.3.2 Información de Uso del agua

Se levantó información del catastro realizado que da cuenta del uso del agua de 2.693 captaciones, equivalente a un 98% del total de captaciones catastradas (2.746 captaciones).

Cabe señalar que 107 captaciones no tienen información de caudal, de las cuales 43 corresponden a solicitudes en trámite, 35 a APR, y 29 a pozos nuevos (PZN).

La información faltante sobre uso del agua y caudal explotado corresponde a captaciones de las cuales no se pudo obtener antecedentes por desconocimiento del entrevistado.

Del total de captaciones sin información de caudal, el 68% tiene uso destinado a Agua Potable, por lo tanto, el caudal destinado a uso Agua Potable que se presenta en este análisis sería menor al real.

En la Tabla 3-7 se muestra una síntesis de las captaciones de acuerdo al uso. Como se observa, el uso Agua Potable representa el 44% del total de captaciones equivalente a un caudal de 6.816 L/s, seguido por un 24% de uso Riego equivalente a 4.525 L/s (Tabla 3-7). Además, un 10% de las captaciones tiene más de un uso asociado, lo que equivale a 704 L/s.

Tabla 3-7. 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%
Total	**15.050**	**100%**	**2.693**	**100%**

El 14% de las captaciones no están 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.

En la Tabla 3-8 se presenta el uso de agua de acuerdo a profundidad de la captación.

Para graficar la distribución del caudal por profundidad, se presenta la Figura 3-8, en la cual 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.

Se debe tener en consideración, como se observa en la Tabla 3-8, que hay 280 captaciones que no tienen información de profundidad, de las cuales el 56% está destinada a Agua Potable.

Tabla 3-8. 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
Total	**3.571**	**1.929**	**8.678**	**484**	**2.801**	**280**

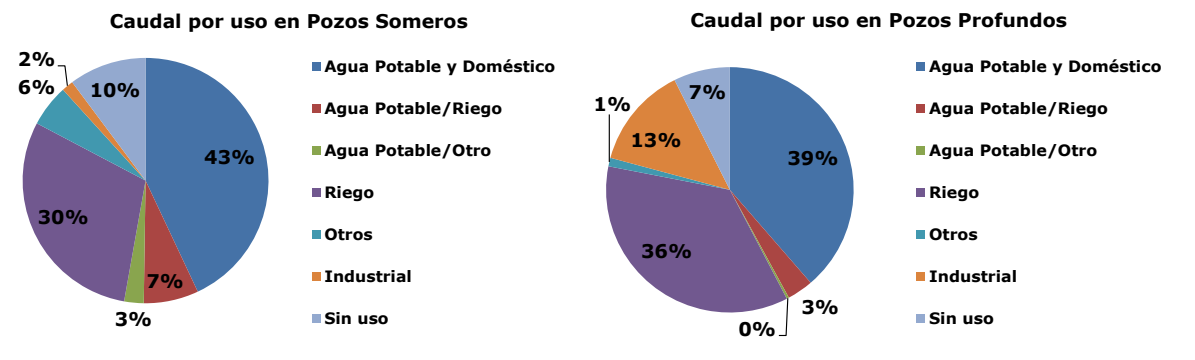


Figura 3-8: Caudal por uso de acuerdo a profundidad de captación

3.3.3 Información de Nivel de agua

En el catastro se cuenta con información de nivel de agua de 2.080 captaciones, equivalente a un 76% del total del catastro. 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 3-9, Figura 3-10, Figura 3-11 y Figura 3-12 se presentan los gráficos que representan los valores de los niveles medidos de acuerdo a tipo de pozo.

El nivel estático en pozos profundos se encuentra entre 1 y 16 m bajo superficie para la mayor parte de los pozos Figura 3-9. Por otra parte, el nivel dinámico en gran parte de los pozos profundos se encuentra entre 10 y 25 m bajo superficie (Figura 3-10).

En pozos someros, el nivel estático en gran parte de las captaciones se encuentra entre 0 y 2,5 m bajo superficie (Figura 3-11). Por otra parte, el nivel dinámico en gran parte de los pozos someros se encuentra entre 1 y 6 m bajo superficie (Figura 3-12).

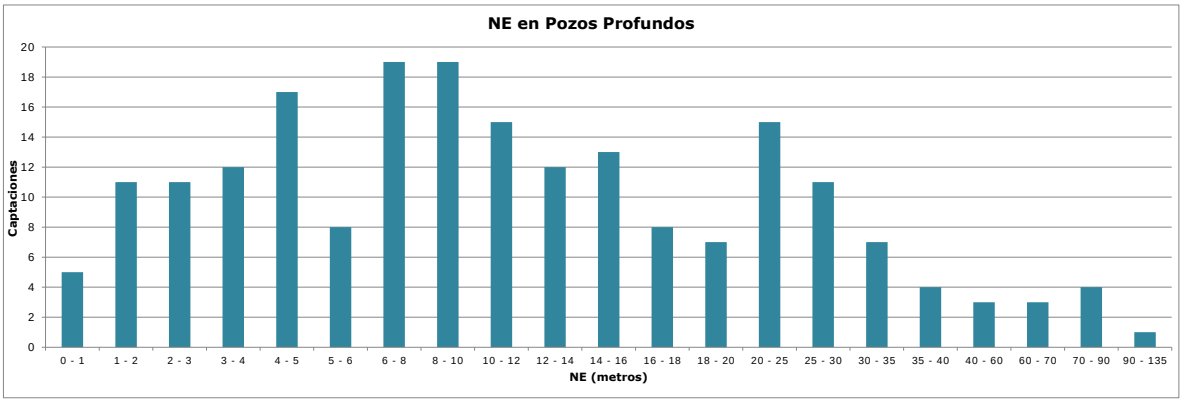


Figura 3-9: Nivel Estático en pozos Profundos

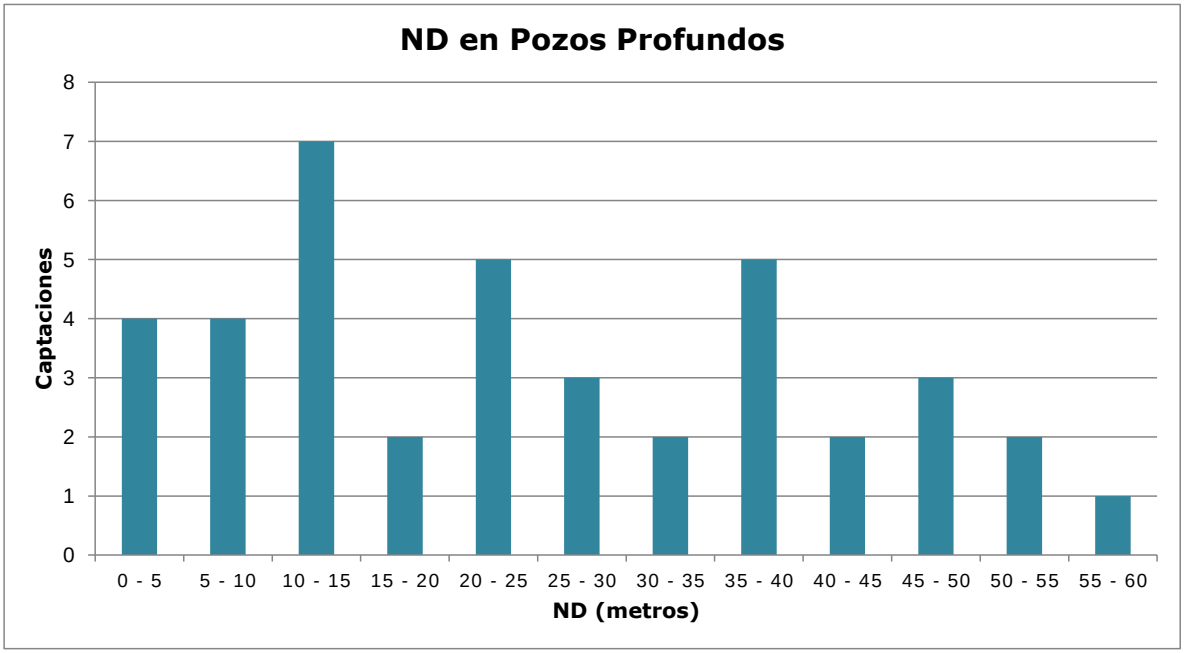


Figura 3-10: Nivel Dinámico en Pozos Profundos

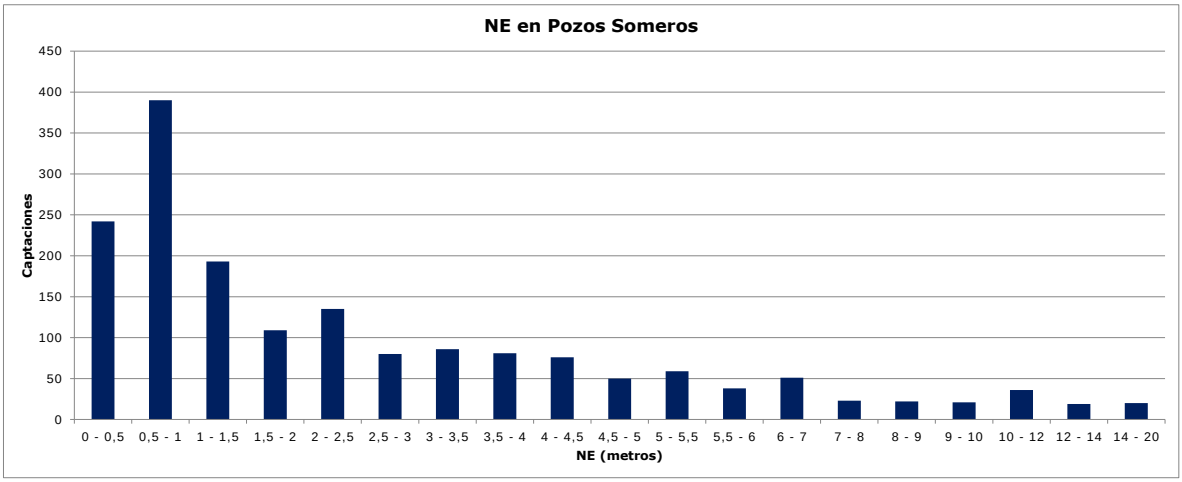


Figura 3-11: Nivel Estático en pozos Someros

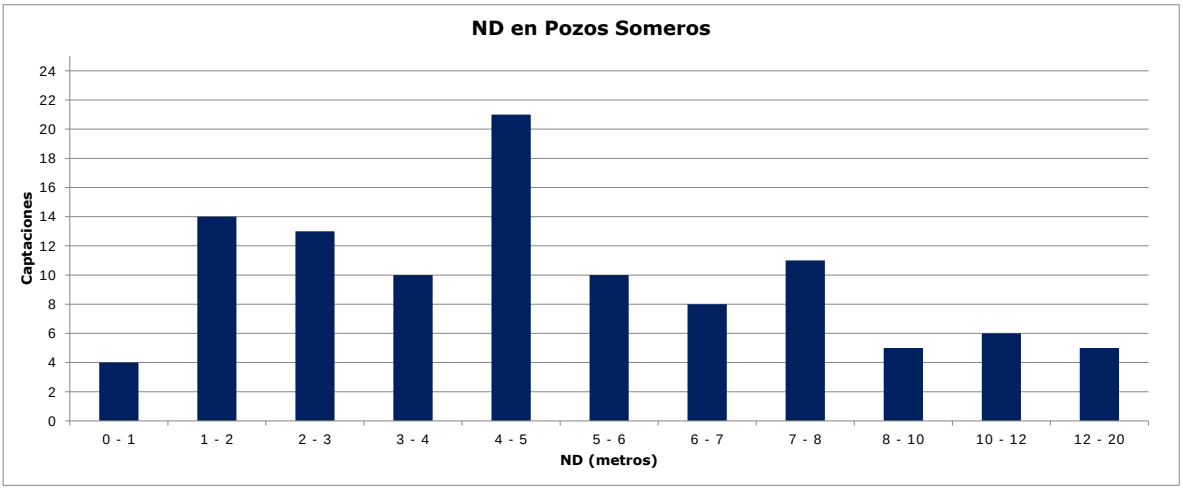


Figura 3-12: Nivel Dinámico en pozos Someros

3.3.4 Parámetros Físico-Químicos

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. Por otra parte, no fue posible obtener parámetros físico-químicos de aproximadamente un 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 errados, 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 3-9).

Tabla 3-9. Parámetros físico-químicos

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
Desv. Estándar	2,8	0,7	0,10

3.3.5 Características de captaciones

De acuerdo a información de terreno, de 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.

3.3.6 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 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.

Cabe destacar que 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 peticionario.

Finalmente, 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.

Por otra parte, se tiene información de profundidad de 2.391 captaciones con expediente asociado, información que no está disponible en la base del CPA.

Además, hasta la fecha, se ha logrado obtener las coordenadas de 16 captaciones que en la base del CPA no tienen información de coordenadas.

3.3.7 Revisión de expedientes en Juzgado de Letras y Conservador de Bienes Raíces CBR

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). El procedimiento a seguir fue el siguiente:

Expedientes NR (Juzgado de Letras): En primer lugar se identificaron los expedientes administrativos sobre regularización de derechos de aprovechamiento de aguas

subterráneas a través del procedimiento establecido por el artículo 2° Transitorio del Código de Aguas, que recaen sobre recursos hídricos.

Después de completada esta tarea se procedió a determinar para cada solicitud en particular, el número y fecha del oficio mediante el cual la Dirección General de Aguas remitió, en su caso, a la Corte de Apelaciones de Temuco o al tribunal de turno correspondiente, el expediente administrativo con el respectivo informe técnico.

Determinada la fecha y el número del oficio de la Dirección General de Aguas, se procedió a identificar el tribunal en el que se tramitó la solicitud de regularización de derechos de aprovechamiento de aguas. Dependiendo del caso, esta solicitud se realiza en la Corte de Apelaciones respectiva, cuando el oficio de la Dirección General de Aguas debe ingresar a distribución en la Corte para la determinación del tribunal competente o directamente en el Tribunal de turno competente. Este procedimiento se realizó buscando tanto a través del ingreso del oficio de la Dirección General de Aguas, como a través del nombre y RUT de los solicitantes.

Establecido el tribunal, se identificó el Rol de tramitación de la causa, a través del examen de los libros de ingreso del tribunal correspondiente al año en que se encuentra fechado el oficio de la Dirección General de Aguas que remite el expediente administrativo.

Determinado el rol de la causa, dependiendo del tribunal de que se trate y de los medios con que este cuente, se procedió a indagar el estado de tramitación de la causa, esto es: pendiente, con sentencia de primera instancia, en apelación o archivado.

Para el caso de los expedientes que fueron archivados, se presentó un escrito solicitando el desarchivo y luego de evacuada la resolución de dicha presentación por el Tribunal, se acompaña y posteriormente envía Oficio de Desarchivo al Archivero judicial correspondiente, proceso que dependiendo de la jurisdicción competente y de la fecha de archivo, tarda entre 2 semanas y 3 meses. Una vez desarchivados los expedientes requeridos, se procede a revisar su estado procesal y a respaldar con una copia las últimas actuaciones.

Salvo las causas tramitadas en Temuco, el descrito es el procedimiento estándar. Esta diferenciación se hace necesaria teniendo en cuenta que en Temuco se aplica la regla de Distribución entre 3 Tribunales, lo que vuelve más compleja la búsqueda, puesto que se debe realizar el mismo procedimiento en los 3 Tribunales Civiles con todas y cada una de las causas de dicha jurisdicción, hasta determinar en qué Tribunal ha recaído el expediente. Esto en atención a que los libros de ingresos de la Corte de Apelaciones de Temuco anteriores al año 2003 se encuentran archivados, siendo muy dificultoso y lento el acceso a ellos, tanto como su revisión.

Paralelamente a lo descrito anteriormente, se realizó una búsqueda a través de la página web del Poder Judicial de los 54 expedientes, encontrándose 16 causas de las cuales 9 se encuentran archivadas, 4 con sentencia ejecutoriada y 3 en tramitación. De las 38 causas no encontradas en la página, se efectúo una revisión en sus respectivos Juzgados de Letras, encontrándose información a la fecha de 25 de ellas y todas estaba archivadas, por lo anterior, se solicitó su desarchivo para concoer su estado actual (hasta el momento se sabe de 5 expedientes con sentencia ejecutoriada). Respecto a las 9 restantes se está realizando una búsqueda más minuciosa para poder dar con los archivos. La información del estado de los expedientes se puede encontrar en la base de datos sistematización de información.

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 e información de N° de Resolución DGA y su fecha.

Es importante mencionar que estos expedientes no fueron revisados en el CBR debido a que ya se cuenta con la información oficial de la DGA.

3.3.8 Revisión 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. Es importante mencionar, que los peticionarios considerados como parte de la sanitaria y que aparecen en el CPA están a nombre de Sendos IX, Econssa S.A, Aguas del Altiplano, Empresa de Servicios Sanitarios de la Araucanía y Antofagasta. Para poder incluirlo en la base de datos se solicitó la información a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Los antecedentes solicitados se refieren a información que entregan las sanitarias mensualmente a la SISS a través del informe PR018001, específicamente se solicitó sus coordenadas en UTM, cota, profundidad de la captación, niveles estáticos y dinámicos, caudales explotados y producción mensual de cada pozo.

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 que se entrega como Anexo B.2.

3.4 DETERMINACIÓN DE DEMANDAS Y CONSUMOS

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

3.4.1 Evolución temporal de Derechos de Agua

A partir de la información de derechos subterráneos otorgados y las solicitudes en trámite, facilitada por la DGA, se realizó un análisis de la evolución tanto de los derechos subterráneos otorgados y las solicitudes de derecho en trámite en las cuencas incluidas en el estudio. La base de datos de derechos otorgados así como las solicitudes de derechos en trámite a través del tiempo se encuentra en el Anexo B.1.

De acuerdo a lo anterior, se graficó la evolución, entre los años 1977 y 2013, tanto de los derechos de aprovechamiento subterráneos otorgados totales (Figura 3-13), como de las solicitudes en trámite totales para el área de estudio (Figura 3-14). Asimismo, se graficó la variación de los mismos parámetros, derechos otorgados y solicitudes en trámite por cuenca, cuyos resultados se presentan en las Figura 3-15 y Figura 3-16, respectivamente.

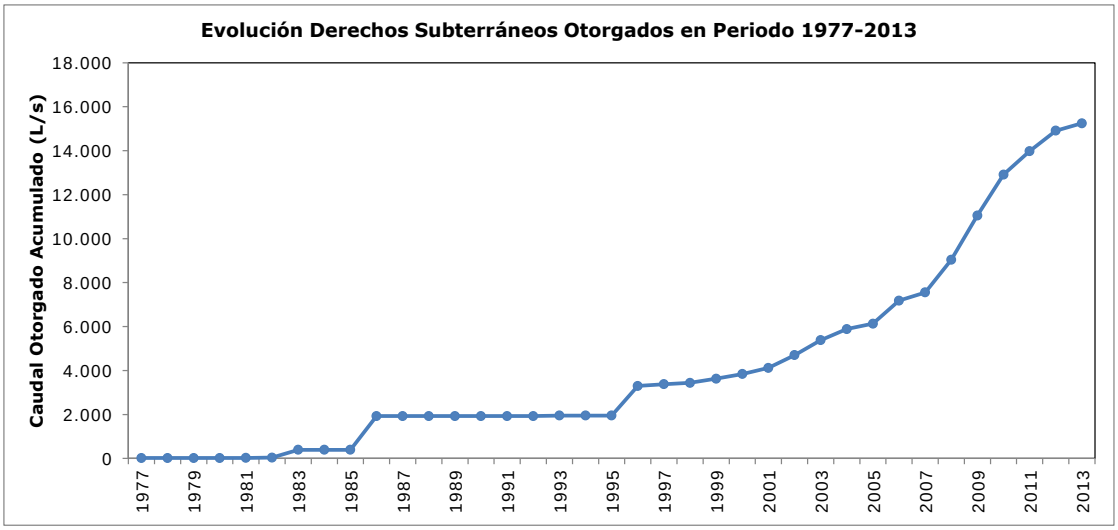


Figura 3-13: Evolución de Derechos Subterráneos Totales Otorgados en el área de estudio, período 1977-2013

Fuente: Elaboración propia a partir de información CPA

El análisis indica un caudal otorgado acumulado total bajo los 500 L/s entre los años 1977 y 1985 (Figura 3-13). En el año 1986 este valor aumenta de 4 veces, alcanzando un valor de 1.928 L/s, valor que se mantiene relativamente constante hasta el año 1995. Este valor aumenta entre los año 1996 y 2007, alcanzando un valor de 7.555 L/s. La mayor tasa de aumento ocurre a partir del año 2007. Entre el año 2007 y el 2013 el caudal acumulado total crece desde un valor de 7.555 L/s a 15.245 L/s.

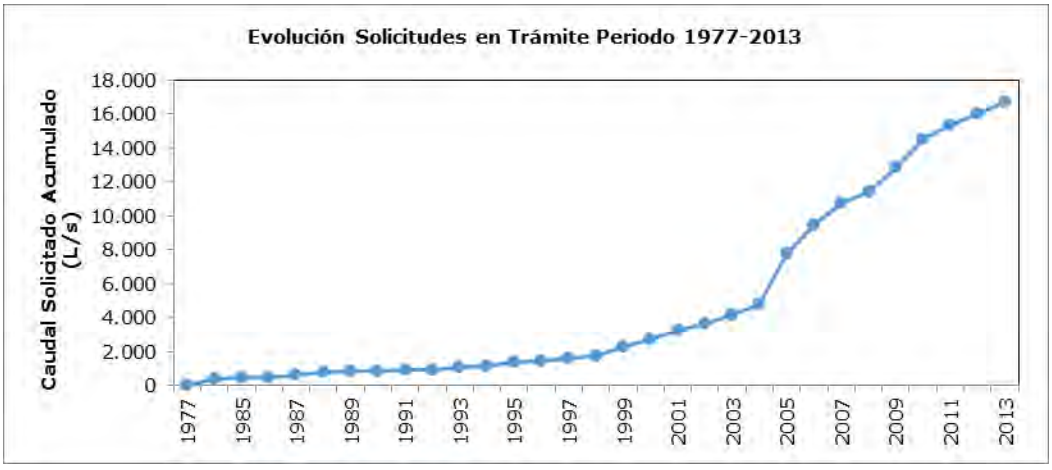


Figura 3-14: Evolución de Solicitudes de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas Totales en el área de estudio, período 1977-2013

Fuente: Elaboración propia a partir de información CPA

De acuerdo al gráfico anterior (Figura 3-14), en el periodo 1977 a 2004, se observa una incremento relativamente estable de los derechos solicitados, aumentando el

caudal solicitado de 18 a 4.782 L/s. A partir del año 2005 el total de derechos solicitados aumenta de forma considerable hasta los 16.735 L/s en el año 2013.

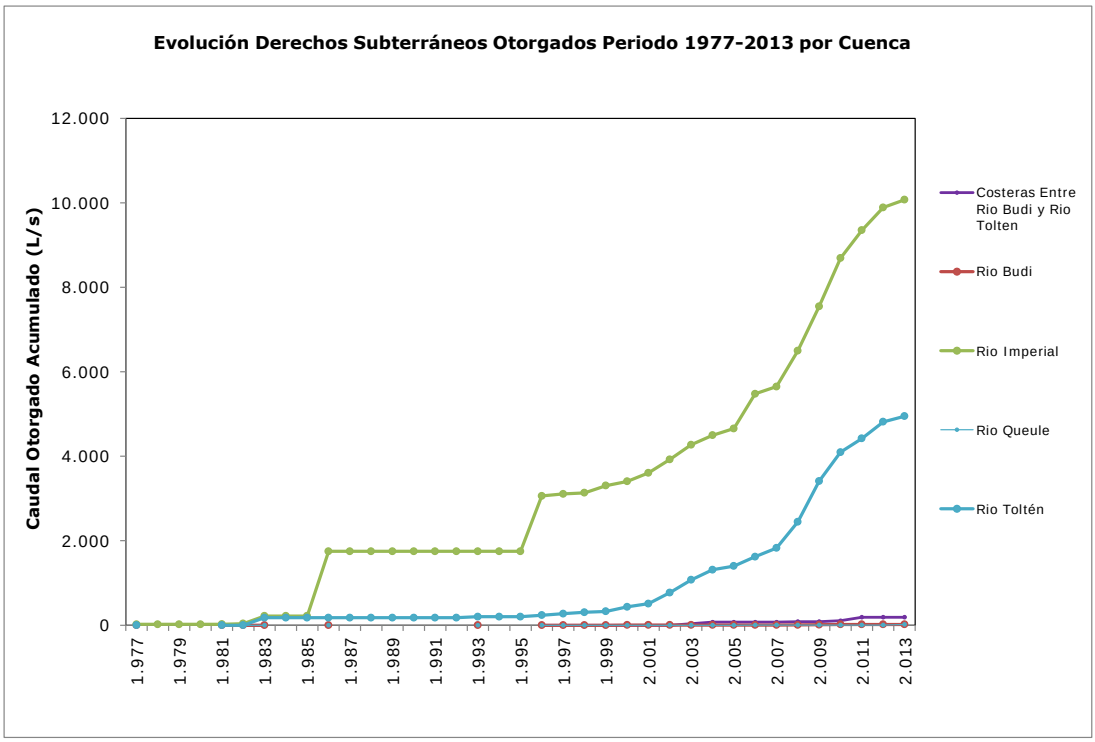


Figura 3-15: Evolución de Derechos Subterráneos Totales Otorgados, por cuencas del área de estudio, período 1977-2013

Fuente: Elaboración propia a partir de información CPA

Al analizar el caudal otorgado acumulado por cuenca es posible observar que las cuencas que han experimentado mayor aumento de caudal otorgado desde el año 1985 corresponden a la cuenca del río Imperial, seguido por la cuenca del río Toltén (Figura 3-15). 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 despreciable en caudal otorgado a través del tiempo, manteniendo un caudal otorgado acumulado menor que 500 L / s. Es importante señalar que, del total de solicitudes en trámite, entre 1977 y 2013 (16.735 L/s), se han otorgado en el mismo período un total de 15.245 L/s, quedando, por ende, un total de 1.490 L/s en solicitudes por aprobar o rechazadas por distintos motivos.

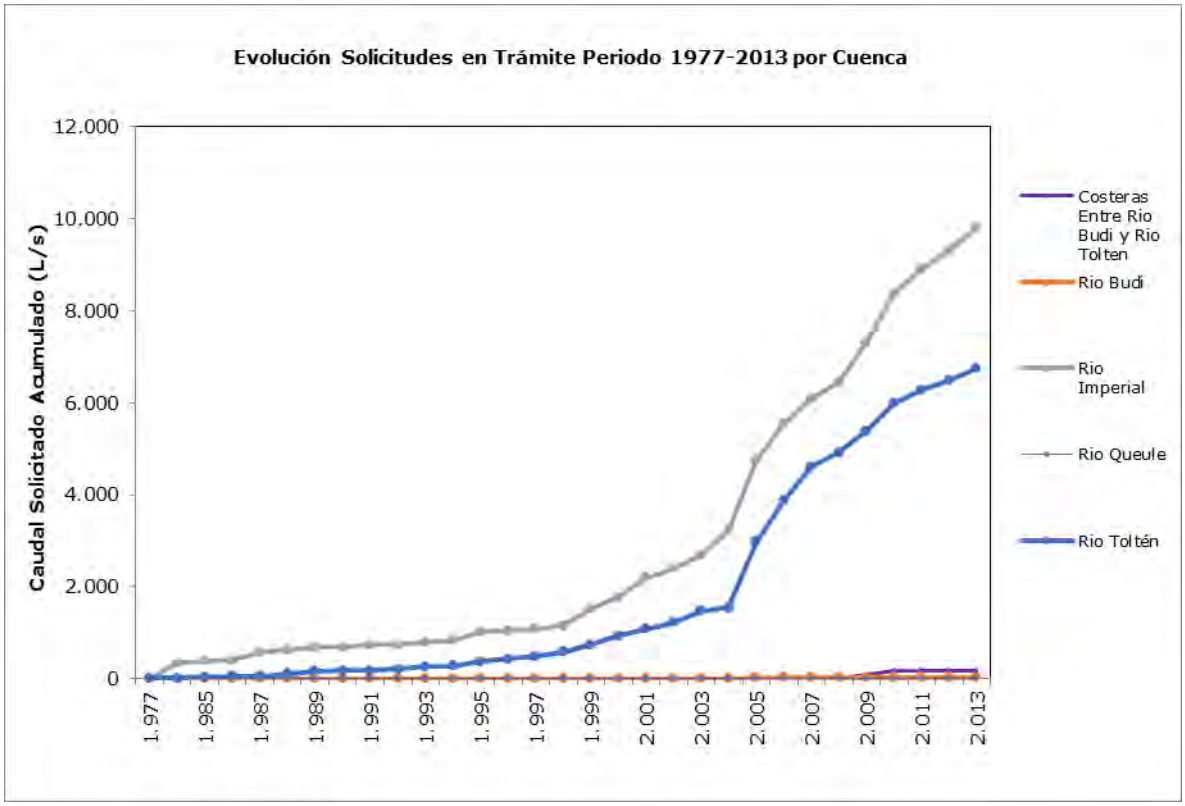


Figura 3-16: Evolución de Solicitudes de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas, por cuencas del área de estudio, período 1977-2013

Respecto al caudal solicitado por cuenca es posible observar que la mayor parte de las mismas se asocia a las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, observándose un aumento paulatino entre los años 1977 (18 L/s río Toltén - año 1977 y 350 L/s río Imperial –año 1983) y 2004 (1.549 L/s río Toltén y 3.224 L/s río Imperial). A partir de dicho año el incremento es importante hasta los 6.744 L/s en el río Toltén y 9.795 L/s en el río Imperial al año 2014. En el resto de las cuencas el aumento ha sido prácticamente nulo en comparación a las cuencas de los ríos Toltén e Imperial.

3.4.2 Determinación de demanda en función de los datos de terreno

La determinación de la demanda y consumos actuales del agua se efectúa a través de un factor de uso, el cual refleja el hecho que las captaciones son empleadas en forma temporal, como es el caso del uso agrícola, donde las captaciones se usan en algunos meses del año y algunas horas del día.

El factor de uso se determinó 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, equivalente a un 48% del total. Los usos Agua Potable y Riego son los que tienen mayor información sobre la extracción real, con un 48% y 39% respectivamente, mientras que el uso industrial es el que cuenta con menor información, equivalente a un 1%.

En la Tabla 3-10 se 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.

El caudal de uso de agua subterránea, calculado aplicando el factor de uso sobre el caudal de derecho, presenta los máximos valores principalmente asociado a agua potable y doméstico, con un valor 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 3-10. Factores de uso determinados en base al catastro

Uso	**Factor de Uso**
Agua Potable y Doméstico	0,7
Riego	0,2
Industrial	0,4
Otro	0,5

Tabla 3-11. Caudal de uso de agua subterránea

Uso	**Pozos Someros**		**Pozos Profundos**		**Sin Información de Profundidad**		**Total**	
	Q de derecho (L/s)	**Q de uso (L/s)**	**Q de derecho (L/s)**	**Q de uso (L/s)**	**Q de derecho (L/s)**	**Q de uso (L/s)**	**Q de derecho (L/s)**	**Q de uso (L/s)**
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
Total	3.207	1.734	8.038	3.776	2.384	1.478	13.630	6.988

3.4.3 Evolución temporal de demanda por sector

Este subcapítulo contiene el análisis a través del tiempo de la situación de demanda y consumos de agua para el área de estudio, por sector. De esta forma se analiza la demanda histórica, actual y proyectada para los principales usos del recurso.

En la zona de estudio, las actividades productivas más importantes en cuanto a consumos de agua son el sector forestal, la agricultura, el sector sanitario y en un porcentaje menor el sector industrial dedicado principalmente a la explotación ganadera y láctea. Estas actividades productivas han sido agrupadas en 3 usos principales del recurso: *agua potable, riego e industrial.*

Las estimaciones aquí presentadas se determinaron en base a información estadística pública (censos agropecuarios), estudios públicos recopilados como parte de la revisión de antecedentes, entre los que destacan aquellos realizados por la DGA, información

pública de instituciones como la Superintendencia de Servicios Sanitarios (planes de desarrollo de agua potable), la DOH y el Gobierno Regional (agua potable rural).

Entre las fuentes de información levantadas para realizar este análisis se encuentran:

- Precipitación Efectiva en la Agricultura de Regadío. FAO. Riego y Drenaje 25. (Dastane, N., G. 1977).
- Las Necesidades de Agua de los Cultivos. FAO. Riego y Drenaje 24. (Doorenbos, J., y W. Pruitt. 1977).
- VII Censo Agropecuario y Forestal − Año 1997.
- VII Censo Agropecuario y Forestal − Año 2007.
- Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuenca del Río Imperial, IX Región (SIT N°47. DGA, 1998).
- Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Imperial (SIT N°274. DGA, 2001).
- Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Imperial (DGA-CADE-IDEPE, 2004).
- Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Toltén (DGA-CADE-IDEPE, 2004).

3.4.3.1 Agua Potable

La demanda de este sector se consideró como el agua requerida para bebida con uso doméstico. En la región la empresa sanitaria es Aguas Araucanía, la cual abastece 26 sectores concesionados dentro del área de estudio. Para las localidades más pequeñas, existen Sistemas de Agua Potable Rural (APR).

La demanda actual y proyectada para los sistemas concesionados se obtuvo de los Planes de Desarrollo de la empresa presentados a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). En la Tabla 3-12 se presentan los sectores concesionados dentro del área de estudio considerados y su respectiva fuente de información.

Tabla 3-12. Fuentes de información para la demanda de agua potable

N°	Nombre Sector	Fuente de información (Código Plan de Desarrollo)	Año Plan
1	Sistema Vilcún	SC-09-02	2010
2	Sistema Pitrufquén	SC-09-04	2010
3	Sistema Carahue	SC-09-05	2010
4	Sistema Purén	SC-09-06	2010
5	Sistema Villarrica	SC-09-07	2010
6	Sistema Nueva Imperial	SC-09-08	2010
7	Sistema Cunco	SC-09-10	2010
8	Sistema Traiguén	SC-09-11	2010
9	Sistema Gorbea	SC-09-12	2010
10	Sistema Freire	SC-09-14	2010
11	Sistema Curacautín	SC-09-15	2010
12	Sistema Victoria	SC-09-17	2010
13	Sistema Galvarino	SC-09-18	2010
14	Sistema Nueva Toltén	SC-09-19	2010

Tabla 3-12. Fuentes de información para la demanda de agua potable

N°	Nombre Sector	Fuente de información (Código Plan de Desarrollo)	Año Plan
15	Sistema Chol Chol	SC-09-20	2010
16	Sistema Lumaco	SC-09-22	2010
17	Sistema Quitratue	SC-09-23	2010
18	Sistema Lastarria	SC-09-24	2010
19	Sistema Cajón	SC-09-26	2010
20	Sistema Puerto Saavedra	SC-09-27	2010
21	Sistema Cherquenco	SC-09-28	2010
22	Sistema Temuco (Sector Mariposas)	SC-09-29	2012
	Sistema Temuco (Sector Poniente)		2012
	Sistema Temuco (Sector Central)		2012
	Sistema Temuco (Sector Norponiente)		2012
23	Sistema Lautaro	SC-09-32	2010
24	Sistema Capitán Pastene	SC-09-33	2010
25	Sistema Pucón	SC-09-34	2010
26	Sistema Padre Las Casas	SC-09-38	2008

Por otra parte, la demanda actual y proyectada para los sistemas rurales se obtuvo de información pública recopilada principalmente en la Dirección de Obras Hidráulicas y Gobierno Regional.

Sistema concesionado

La información presentada en cada plan de desarrollo corresponde a las fuentes de abastecimiento utilizadas en cada sector, ya sean superficiales o subterráneas, los derechos de agua disponibles y los caudales estimados de explotación con una proyección 10 años. Cabe destacar que estas demandas, determinadas por la empresa, se basan en las estadísticas de facturación y las estimaciones INE del censo 2002 en cuanto a población.

A continuación se presenta para cada uno de los sectores las fuentes de abastecimiento utilizadas (Tabla 3-13). En algunos casos particulares hay captaciones o sondajes que corresponden a fuentes de reserva o que no están siendo utilizadas, esta información se presenta en extenso en los anexos de este capítulo (Anexo B.4).

Tabla 3-13. Fuentes de explotación para cada sector

N°	Nombre Sector	Fuentes de explotación superficiales	Fuentes de explotación subterráneas
1	Sistema Vilcún		Sondaje 781, Sondaje 782
2	Sistema Pitrufquén		Sondaje 669, Sondaje 674, Sondaje 9009, Sondaje 9049
3	Sistema Carahue		Sondaje 1038, Sondaje 1039, Sondaje 9056
4	Sistema Purén	Vertiente Pun-tún, Estero Pailán,	
5	Sistema Villarrica	Canal Cortez	Dren Colo Colo, Sondaje 9043, Sondaje 9053
6	Sistema Nueva Imperial		Sondaje 9007, Sondaje 9008, Sondaje 9048

Tabla 3-13. Fuentes de explotación para cada sector

N°	Nombre Sector	Fuentes de explotación superficiales	Fuentes de explotación subterráneas
7	Sistema Cunco		Sondaje 9001, Sondaje 9050
8	Sistema Traiguén	Río Traiguén, Canal San José	
9	Sistema Gorbea	Río Donguil, Vertientes 1,2 y 3	
10	Sistema Freire		Sondaje 138, Sondaje 622
11	Sistema Curacautín	Vertientes Santa Luisa	
12	Sistema Victoria	Río Traiguén (San Diego)	Sondaje 9047, Sondaje 538
13	Sistema Galvarino	Captación Río Quilém, Drenes Puerto Montt,	
14	Sistema Nueva Toltén	Estero Tronador	Noria
15	Sistema Chol Chol		Sondaje 9041, Sondaje 9055
16	Sistema Lumaco		Sondaje 1042, Sondaje 9042
17	Sistema Quitratue	Estero Puyehue, Vertientes	
18	Sistema Lastarria	Estero Puyehue, Vertientes	
19	Sistema Cajón		Sondaje 924, Sondaje 25
20	Sistema Puerto Saavedra	Estero Curilefu, Embalse Saavedra	
21	Sistema Cherquenco	Estero Lan-Lan	
22	Sistema Temuco (Sector Mariposas)	Rio Cautín	Sondaje 1003, Sondaje 1004, Sondaje 1005, Sondaje 1006, Sondaje 1007, Sondaje 1008, Sondaje 1009, Sondaje 1010, Sondaje 616, Sondaje 498, Sondaje 497, Sondaje 486, Sondaje 9033, Sondaje 9034
	Sistema Temuco (Sector Poniente)		Sondaje 1648, Sondaje 1649, Sondaje 1651, Sondaje 1652, Sondaje 9023, Sondaje 9019, Sondaje 9020, Sondaje 9021, Sondaje 9037, Sondaje 9038, Sondaje 9018, Sondaje 9069, Sondaje 9073
	Sistema Temuco (Sector Central)		Sondaje 9024, Sondaje 9025, Sondaje 9026, Sondaje 9027, Sondaje 9028, Sondaje 9029, Sondaje 9030, Sondaje 9031, Sondaje 9032
	Sistema Temuco (Sector Norponiente)		Sondaje 9072, Sondaje 9074, Sondaje 9075
23	Sistema Lautaro		Sondaje 150, Sondaje 676, Sondaje 1498, Sondaje 9006, Sondaje 9057, Sondaje 9005, Sondaje 9058
24	Sistema Capitán Pastene	Estero Pillilmapu	
25	Sistema Pucón	Vertientes sin nombre	Sondaje 9044, Sondaje 9054
26	Sistema Padre Las Casas		Sondaje 562, Sondaje 631, Sondaje 9065

A modo resumen Aguas Araucanía, extrae agua superficial de esteros, vertientes, canales y cauces mayores como los ríos Traiguén, Donguil, Quillén y Cautín, además extrae agua subterránea de 79 captaciones, de las cuales 77 corresponden a sondajes (pozos), uno corresponde a una noria y el otro a un dren.

No se cuenta con la ubicación de las captaciones, sin embargo, en estudios como el DGA-CADE-IDEPE, 2004 para el río Imperial, se indica que las fuentes de abastecimiento de agua potable (subterráneas y superficiales) se encuentran ubicadas

en las mismas localidades. La Figura 3-17 presenta la ubicación de las localidades abastecidas por el sistema concesionado.

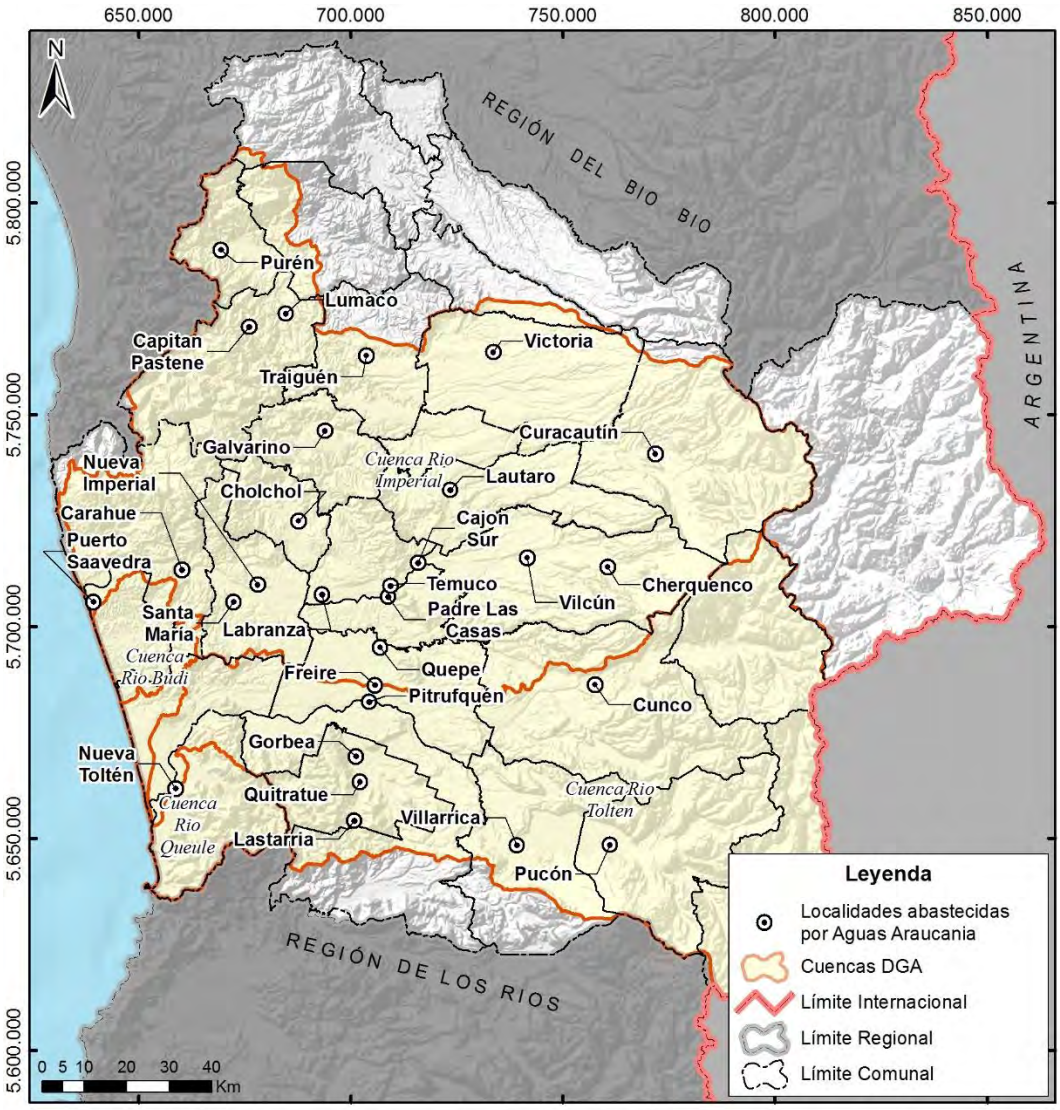


Figura 3-17. Ubicación localidades con sistemas de agua potable concesionado

A continuación se presenta la evolución temporal de la demanda de agua y el caudal de derechos de aprovechamiento para cada sector, tanto para agua superficial como agua subterránea (Tabla 3-14 y Tabla 3-15). La evolución temporal de la demanda presenta la demanda histórica (año 2010), demanda actual (año 2014) y demanda proyectada (año 2024).

Según la Tabla 3-14, del total de derechos superficiales correspondientes a 1.256 l/s se estima una demanda actual de 645 l/s, es decir cerca de un 50% de la oferta. Sin embargo, este factor de uso varía dependiendo del sector. De esta forma, un promedio de uso en la mayoría de los sectores es de 0,65, dejando fuera los sectores de Temuco, Capitán Pastene y Pucón. En el sector de Temuco no se utilizan los derechos

disponibles. Por otra parte, los sectores de Capitán Pastene y Pucón, según la información considerada, utilizan la totalidad de sus derechos.

Tabla 3-14. Evolución temporal de la demanda de agua superficial para agua potable en sistema concesionado

N°	Sector	Derechos de aprovechamiento superficiales (l/s)[1]	Caudal explotación (l/s)		
			2010	2014	2024
1	Sistema Vilcún				
2	Sistema Pitrufquén				
3	Sistema Carahue				
4	Sistema Purén	40	34	34	34
5	Sistema Villarrica	110	100	100	100
6	Sistema Nueva Imperial				
7	Sistema Cunco				
8	Sistema Traiguén	130	70	70	70
9	Sistema Gorbea	80	36	36	36
10	Sistema Freire				
11	Sistema Curacautín	80	80	80	80
12	Sistema Victoria	145	114	114	114
13	Sistema Galvarino	25	19	19	19
14	Sistema Nueva Toltén	14	12	12	12
15	Sistema Chol Chol				
16	Sistema Lumaco				
17	Sistema Quitratue	20	8	8	8
18	Sistema Lastarria	13	9,9	9,9	9,9
19	Sistema Cajón				
20	Sistema Puerto Saavedra	45	18	21	21
21	Sistema Cherquenco	20	7	7	7
22	Sistema Temuco (Sector Mariposas)				
	Sistema Temuco (Sector Poniente)				
	Sistema Temuco (Sector Central)	400			
	Sistema Temuco (Sector				
23	Sistema Lautaro				
24	Sistema Capitán Pastene	14	12	14	14
25	Sistema Pucón	120	120	120	120
26	Sistema Padre Las Casas				
Total		**1.256**	**640**	**645**	**645**

[1] *Derechos de aprovechamiento indicados en los Planes de Desarrollo al año 2014*

Según la Tabla 3-15, del total de derechos subterráneos correspondientes a 3.503 l/s se estima una demanda actual de 2.335 l/s, es decir cerca de un 70% de la oferta, sin embargo, este factor de uso varía dependiendo del sector.

Tabla 3-15. Evolución temporal de la demanda de agua subterránea para agua potable en sistema concesionado

N°	Sector	Derechos de aprovechamiento subterráneos (l/s)[1]	Caudal explotación (l/s)		
			2010	2014	2024
1	Sistema Vilcún	38	39,8	39,8	39,8
2	Sistema Pitrufquén	107	105	105	105
3	Sistema Carahue	86	75,7	75,7	75,7
4	Sistema Purén				
5	Sistema Villarrica	225	203	203	203
6	Sistema Nueva Imperial	85	74,4	74,4	74,4
7	Sistema Cunco	70	66	66	66
8	Sistema Traiguén				
9	Sistema Gorbea				
10	Sistema Freire	40	40	40	40
11	Sistema Curacautín				
12	Sistema Victoria	52	45	45	45
13	Sistema Galvarino				
14	Sistema Nueva Toltén	6			
15	Sistema Chol Chol	37,7	28,5	34	34
16	Sistema Lumaco	20	14,8	14,8	14,8
17	Sistema Quitratue				
18	Sistema Lastarria				
19	Sistema Cajón	36	13,9	18	18
20	Sistema Puerto Saavedra				
21	Sistema Cherquenco				
22	Sistema Temuco (Sector Mariposas)	811	344[2]	344[2]	344[2]
	Sistema Temuco (Sector Poniente)	740	461[2]	461[2]	473[2]
	Sistema Temuco (Sector Central)	652	319[2]	319[2]	319[2]
	Sistema Temuco (Sector Norponiente)	123			95[2]
23	Sistema Lautaro	235	185,9	210,9	210,9
24	Sistema Capitán Pastene				
25	Sistema Pucón	139	53	53	53
26	Sistema Padre Las Casas	[3]	231	231	231
Total		**3.503**	**2.300**	**2.335**	**2.442**

[1] *Derechos de aprovechamiento indicados en los Planes de Desarrollo al año 2014*
[2] *Dato corresponde a un año cercano al indicado*
[3] *Se utilizan derechos del Sector Mariposas*

Sistema rural

En el sector rural, las localidades son abastecidas mediante Sistemas de Agua Potable Rural (APR). La información respecto de la ubicación de cada uno de los sistemas APR y su estado (sistema existente, proyecto en etapa de diseño, o proyecto en etapa de prefactibilidad) se obtuvo del sitio web del Gobierno Regional (GORE Araucanía). Por otra parte, la información relativa a demanda de agua actual y proyectada de los

sistemas y el tipo de fuente utilizada (superficial o subterránea) se obtuvo de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

En el caso de los proyectos existentes de APR, la información utilizada se presenta como la demanda actual del sistema (caudal requerido en l/s) y su proyección a 20 años como un aumento en el caudal requerido de un 60%. Por lo tanto, para determinar la demanda proyectada a 10 años, se utilizó la misma tasa de crecimiento en forma proporcional, es decir un incremento del 30%.

En el caso de los proyectos en etapa de diseño y prefactibilidad, debido a que no presentaban información de demanda, se utilizó la población que sería abastecida por el proyecto (considerando una tasa de crecimiento de 30%) y una dotación promedio por habitante al día de 150 litros (valor utilizado comúnmente en la bibliografía en diseño de proyectos de abastecimiento de agua potable). Con esta información se estimó la demanda futura.

En el área de estudio, existen actualmente 161 sistemas de APR (Tabla 3-16)(Figura 3-18), de los cuales, 63 sistemas utilizan fuentes superficiales con un caudal requerido de 244,1 l/s, 65 sistemas utilizan fuentes subterráneas con un caudal requerido de 352,5 l/s y 33 sistemas, cuya fuente de abastecimiento no se encuentra especificada en la información disponible, requieren un caudal de 102,4 l/s. En síntesis la demanda actual del sistema rural es de 699 l/s.

Tabla 3-16. Demanda actual de sistemas de agua potable rural existentes según fuente de abastecimiento

Provincia	Comuna	Abastecimiento superficial		Abastecimiento subterráneo		Fuente de abastecimiento no especificada	
		N° APR	Q requerido actual (l/s) 2014	N° APR	Q requerido actual (l/s) 2014	N° APR	Q requerido actual (l/s) 2014
Cautín	Carahue	5	24,6	2	8,9	1	0,9
	Cholchol			2	3,9	1	2,1
	Cunco	2	3,4	4	25,3	2	16,4
	Curarrehue	3	24,7				
	Freire	2	4,1	10	28,6		
	Galvarino	2	2,8			1	0,6
	Gorbea	1	0,7				
	Lautaro	4	5,3	2	3,9		
	Loncoche	2	12,8	1	2,0	3	2,4
	Melipeuco	2	37,6			1	2,6
	Nueva Imperial	1	3,6	8	26,8	6	23,0
	Padre Las Casas			8	35,6	2	7,2
	Perquenco			2	42,4	1	1,8
	Pitrufquen	2	1,9	5	11,3	3	9,2
	Pucón	6	33,8			2	5,2
	Puerto Saavedra	2	5,3	1	1,2		

Tabla 3-16. Demanda actual de sistemas de agua potable rural existentes según fuente de abastecimiento

Provincia	Comuna	Abastecimiento superficial		Abastecimiento subterráneo		Fuente de abastecimiento no especificada	
		N° APR	Q requerido actual (l/s) 2014	N° APR	Q requerido actual (l/s) 2014	N° APR	Q requerido actual (l/s) 2014
	Temuco	1	1,1	5	18,7	1	2,9
	Teodoro Schmidt	1	1,1	4	72,9		
	Tolten	2	9,9	2	11,2	1	7,7
	Vilcun	4	6,6	3	20,9	1	2,7
	Villarrica	9	26,1	1	14,1	1	4,8
Malleco	Curacautin	3	6,5	2	3,4	2	7,2
	Ercilla			1	13,0	1	0,9
	Lumaco	2	4,7	1	2,0		
	Puren	3	10,5			3	4,8
	Victoria	4	16,9	1	6,1		
Total		**63**	**244,1**	**65**	**352,5**	**33**	**102,4**

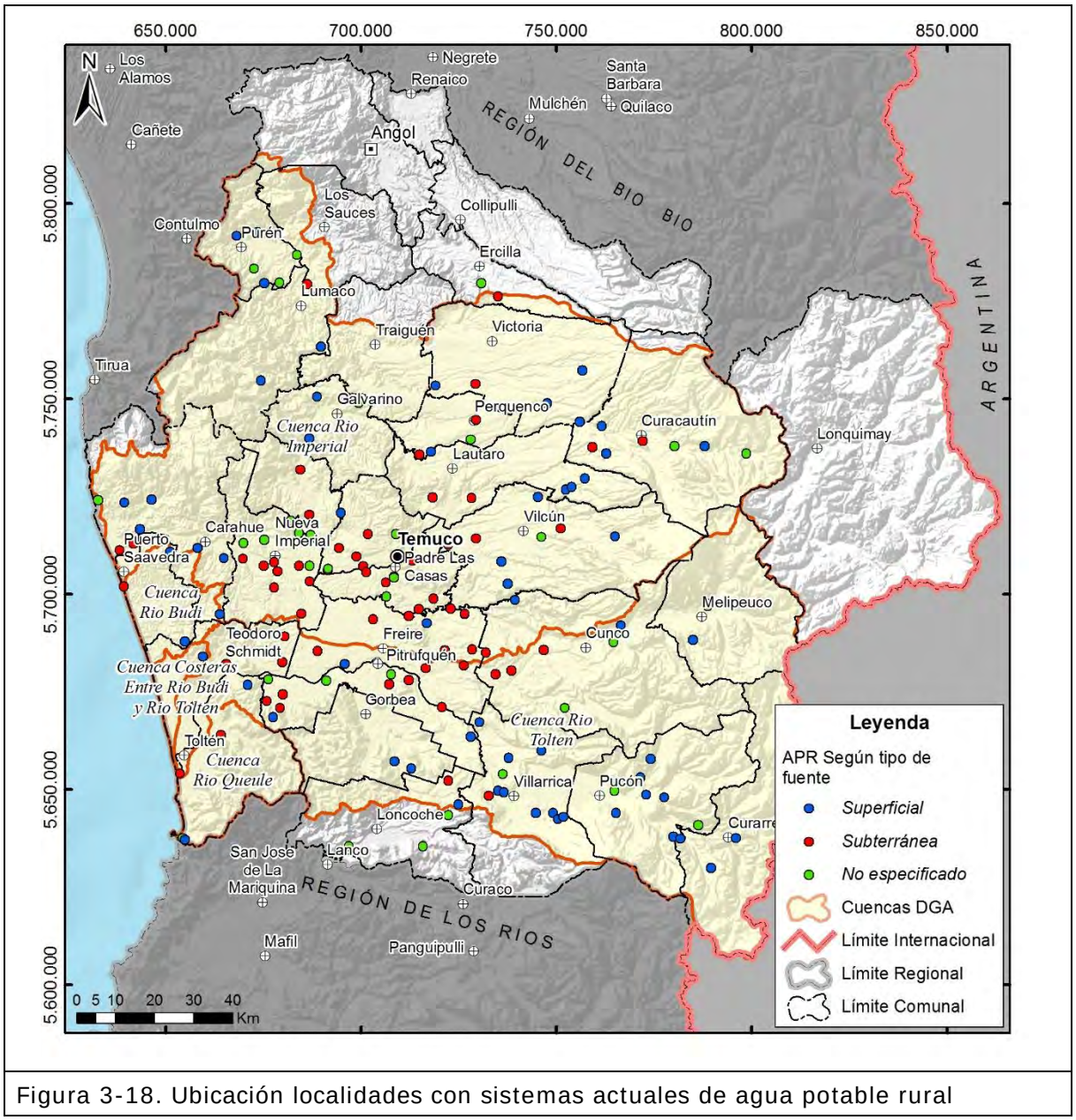


Figura 3-18. Ubicación localidades con sistemas actuales de agua potable rural

La demanda futura, proyectada a 10 años se presenta en la Tabla 3-17, donde se señala que continuarían existiendo los mismos 63 sistemas APR con abastecimiento superficial, pero con un incremento en su caudal demandado a 317,4 l/s. Los sistemas APR con abastecimiento subterráneo aumentarían a 94, con una demanda de 494,7 l/s. Además se proyectan otros 66 sistemas sin fuente de abastecimiento especificada, con un caudal requerido de 166,7 l/s. En síntesis la demanda proyectada a 10 años del sistema rural sería de 979 l/s.

Tabla 3-17. Demanda proyectada de sistemas de agua potable rural existentes, proyectos en diseño y prefactibilidad, según fuente de abastecimiento

Provincia	Comuna	Abastecimiento superficial		Abastecimiento subterráneo		Fuente de abastecimiento no especificada	
		N° APR	Q requerido a 10 años (l/s) 2024	N° APR	Q requerido a 10 años (l/s) 2024	N° APR	Q requerido a 10 años (l/s) 2024
Cautín	Carahue	5	31,9	2	11,5	8	7,4
	Cholchol			2	5,1	4	7,1
	Cunco	2	4,4	4	32,9	2	21,3
	Curarrehue	3	32,1				
	Freire	2	5,3	11	38,4		
	Galvarino	2	3,6			2	1,9
	Gorbea	1	0,9	1	1,4	1	0,5
	Lautaro	4	6,9	3	5,8	1	1,1
	Loncoche	2	16,7	3	4,8	4	4,3
	Melipeuco	2	48,9			1	3,4
	Nueva Imperial	1	4,6	10	40,7	9	33,2
	Padre Las Casas			14	53,1	5	12,3
	Perquenco			2	55,2	1	2,4
	Pitrufquen	2	2,4	11	21,4	3	12,0
	Pucón	6	44,0			4	8,4
	Puerto Saavedra	2	6,9	2	2,7	2	2,2
	Temuco	1	1,5	6	25,5	5	8,3
	Teodoro Schmidt	1	1,4	5	96,2	2	1,9
	Tolten	2	12,9	2	14,6	1	10,1
	Vilcun	4	8,6	4	28,4	1	3,6
	Villarrica	9	34,0	5	23,0	3	7,7
Malleco	Curacautin	3	8,5	2	4,4	2	9,4
	Ercilla			1	16,9	1	1,1
	Lumaco	2	6,1	1	2,6		
	Puren	3	13,7	1	1,1	3	6,2
	Traiguen			1	1,1		
	Victoria	4	22,0	1	7,9	1	1,0
Total		**63**	**317,4**	**94**	**494,7**	**66**	**166,7**

Con respecto a los derechos de agua y su relación con los caudales demandados por estos sistemas, la información disponible no permite hacer una comparación efectiva. En este sentido 39 de los 161 sistemas de APR existentes presentan información sobre el derecho de agua otorgado, es decir, solo un 24%.

A modo resumen, la Tabla 3-18 presenta la demanda histórica, actual y proyectada para el agua potable en el área de estudio, considerando el sistema concesionado y el sistema rural.

Tabla 3-18. Demanda histórica, actual y proyectada del sector agua potable

Sistema	Demanda de agua superficial (l/s)			Demanda de agua subterránea (l/s)		
	2010	**2014**	**2024**	**2010**	**2014**	**2024**
Sistema concesionado	640	645	645	2.300	2.335	2.442
Sistema rural (APR)	244*	244	317	353*	353	495
Total**	**884**	**889**	**962**	**2.653**	**2.688**	**2.937**

**Se considera que la demanda histórica del sistema APR es igual a la demanda actual, debido a que todos los proyectos entraron en operación con anterioridad al 2010*

*** No se consideran en este total las demandas de agua potable rural (APR) de aquellos sistemas que no especifican su fuente de abastecimiento y que suman un caudal de 102 l/s al año 2014.*

Comparando estos resultados con antecedentes históricos, se tiene que, por ejemplo, en el año 1992 de acuerdo al estudio "Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad" de las cuencas de los ríos Imperial y Toltén" (DGA-CADE ODEPE, 2004), la demanda de agua potable en la cuenca del Imperial era de 1.053 l/s y en la cuenca del Toltén ascendía a ascendía a 150 (l/s), contabilizando un total para el área de estudio de 1.203 l/s. Posteriormente en el estudio "Plan Director para la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del Río Imperial", (DGA, SIT N°74,2001), se indica que la explotación de agua potable al año 1999/2000 solo para la cuenca del río Imperial era de 1.286 l/s. Esto permite señalar que la demanda de agua de este sector ha experimentado un crecimiento sostenido, principalmente relacionado al aumento de la población. El valor total de la demanda actual (2014) de agua para agua potable (demanda de agua superficial sumada con demanda de agua subterránea en Tabla 3-18) se estima en 3.577 l/s.

3.4.3.2 Riego

Determinación de la demanda agrícola actual

La demanda de agua de riego depende de las necesidades hídricas de cada especie presente en el sector de riego, de la cantidad de precipitaciones que puedan suplir en parte esas necesidades, de los sistemas de riego que se utilicen y de las eficiencias de aplicación del agua.

En este caso, la zona de estudio está compuesta principalmente por las cuencas de los ríos Imperial y Toltén. Para cada una de estas cuencas, la determinación de la demanda de riego está orientada hacia un modelo de simulación hidrológico operacional de la cuenca, que permitirá analizar adecuadamente diferentes alternativas de gestión integrada de los recursos hídricos, acorde a las necesidades actuales y futuras de la zona de estudio.

Esta sección presenta exclusivamente la parte correspondiente a la determinación de las demandas medias de riego para el periodo de calibración considerado en el modelo (1980-2001) y que se asumirá como la demanda actual del sistema, adaptada a la sectorización utilizada en el modelo de simulación.

De este modo, la información básica para la determinación de las demanda agrícola actual corresponde al Censo Agropecuario, 2007, el cual entrega información a nivel de

distrito agro censal. Con esta información se definieron las zonas de riego en cada una de las cuencas mencionadas, como una agrupación de distritos agro censales con características hidrológicas comunes.

Según lo anterior, se definieron 20 zonas de riego en la cuenca del río Imperial (ZI1 a ZI20) y 11 zonas de riego en la cuenca del río Toltén (ZT1 a ZT11) (Figura 3-19), donde cada zona tiene asociada una superficie regada, según información obtenida del censo.

En total existen 21.233 Ha de área regada en la cuenca del río Imperial equivalentes al 1,6% de la superficie total de la cuenca y 12.920 Ha regadas en la cuenca del río Toltén equivalentes al 1,4% de la superficie total de la cuenca.

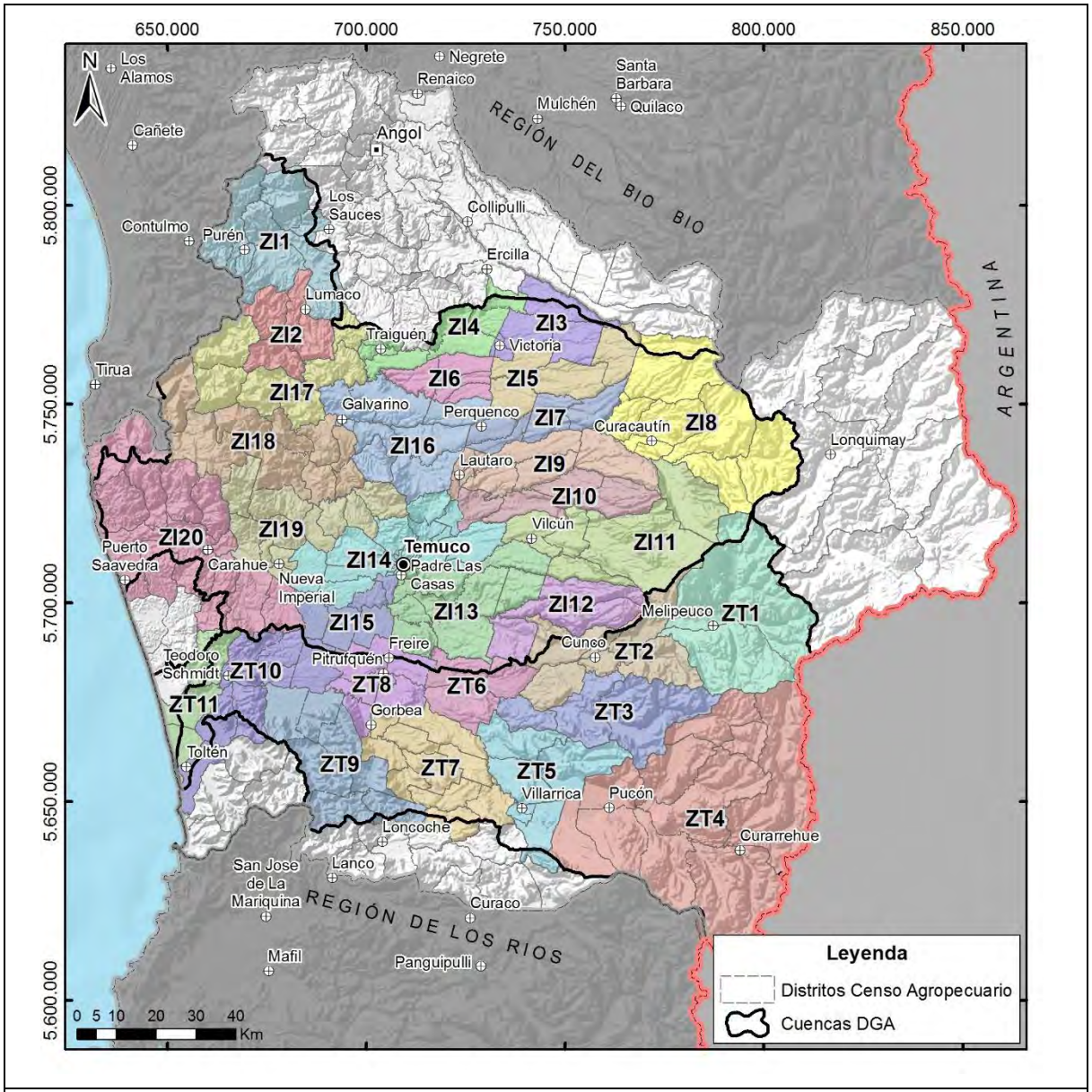


Figura 3-19. Sectorización utilizada para la determinación de la demanda de riego

Para efectuar el cálculo de las demandas de agua para cada una de las zonas definidas en el modelo de cada cuenca, se efectuó la determinación de los siguientes aspectos y parámetros: estructura actual de cultivos, evaporación real, precipitación efectiva, demandas netas, demandas brutas y finalmente los volúmenes demandados mensualmente por cada uno de los sectores en situación actual. A continuación se describen los aspectos y parámetros anteriormente nombrados.

La estructura de los cultivos o proporcionalidad de las diferentes especies dentro del uso del suelo en condiciones de riego, se consideró sobre la base de los antecedentes presentados en el Censo Agropecuario, 2007. De acuerdo a esta información y tomando en cuenta que la zona de estudio es relativamente homogénea desde el punto de vista climático y agrícola, se consideró representativo la estructura de cultivos que se presenta en la Tabla 3-19 y Tabla 3-20 para las cuencas del Imperial y Toltén, respectivamente.

Tabla 3-19. Estructura de los cultivos en la cuenca del río Imperial

Zona	Área de riego (Ha)	Cultivo 1 Forrajeras % Área	Cultivo 2 Bosques % Área	Cultivo 3 Cereales % Área	Cultivo 4 Cult. Industriales % Área
ZI1	1.104	3	91	5	0
ZI2	46	1	95	3	0
ZI3	222	6	71	18	1
ZI4	545	9	33	51	7
ZI5	311	11	51	31	6
ZI6	413	6	11	69	13
ZI7	598	15	9	65	9
ZI8	735	13	66	18	3
ZI9	232	7	61	27	5
ZI10	403	13	50	33	3
ZI11	1.223	24	55	20	0
ZI12	12	28	45	26	0
ZI13	4.845	27	24	43	4
ZI14	4.044	18	35	31	11
ZI15	2.088	23	19	37	17
ZI16	3.525	7	48	36	8
ZI17	94	4	89	6	1
ZI18	211	1	95	3	0
ZI19	437	3	77	13	5
ZI20	237	9	71	15	4

Tabla 3-20. Estructura de los cultivos en la cuenca del río Toltén

Zona	Area de riego (Ha)	Cultivo 1 Forrajeras % Area	Cultivo 2 Bosques % Area	Cultivo 3 Cereales % Area
Z1	1.143	14	82	3
Z2	248	17	73	10
Z3	49	13	59	27
Z4	1.237	32	54	9
Z5	1.095	47	32	16
Z6	2.964	21	34	37
Z7	571	31	34	30
Z8	4.063	34	42	16
Z9	471	10	85	4
Z10	758	28	39	30
Z11	320	26	59	15

La evaporación real fue estimada por uno de los métodos publicados por FAO en 1974 en el informe FAO-24, donde a partir de una evapotranspiración de referencia o potencial (ETo) y de un coeficiente específico del cultivo (Kc) se determina la evapotranspiración del cultivo (ETc) mediante la fórmula:

$$ETc = ETo \times Kc$$

Normalmente para calcular la evapotranspiración de referencia (ETo)[1] se utilizan factores climáticos como temperatura, humedad, radicación, viento, etc. Dependiendo de la información disponible para la zona de estudio, el documento FAO N°24 presenta 5 métodos posibles para su estimación.

- Blaney-Criddle
- Radiación
- Penman
- Evaporímetro de cubeta
- Penman-Monteith combinado

Los 4 primeros métodos se utilizan para periodos de 10 o 30 días, siendo la ETo calculada como una media diaria en mm/dia para el periodo considerado. El quinto método se añadió en 1990 y puede servir para datos diarios y mensuales.

De estos métodos el que requiere menos información de datos medidos es el método de Blaney-Criddle, que solo requiere datos de temperatura y hace una estimación de 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.

[1] Se define como la evapotranspiración de un cultivo de gramíneas verdes de 8 a 15 cm, de altura uniforme, con crecimiento activo, que sombree el suelo y en el que no se escasee el agua.

La precipitación efectiva, que corresponde a la cantidad de agua caída que efectivamente es aprovechada por la planta, se determinó en base a las estaciones pluviométricas cercanas, calculando la precipitación media sobre cada zona de riego. A este valor se le aplicó la tabla para el cálculo de la lluvia efectiva establecida en el documento N°25 de la FAO, que relaciona la lluvia promedio mensual caída con la evapotraspiración real.

La demanda neta de riego de un cultivo es la cantidad de agua que resulta de la diferencia entre las demandas calculadas (ETc) y la precipitación efectiva. De esta forma:

$$Dn = Etc - Pe$$

Siendo:

Etc=Evapotraspiración del cultivo (mm)

Pe = Lluvia efectiva (mm)

La demanda bruta de riego es la necesidad adicional de agua que se aplica a la demanda neta, para solventar las carencias de agua en la eficiencia de la aplicación y corresponde propiamente tal al agua de riego, es decir:

$$Db = Dn/Ea$$

Donde:

Db= Necesidad bruta de riego (mm)

Dn= Necesidad neta de riego (mm)

Ea= Eficiencia de la aplicación (factor propio de la naturaleza del sistema de riego)

Los volúmenes demandados mensualmente por cada una de las zonas se obtienen finalmente multiplicando las demandas brutas de riego por el área de riego de cada zona (Anexo B.5).

De esta forma, en base a la metodología indicada, la Tabla 3-21 y Tabla 3-22 presentan los caudales medios mensuales demandados en l/s estimados para cada zona de riego de acuerdo al modelo hidrológico de simulación para las cuencas de los ríos Imperial y Toltén respectivamente.

Tabla 3-21. Demandas de riego cuenca Río Imperial para la situación actual

Mes	ZI1	ZI2	ZI3	ZI4	ZI5	ZI6	ZI7	ZI8	ZI9	ZI10	ZI11	ZI12	ZI13	ZI14	ZI15	ZI16	ZI17	ZI18	ZI19	ZI20	Total cuenca
Abr	559	21	53	65	49	0	0	179	51	76	318	2	567	743	194	884	40	79	178	74	**4.132**
May	406	15	13	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	94	0	370	27	54	117	43	**1.156**
Jun	234	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	26	52	12	**345**
Jul	296	11	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	121	18	36	78	25	**588**
Ago	403	15	19	0	4	0	0	12	23	13	48	0	0	220	0	435	27	54	119	45	**1.435**
Sep	530	20	51	98	52	20	39	158	53	82	285	2	714	826	251	1.017	38	74	173	71	**4.554**
Oct	711	26	92	258	116	119	247	331	97	179	596	5	2.079	1.784	755	1.947	53	100	251	108	**9.856**
Nov	865	32	130	405	178	210	442	500	137	270	897	8	3.363	2.670	1.230	2.784	66	123	319	142	**14.768**
Dic	984	36	149	464	204	240	511	577	156	311	1.047	9	3.937	3.099	1.441	3.184	75	140	363	163	**17.088**
Ene	1.014	37	152	447	205	222	483	601	157	312	1.087	9	3.897	3.086	1.424	3.131	77	145	371	167	**17.023**
Feb	858	32	126	343	165	161	356	500	128	250	898	7	3.042	2.451	1.109	2.481	65	123	309	139	**13.542**
Mar	782	29	99	200	115	62	154	384	96	173	678	5	1.849	1.669	664	1.734	58	113	266	116	**9.248**
Prom. (l/s)	**637**	**24**	**74**	**190**	**91**	**86**	**186**	**270**	**77**	**139**	**488**	**4**	**1.621**	**1.387**	**589**	**1.507**	**46**	**89**	**216**	**92**	**7.811**

Tabla 3-22. Demandas de riego cuenca Río Toltén para la situación actual

Mes	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT5	ZT6	ZT7	ZT8	ZT9	ZT10	ZT11	Total cuenca
Abr	728	139	21	532	352	751	124	1.672	231	227	114	**4.891**
May	499	91	12	312	162	207	49	836	159	94	67	**2.486**
Jun	262	43	3	116	13	0	0	138	84	0	25	**683**
Jul	360	63	7	210	94	0	20	494	115	41	45	**1.449**
Ago	523	97	13	356	213	329	67	1.027	166	124	76	**2.989**
Sep	672	132	22	495	330	930	134	1.632	217	244	109	**4.915**
Oct	902	187	36	748	568	1.996	257	2.762	294	462	167	**8.379**
Nov	1.060	227	46	938	756	2.842	355	3.639	346	634	210	**11.055**
Dic	1.187	255	52	1.072	880	3.199	405	4.170	385	720	238	**12.562**
Ene	1.211	257	51	1.087	887	3.055	395	4.160	390	702	239	**12.435**
Feb	1.042	219	42	917	736	2.411	318	3.436	335	567	201	**10.222**
Mar	990	198	33	802	596	1.620	233	2.777	315	420	173	**8.157**
Prom. (l/s)	**786**	**159**	**28**	**632**	**465**	**1.445**	**196**	**2.229**	**253**	**353**	**139**	**6.685**

Las demandas estimadas en cada zona corresponden a la agua de riego total que se debe administrar al cultivo, esta puede ser de carácter superficial o subterráneo. Sin embargo, dadas las características hidrológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio, como sucede normalmente, esta demanda se cubre primero con los recursos superficiales disponibles que son más baratos de obtener. Posteriormente, si aún existe déficit de agua de riego, éste es cubierto con recursos subterráneos, teniendo en cuenta que esta situación dependerá de las características de infraestructura que tenga cada zona.

En este sentido, debido a que la información disponible del Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA correspondiente a derechos de agua superficiales aprobados se encuentra incompleta en cuanto a su información de "uso", no es posible estimar que porcentaje de esta demanda sería cubierta con recursos superficiales y que porcentaje sería cubierta con recursos subterráneos.

Sin embargo, en el estudio "Plan Director para la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del Río Imperial", (DGA, SIT N°74,2001), se indica que dada la relativa abundancia de agua superficial, no existe una gran explotación de agua subterránea. Este tipo de explotación se usaría para agua potable, debido a que el bombeo desde sondajes permite la captación de agua de buena calidad físico-química, lo que reduce los costos de tratamiento.

Con estos antecedentes, es posible suponer que en la cuenca del Río Toltén sucede una situación similar y que, por lo tanto, las demandas estimadas para riego presentadas en las Tabla 3-21 y Tabla 3-22 son demandas de tipo superficial.

Evolución temporal de Superficies de Riego

Con respecto a la evolución del área regada, la Figura 3-20 y Figura 3-21, presentan la variación en los porcentajes de las superficies de riego, para cada zona de las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, respectivamente, entre los años 1997 y 2007, que corresponden a los dos últimos censos agropecuarios.

Como es posible apreciar en la Tabla 3-23 y Figura 3-20, la superficie de riego en la mayoría de las zonas del río Imperial, se ha mantenido relativamente constante, con excepción de algunos sectores donde se ha producido una disminución (principalmente ZI7, ZI15 y ZI16). El resultado total es una disminución de la superficie regada en la cuenca del río Imperial de un 0,3% (Tabla 3-23).

Por otra parte, como se observa en la Tabla 3-24 y Figura 3-21, la superficie de riego en la mayoría de las zonas del río Toltén, se ha mantenido relativamente constante, con excepción de un sector donde se ha producido una disminución (principalmente ZT8). El resultado total es un incremento de la superficie regada en la cuenca del río Toltén de un 0,2% (Tabla 3-24)

Los valores de la variación total de la superficie de riego en ambos ríos son prácticamente despreciables y pueden apoyar la idea de que las demandas de riego en el área de estudio se han mantenido relativamente constantes durante los últimos años. En este sentido, se esperaría que la demanda futura de agua para este tipo de uso no presentara una variación importante en las estimaciones realizadas. Sin embargo, cabe señalar que las demandas futuras de riego están estrechamente vinculadas a los proyectos de desarrollo y fomento de riego que se establezcan para la zona de estudio, tema que no es abordado en este estudio.

Tabla 3-23. Evolución de las superficies regadas entre el año 1997 y 2007 para el río Imperial.

		1 1997		2 2007	
	Area Total	**Riego**	**%**	**Riego**	**%**
ZI1	81812,2	701,5	0,9%	1104	1,3%
ZI2	37626,4	25,7	0,1%	45,7	0,1%
ZI3	37701,5	78	0,2%	221,8	0,6%
ZI4	37395,1	193,4	0,5%	544,5	1,5%
ZI5	46595,5	222,6	0,5%	310,6	0,7%
ZI6	23710,4	120	0,5%	413	1,7%
ZI7	**31182,9**	**1804,3**	**5,8%**	**597,8**	**1,9%**
ZI8	126398,9	873,7	0,7%	735	0,6%
ZI9	53254,4	536,9	1,0%	231,8	0,4%
ZI10	40597,6	48,3	0,1%	402,5	1,0%
ZI11	96237,1	1155,6	1,2%	1223,2	1,3%
ZI12	43315,7	47	0,1%	12,2	0,0%
ZI13	74441,5	4602,5	6,2%	4845	6,5%
ZI14	75148,3	4357	5,8%	4044,2	5,4%
ZI15	**29379,9**	**2539,3**	**8,6%**	**2088,4**	**7,1%**
ZI16	**78020,6**	**5992,2**	**7,7%**	**3525,3**	**4,5%**
ZI17	68061,1	270,5	0,4%	93,6	0,1%
ZI18	91939,9	301,5	0,3%	210,8	0,2%
ZI19	66981,2	488	0,7%	346,7	0,5%
ZI20	155706,4	538,1	0,3%	237,5	0,2%
Total	**1295507**	**24896,1**	**1,9%**	**21233,6**	**1,6%**

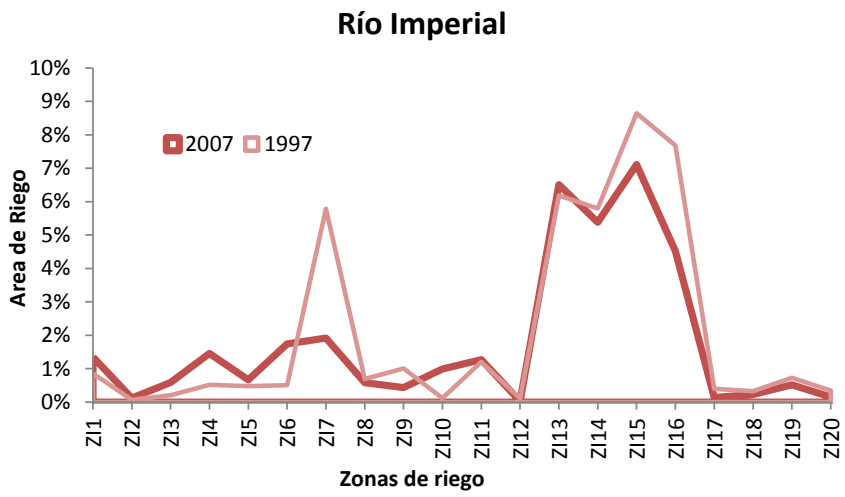


Figura 3-20. Evolución de la superficie de riego Río Imperial

Tabla 3-24. Evolución de las superficies regadas entre el año 1997 y 2007 para el río Toltén.

		1997		2007	
	Area Total	**Riego**	**%**	**Riego**	**%**
ZT1	110865,9	303	0,3%	1143,4	1,0%
3 ZT2	4 67621,3	5 471,2	6 0,7%	7 248	8 0,4%
9 ZT3	10 65382,1	11 11	12 0,0%	13 48,5	14 0,1%
15 ZT4	16 274906,1	17 550,1	18 0,2%	19 1237,3	20 0,5%
21 ZT5	22 65021,3	23 451,3	24 0,7%	25 1094,8	26 1,7%
27 ZT6	28 35290,5	29 2551,7	30 7,2%	31 2964,1	32 8,4%
33 ZT7	34 77000,5	35 175,4	36 0,2%	37 571,3	38 0,7%
39 ZT8	**40 40063**	**41 5451,4**	**42 13,6%**	**43 4063**	**44 10,1%**
45 ZT9	46 76389,4	47 61,4	48 0,1%	49 471,2	50 0,6%
51 ZT10	52 64635,2	53 648,5	54 1,0%	55 758,3	56 1,2%
57 ZT11	58 30599,2	59 71,9	60 0,2%	61 319,7	62 1,0%
63 Total	**64 907774,5**	**65 10746,9**	**66 1,2%**	**67 12919,6**	**68 1,4%**

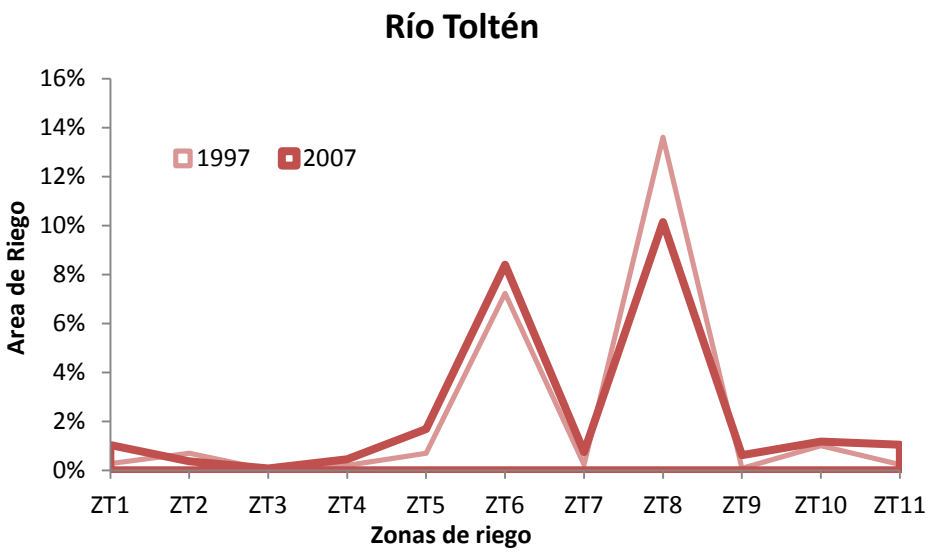


Figura 3-21. Evolución de la superficie de riego Río Toltén

3.4.3.3 Industrial

La estimación de la demanda de agua industrial, dada su magnitud despreciable, en comparación a las demandas de agua potable y riego, se basa en antecedentes presentados en los estudios anteriores más recientes.

Según se indica en el estudio "Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Imperial" (SIT N°274. DGA, 2001), en la cuenca del río Imperial funcionan unas 40 industrias, alcanzando su demanda de agua a 139 l/s. De estas industrias, alrededor de un 60% pertenece a la cuenca del río Cautín, con una demanda de 10 l/s, y más del 30% restante en la subcuenca del río Traiguén, con 90 l/s.

Según se indica en el estudio "Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad de la cuenca del río Toltén" (DGA-CADE-IDEPE, 2004), en la cuenca del río Toltén, hasta el año 1996 funcionaban tres industrias del rubro alimenticio principalmente en la elaboración de productos lácteos, y una refinadora de metales, localizadas en la parte baja de la cuenca. En conjunto demandaban en este año 52.560 m^3/mes, correspondientes a 20,3 l/s, obtenidos en su mayoría de fuentes subterráneas.

Por lo tanto, considerando esta información como la más reciente , la demanda total de agua para uso industrial sería de 159,3 l/s, que se asumirá como demanda subterránea.

3.4.4 Comentarios y conclusiones

A modo de resumen la Tabla 3-25 y la Tabla 3-26 presentan las demandas estimadas de tipo superficial y subterráneo, respectivamente, para los tres sectores productivos (usos del agua) considerados, junto a una comparación con los usos estimados en base al catastro de terreno.

En cuanto a las demandas de agua superficial en la zona de estudio se observa que el sector que mayor uso hace del recurso hídrico es el sector agrícola con un 94% de participación en la demanda (Tabla 3-25). Por el contrario, el sector relacionado a la industria presenta una participación nula, según los supuestos considerados.

En cuanto a las demandas de tipo subterráneo en la zona de estudio, se observa que el sector que mayor uso hace del recurso hídrico es el sector agua potable con un 94% de participación en la demanda (Tabla 3-26). Por otra parte, el sector relacionado al riego presentaría una participación nula, en base a los supuestos considerados.

Al comparar las demandas de agua subterránea por sector, derivados de la bibliografía, con los usos estimados según el catastro, se observa que cada uno de los sectores presenta mayor caudal de uso según el catastro (Tabla 3-26). Por otra parte, según ambas fuentes, el uso más importante corresponde a agua potable. Según los antecedentes, el uso con segunda importancia corresponde a industria, mientras que el catastro indica que este correspondería a riego.

Es necesario dejar en claro que estos valores fueron estimados en base a recopilación de información de diversas fuentes de información, con distintos niveles de detalle por lo tanto no es posible determinar con exactitud el grado de confianza de la información. Si bien la demanda de agua de tipo sanitario (agua potable) fue obtenida de fuentes oficiales, como lo son los Planes de Desarrollo del sistema concesionado y reportes de demandas de la DOH en el sistema rural, existen usos no controlados

oficialmente, por ejemplo de pequeñas localidades que no son parte del sistema concesionado de Aguas Araucanía y que tampoco figuran como agua potable rural. Por otra parte, en cuanto al riego, el nivel de incertidumbre de las estimaciones es mayor, asociado principalmente a la inexistencia de información de calidad y actualizada para el sector. La información principal utilizada proviene del Censo Agropecuario 2007, que corresponde al último censo realizado, y que para efectos de este estudio se ha utilizado como la información más reciente.

Por último, para el sector industrial solo se consideró información de dos estudios en particular, de distintas fechas, por lo tanto tampoco existe un nivel de confiabilidad elevado.

Tabla 3-25. Demandas de agua superficial en (l/s) estimada por sector productivo

Sector	Demanda según antecedentes (l/s)	% de participación en la demanda	Demanda según catastro (l/s)
Agua Potable	889	6%	No realizado
Riego	14.496*	94%	No realizado
Industria	0	0%	No realizado
Total	**15.385**	**100%**	

**Valor corresponde al total de la demanda de riego para las cuencas Imperial y Toltén, considerando el supuesto que toda la demanda de riego se cubre con agua superficial*

Tabla 3-26. Demandas de agua subterránea en (l/s) estimada por sector productivo

Sector	Demanda según antecedentes (l/s)	% de participación en la demanda	Demanda según catastro (l/s)
Agua Potable	2.688	94%	5.340
Riego	0	0%	1.036
Industria	159*	6%	477
Total	**2.847**	**100%**	**6.853**

** Se considera el supuesto que la demanda de agua para uso industrial es para ambas cuencas de tipo subterránea*

4 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

4.1 SISTEMAS DE DRENAJE

Para caracterizar el sistema de drenaje, se delimitaron cuencas hidrográficas haciendo uso de un modelo de elevación digital de terreno (DEM SRTM, http://srtm.csi.cgiar.org/), con celdas de tamaño 90 x 90 metros.

El trazado resultante de este procedimiento y el trazado de cuencas oficial de la DGA se muestra en la Figura 4-1.

Como se observa, en general el trazado es similar; la mayor diferencia se presenta al sur de la cuenca del río Toltén, donde el procedimiento en base al uso del modelo de terreno no genera la subdivisión de la cuenca, dejando fuera la delimitación de la cuenca Río Queule definida por la DGA.

En cuanto a las subcuencas, en la zona del lago Villarrica el procedimiento no delimita la cuenca del lago, esto debido a las especificaciones técnicas del proceso.

Dada las pocas diferencias resultantes entre las cuencas trazadas y las definidas por la DGA; y dado que el área de estudio definida considera la cuenca del Río Queule, es que se decide hacer el análisis del sistema de drenaje en base a la delimitación oficial de la DGA.

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.

De acuerdo a la configuración hidrográfica, las cuencas del río Toltén y del río Imperial están subdivididas en subcuencas, las que se grafican en la Figura 4-2, con su respectivo código DGA. Se muestra además la ubicación del centro de gravedad de las cuencas y subcuencas.

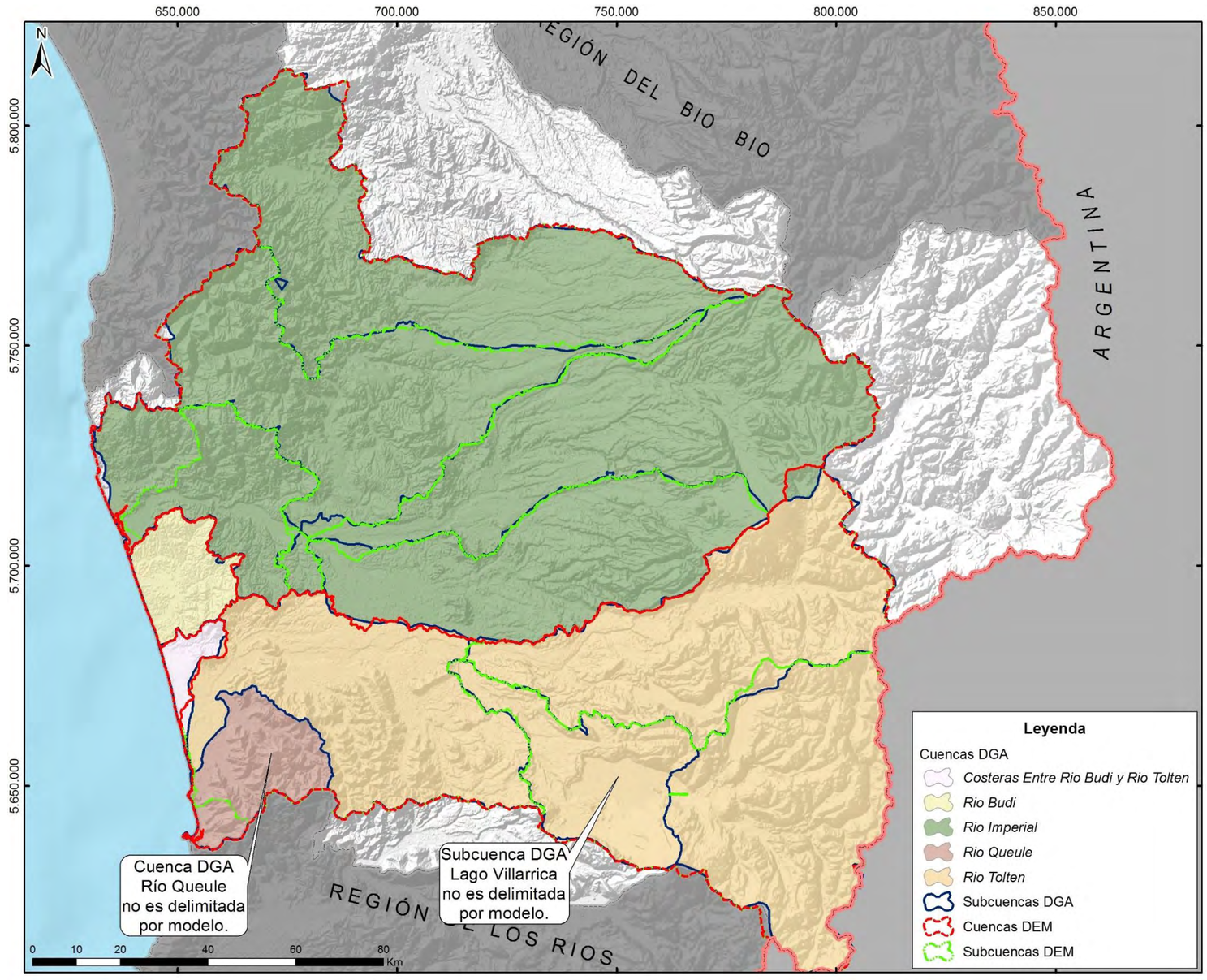


Figura 4-1: Cuencas delimitadas por modelo (DEM) y Cuencas definidas por DGA

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

Área (km^2) en bandas de elevación (msnm)	**Río Imperial (Código DGA 091)**	**Río Toltén (Código DGA 094)**
0 - 500	8.972,1	4.448,3
500 - 1000	2.508,8	1.537,2
1000 – 1500	853,3	1.775,8
1500 – 2000	271,6	617,7
2000 - 2500	33,2	57,2
2500 - 3000	5,1	6,6
3000 - 3500	0,2	1,3
3500 - 4000	--	0,1
Área Total (km^2)	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

Área (km^2) en bandas de elevación (msnm)	**Río Queule (Código DGA 095)**	**Río Budi (Código DGA 092)**	**Costeras entre Río Budi y Río Toltén (Código DGA 093)**
0 – 200	410,4	454,7	152,9
200 – 400	191,1	40,2	8,4
400 – 600	81,7	0,06	--
600 – 800	10,7	--	--
800 - 1000	0,02	--	--
Área Total (km^2)	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

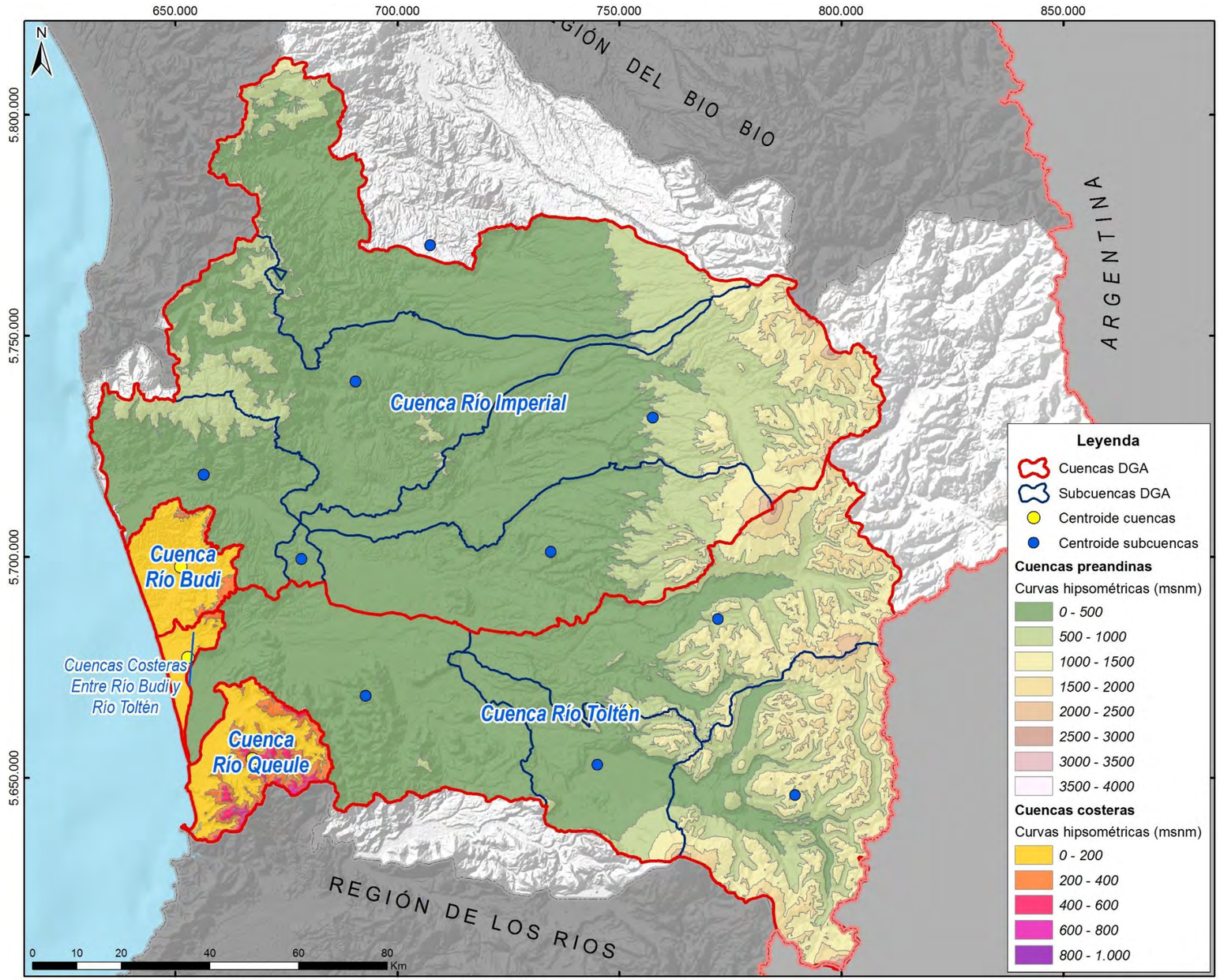


Figura 4-2: Curvas hipsométrica cuencas de estudio

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

4.1.1 Cuenca del río Imperial

La cuenca del río Imperial abarca una superficie de 12.652,9 km^2 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 (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.

Tabla 4-3: Características morfológicas Subcuencas de Río Imperial

Información	**Subcuencas Río Imperial**					
	Río Lumaco	**Río Cholchol**	**Cautín Alto (hasta antes junta río Quepe)**	**Río Quepe**	**Río Cautín entre río Quepe y río Cholchol**	**Río Imperial**
Código DGA	0910	0911	0912	0913	0914	0915
Área (km^2)	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)

A continuación se presenta una descripción del sistema de drenaje para cada subcuenca, las cuales se muestran en la Figura 4-3.

a) Subcuenca Río Lumaco

Esta subcuenca se localiza al norte de la cuenca del río Imperial. El nacimiento del río Lumaco se produce por los aportes provenientes de la Cordillera de Nahuelbuta, principalmente del río Purén, y escurre hacia el sur. En la vertiente oeste de la Cordillera de los Andes nacen los ríos Traiguén y Quino, los cuales confluyen en la Cordillera de La Costa dando origen al río Colpi o Pangueco, el cual, aguas abajo, tributa al río Lumaco.

b) Subcuenca Río Cholchol

El río Cholchol recibe afluentes que provienen tanto desde el este, nacientes en la Cordillera de los Andes, como del norte y oeste, nacientes en la Cordillera de la Costa.

El río Cholchol nace de la confluencia de los ríos Lumaco (de dirección norte-sur) y Quillén (de dirección este-oeste). Continúa el río Cholchol en dirección sur, para recibir los aportes del río Repocura, naciente de la cordillera de la Costa. Antes de su confluencia con el río Cautín, el río Cholchol cambia bruscamente de dirección a este-oeste, para finalmente, en Nueva Imperial y junto al río Cautín, dar origen al río Imperial.

c) Subcuenca Cautín Alto (hasta antes junta río Quepe)

El río Cautín nace en la vertiente este del volcán Lonquimay. Aguas abajo recibe los aportes de otros ríos principales, como ocurre en la Precordillera con los ríos Dillo (al oeste de Curacautín) y Rariruca, de flujo NE-SW, y en la Depresión Intermedia con los ríos Peupeu y Collín. El río Collín nace al norte de las faldas del volcán Llaima y recibe en su transcurso hacia el oeste, el aporte de los ríos Trueno y Muco. Cuando atraviesa la unidad morfoestructural volcanitas de Ñielol-Pilmahue, el río Cautín se desvía de su curso, en dirección sur.

d) Subcuenca Río Cautín entre río Quepe y río Cholchol

Al oeste de la unidad morfoestructural volcanitas de Ñielol-Pilmahue, el río recibe el aporte de las aguas del río Quepe, para luego, en Nueva Imperial, unirse al río Cholchol y dar nacimiento al río Imperial.

e) Subcuenca Río Quepe

El río Quepe nace de la confluencia de los ríos Calbuco y Lleuque, ambos nacientes de la vertiente occidental del volcán Llaima. Aguas abajo de su recorrido hacia el oeste, recibe los aportes del río Vilcún desde el norte y los ríos con flujo SE-NW Codihue y Huichahue, nacientes de la Cordillera de los Andes, y finalmente tributa al río Cautín.

f) Subcuenca Río Imperial

El río Imperial nace en la vertiente este de la cordillera de la Costa, en la confluencia de los ríos Cautín proveniente del oriente y Cholchol que llega del norte. Antes de su desembocadura en Puerto Saavedra, el río Imperial es tributado por el río Moncul en Nehuentue, que nace de la laguna Trovolhue y es alimentado por el río Puyanhue, ambos nacientes de la Cordillera de la Costa.

4.1.2 Cuenca del río Toltén

La cuenca del río Toltén presenta una superficie total de 8.446,5 km^2. 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.

De acuerdo a la DGA, esta cuenca se subdivide en 4 subcuencas (Tabla 4-4), las cuales se describen a continuación.

Tabla 4-4: Características Subcuencas de Río Toltén

Información	Subcuencas Río Toltén			
	Río Allipén	Río Pucón	Lago Villarrica y Toltén Alta	Toltén Bajo
Código DGA	0940	0941	0942	0943
Área (km^2)	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 centro de gravedad (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)

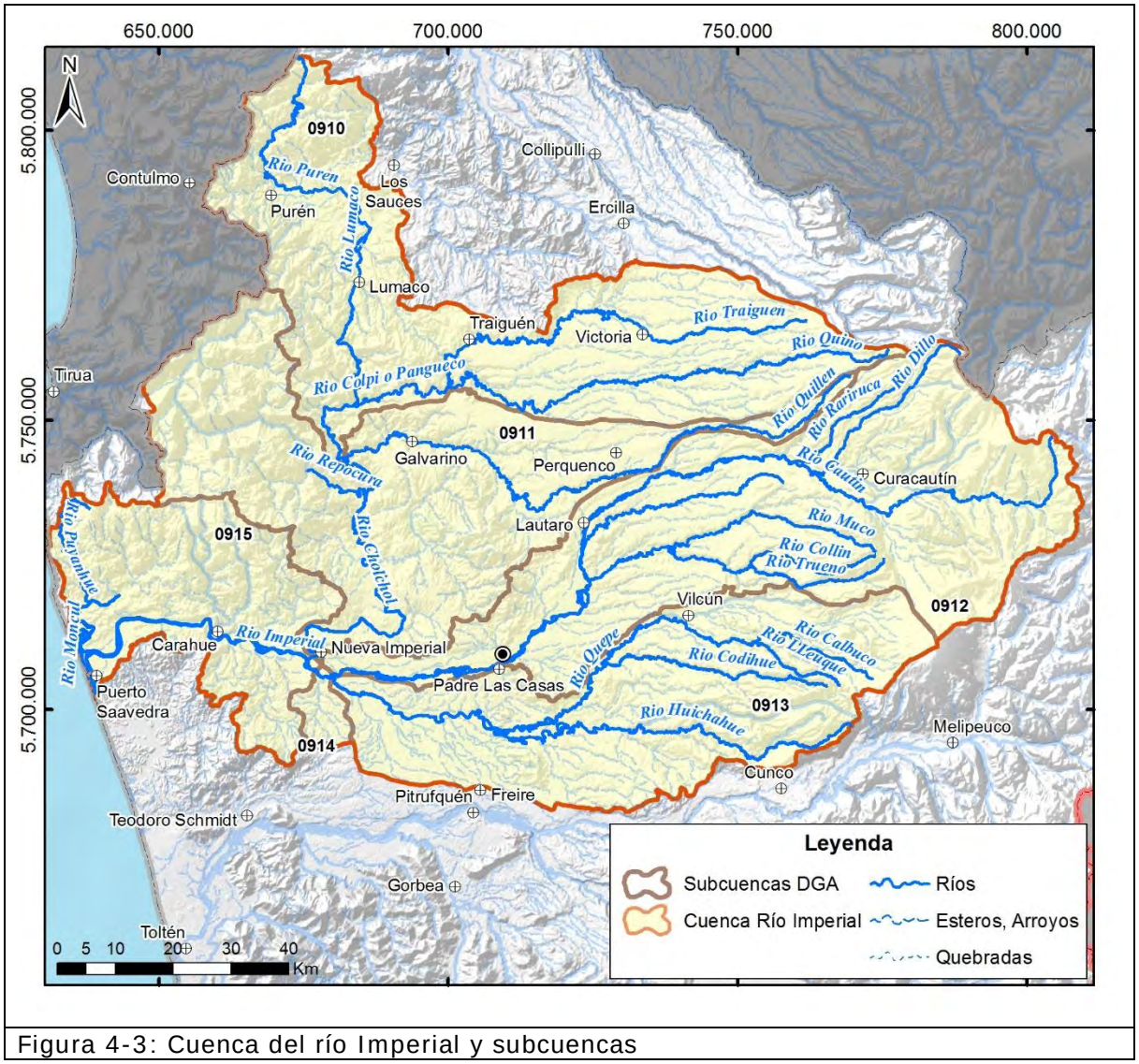


Figura 4-3: Cuenca del río Imperial y subcuencas

a) Subcuenca Río Allipén

El río Allipén nace en la vertiente sureste del volcán Llaima. Es tributado por importantes ríos a lo largo de su recorrido, entre los que se encuentran: Llaima, El Manzano, Curacalco y Negro, todos nacientes en la cordillera de los Andes. Aguas abajo, el río Allipén es tributado por el río Curaco, el cual nace del desagüe del lago Colico. Este lago es alimentado, principalmente, por el río Trafampulli.

b) Subcuenca Río Pucón

Hacia el sur de la cuenca del río Toltén, la mayor parte del drenaje naciente en la Cordillera de los Andes es canalizado por el río Pucón o Minetué, el cual finalmente desemboca en el lago Villarrica. Otro río que alimentan superficialmente al lago Villarrica es el río Claro.

El río Pucón nace de la confluencia de los ríos Maichín y Trancura. El río Maichín nace desde la vertiente este del volcán Sollipulli y sigue un curso en dirección norte-sur para luego, cambiar de rumbo a este-oeste, recibiendo los aportes del río Huirinil, antes de su confluencia con el río Trancura. El río Trancura nace en la vertiente oeste del volcán Lanín, que es el punto más meridional de la zona de estudio. Aguas abajo, este río recibe los aportes de los ríos Puesco y Caren.

El río Pucón sigue un curso E-W a SE-NW, y recibe otros importantes tributarios en su trayecto hacia el lago Villarrica. Por su vertiente norte, recibe los aportes del río Pangui y el río Liucura. Este último recibe como tributario al río Caburga, el cual desagua al lago homónimo. Por su vertiente sur, el río Pucón recibe los aportes del río Panguil (naciente en la vertiente oeste del volcán Quetrulillán) y del río Turbio (naciente de la vertiente norte del volcán Villarrica).

c) Subcuenca Lago Villarica y Toltén Alta

En esta subcuenca se localiza el Lago Villarrica, cuya superficie asciende a los 173 km^2. Tiene aporte superficial proveniente, principalmente, del río Pucón, río Claro, río Quilque, y numerosos cursos por su ribera sur que se generan en la falda noroeste del volcán Villarrica. En el extremo poniente del lago nace el río Toltén, el cual sigue un curso noroeste, 43 km. hasta la confluencia con el río Allipén. En su trayecto recibe los aportes de los ríos Voipir, el cual nace desde la vertiente noroeste del volcán Villarrica, y transcurre en dirección SE-NW, y Pedregoso, proveniente desde el este, en dirección oeste.

d) Subcuenca Toltén Bajo

Desde la confluencia con el río Allipén, el río Toltén continúa primero en dirección oeste recibiendo los aportes del drenaje naciente en la Cordillera de la Costa, tales como los ríos Donguil y Quinque, y luego continua hacia el suroeste en su trayecto hacia el mar, desembocando en el mar al norte de la punta Nilhue.

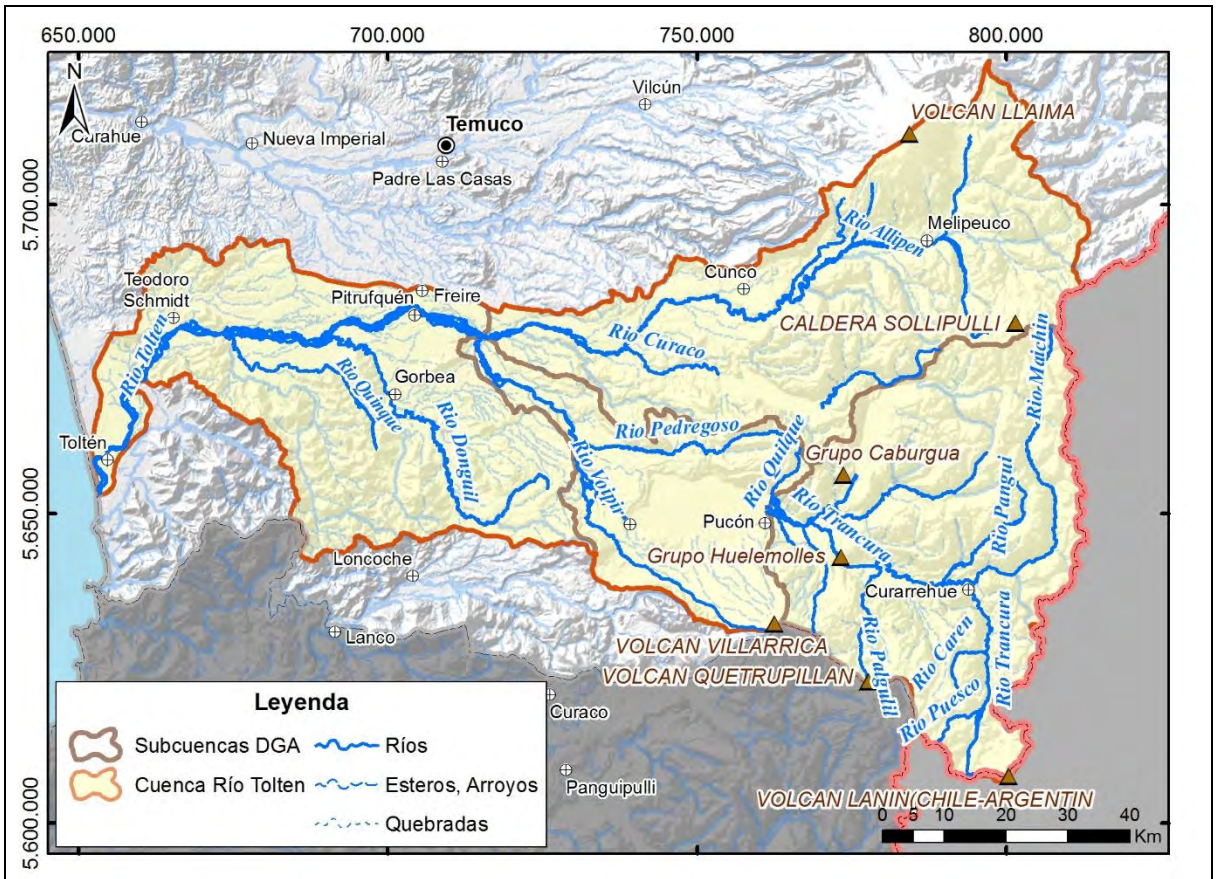


Figura 4-4: Cuenca Río Toltén y subcuencas

4.1.3 Cuenca del río Budi

La cuenca del río Budi corresponde a una cuenca de tipo costera, exorreica (Figura 4-5). Se desarrolla al sur de la subcuenca Río Imperial, y su superficie asciende a 494,9 km^2, de la cual el 13% lo ocupa el lago Budi (64 km^2).

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 salubres, 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.

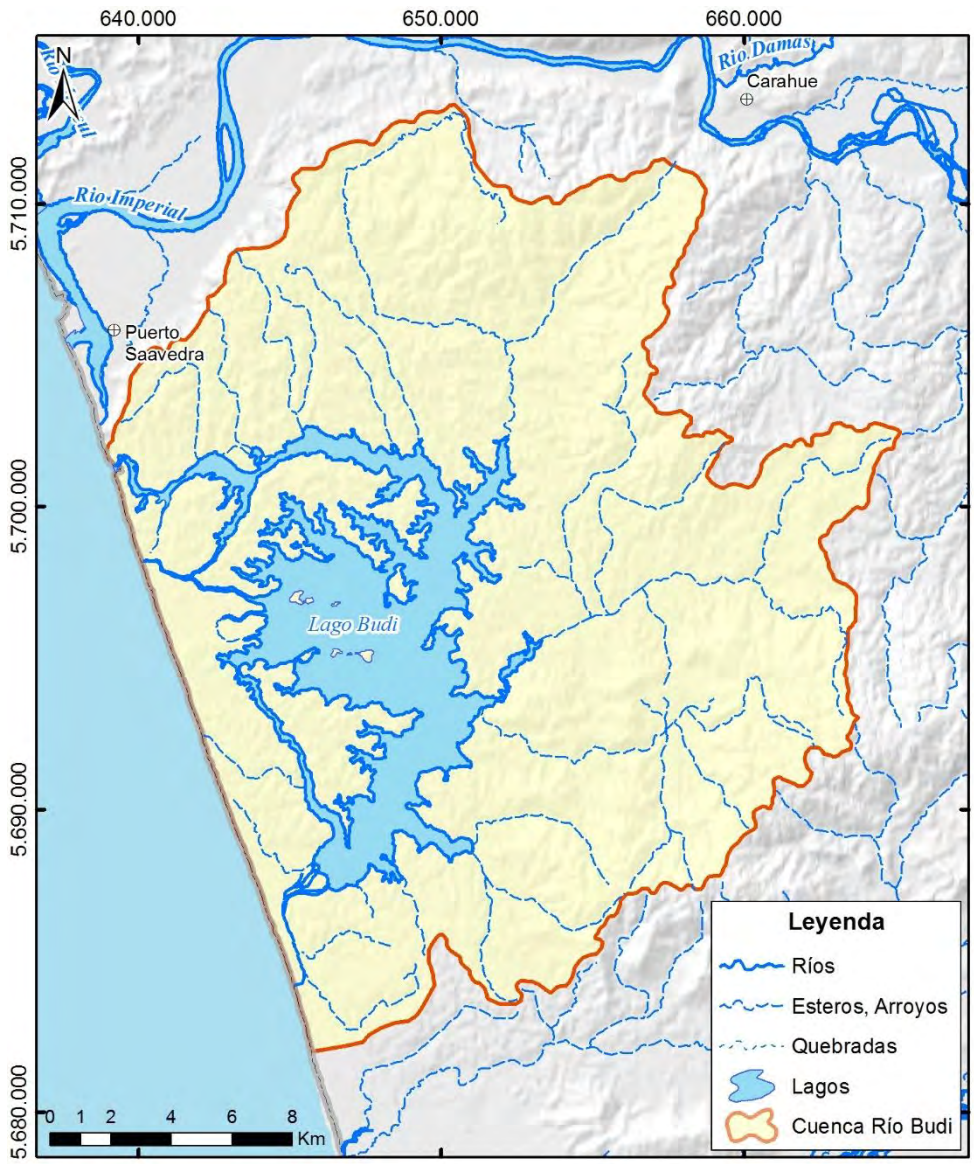


Figura 4-5: Cuenca Río Budi

4.1.4 Cuenca Costera entre río Budi y río Toltén

Esta cuenca presenta un área de 161,4 km^2 y corresponde a una cuenca de tipo costera, exorreica (Figura 4-6). Se conforma por el drenaje naciente de la Cordillera de la Costa, en donde destacan, 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.

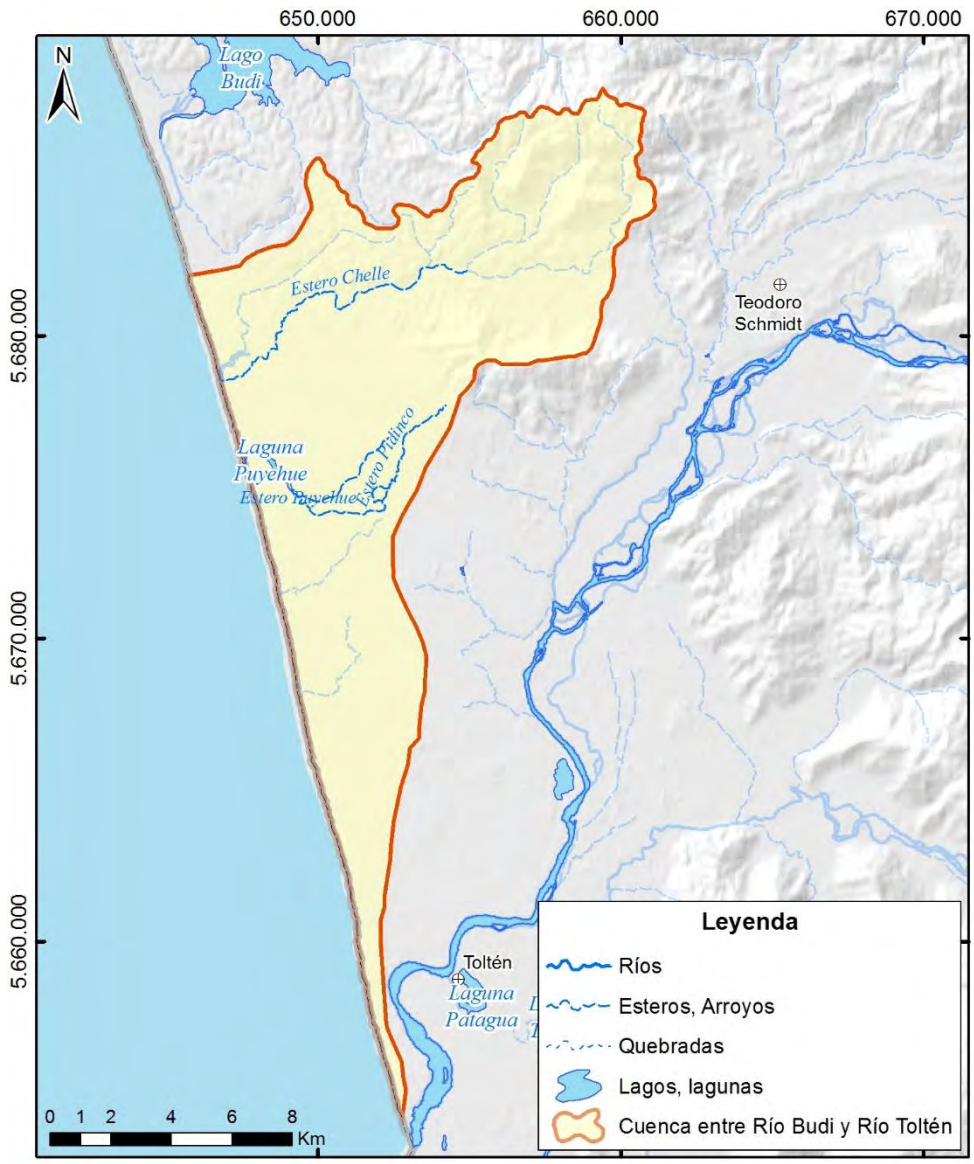


Figura 4-6: Cuenca costera entre Río Budi y Río Toltén

4.1.5 Cuenca río Queule

Esta cuenca se desarrolla al sur del curso inferior del río Toltén. Presenta un área de 693,8 km^2 y corresponde a una cuenca de tipo costera, exorreica (Figura 4-7). 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 nacientes 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)

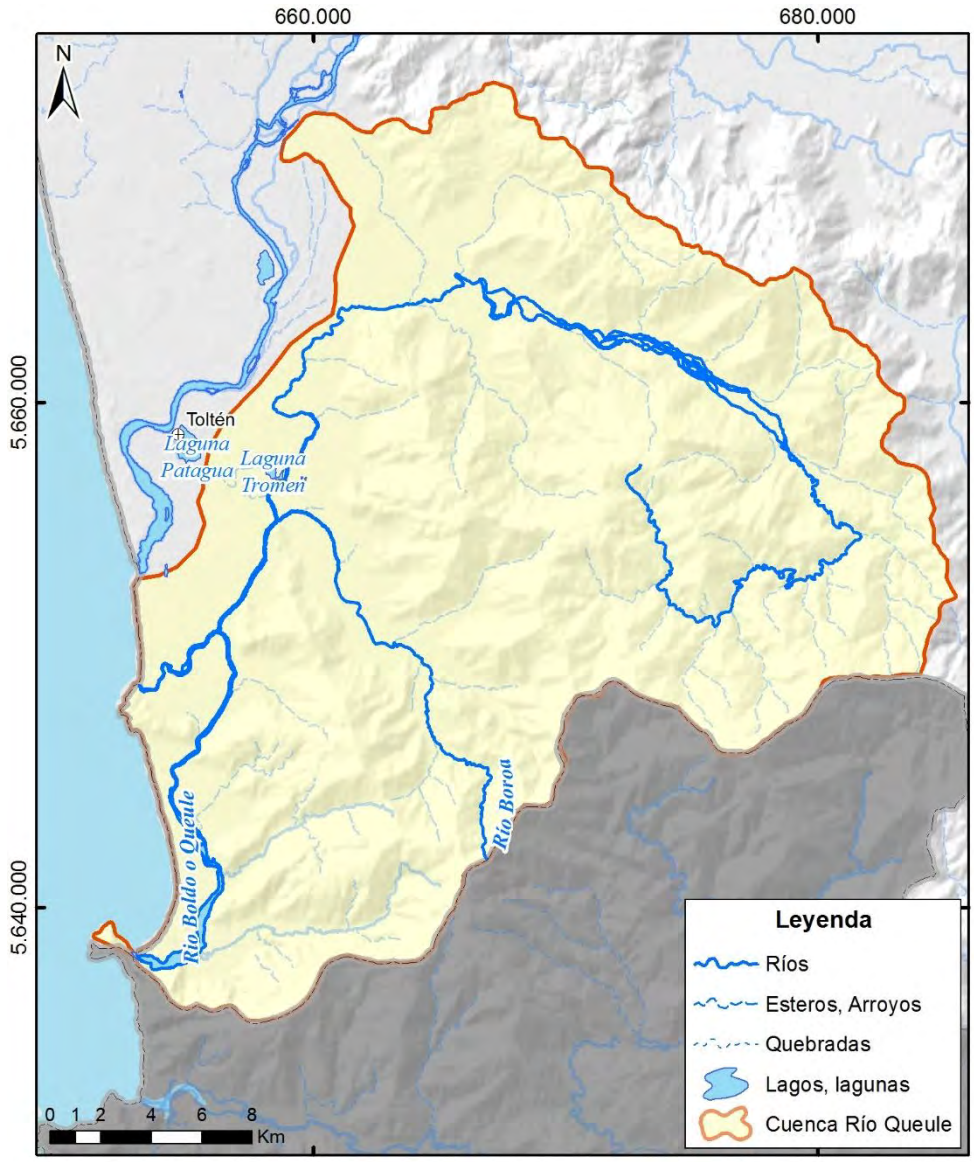


Figura 4-7: Cuenca Río Queule

4.2 CARACTERIZACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE LAS CUENCAS

El objetivo del análisis pluviométrico es contar con un conocimiento de la lluvia en la región, ya que ella es la fuente principal de la recarga. Ello implica estar en condiciones de poder conocer o estimar en cualquier lugar del área en estduio, el valor de la precipitación mensual, estacional y anual. Lo anterior implica contar con una estimación de los estadísticos principales del valor mensual, estacional y anual; el

modelo probabilístico que representa la precipitación adecuadamente; las precipitaciones asociadas a distintas probabilidades; las relaciones para estimar la precipitación en puntos sin registros y la variación espacial y temporal de la precipitación. Para ello se realiza una carcaterización pluviométrica tomando en consideración los registros observados en las distintas estaciones pluviométricas de la región, en particular de aquellas emplazadas en las cuencas de los ríos Imperial, Toltén y las cuencas costeras de la región.

A continuación se presentan las características de las estaciones que cuentan con datos disponibles de precipitaciones, a nivel mensual, en la región. Asimismo se presenta el relleno y análisis de información para disponer de series de precipitaciones más extensas. Finalmente se presenta un análisis estadístico e hidrológico de las series anuales, estacionales y mensuales.

4.2.1 Estaciones pluviométricas seleccionadas

En la cuenca de la región de La Araucanía existe un total de 76 estaciones pluviométricas (67 controladas por la DGA y 9 controladas por la Dirección Meteorológica de Chile-DMC), las cuales se encuentran ampliamente distribuidas espacialmente en toda la región.

Del total de estaciones disponibles, se seleccionaron 47 estaciones en base a los siguientes criterios:

- Se consideraron aquellas estaciones con más de 120 datos mensuales registrados (10 años). Bajo este criterio se seleccionaron 47 estaciones controladas por la DGA y tres (3) estaciones controladas por la DMC (Temuco Maquehue, Los Sauces Sendos y Lautaro Sendos).
- En caso de contar con más de dos estaciones cercanas, se utilizará aquella que cuente con mayor registro de datos. En este sentido no fueron consideradas las tres estaciones de la DMC, ya que se encuentran ubicadas en las cercanías y a alturas similares de las estaciones DGA Pueblo Nuevo (Temuco), Lumaco y Lautaro, que poseen un registro más completo.

Las características principales de las estaciones pluviométricas seleccionadas se indican en la Tabla 4-5. Los registros originales de las estaciones seleccionadas se presentan en el Anexo C.1.

Tabla 4-5: Características de las estaciones pluviométricas seleccionadas.

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altura msnm	Registro	Estado
P1	Liucura	08301001-0	5.719.729	317.952	1.030	1987-2013	V
P2	Lonquimay	08304004-1	5.741.698	292.831	920	1987-2013	V
P3	Encimar Malleco	08343002-8	5.779.031	752.815	520	1988-2013	V
P4	Laguna Malleco	08350002-6	5.766.299	253.643	890	1955-2013	V
P5	Collipulli	08351003-K	5.795.611	726.185	240	1962-2011	NV
P6	Ercilla (Vida Nueva)	08353001-4	5.785.997	722.382	250	1991-2013	V
P7	Angol (La Mona)	08358002-K	5.815.957	708.089	101	1974-2012	V
P8	El Vergel (Angol)	08358003-8	5.811.793	706.858	75	1981-1995	NV
P9	Tranaman	09101003-8	5.792.197	675.586	100	1988-2013	V
P10	Lumaco	09102003-3	5.775.356	684.039	70	1948-2013	V
P11	Las Mercedes (Victoria)	09104003-4	5.764.800	733.411	350	1984-2013	V
P12	Traiguén	09105002-1	5.763.093	705.310	234	1979-2013	V
P13	Quillén	09111002-4	5.739.028	725.024	250	1959-2013	V
P14	Perquenco	09112000-3	5.744.131	728.954	290	2002-2013	V
P15	Galvarino	09113003-3	5.745.912	694.073	40	1979-2013	V
P16	La Cabaña	09114001-2	5.737.816	653.420	625	1989-2013	V

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altura msnm	Registro	Estado
P17	Cholchol	09116002-1	5.724.905	687.611	20	1987-2008	NV
P18	Manzanar	09120002-3	5.739.282	264.487	790	1972-1987	NV
P19	Malalcahuello	09120003-1	5.738.790	275.321	950	1988-2013	V
P20	Curacautín	09122001-6	5.740.486	247.246	535	1970-2013	V
P21	Rari Ruca	09123002-K	5.742.723	760.982	440	1991-2013	V
P22	Lautaro	09124001-7	5.733.493	722.130	200	1953-2013	V
P23	Cerro Ñielol	09129004-9	5.710.546	709.263	175	1974-1988	NV
P24	Pueblo Nuevo (Temuco)	09129005-7	5.712.188	712.521	119	1953-2013	V
P25	Cherquenco	09130001-K	5.713.957	760.965	500	1987-2013	V
P26	Vilcún	09131002-3	5.716.447	740.671	290	1965-2013	V
P27	Freire	09135002-5	5.685.420	706.191	100	1939-1972	NV
P28	Freire Sendos	09135003-3	5.684.961	707.239	100	1981-2013	V
P29	Carahue	09151001-4	5.713.395	661.071	77	1992-2012	V
P30	Puerto Saavedra	09153001-5	5.705.383	639.523	5	1979-2013	V
P31	Tricauco	09401001-2	5.696.644	278.701	520	1988-2013	V
P32	Cunco	09403001-3	5.687.012	758.995	380	1970-2013	V
P33	Los Laureles	09404002-7	5.684.015	742.581	260	1939-2013	V
P34	Quecheregua	09404003-5	5.678.994	754.035	360	1970-2013	V
P35	Curarrehue	09412002-0	5.640.252	278.177	420	1976-2013	V
P36	Puesco (Aduana)	09412003-9	5.622.434	280.981	620	1987-2013	V
P37	Llafenco	09414002-1	5.642.612	257.929	360	1965-2013	V
P38	Lago Tinquilco	09416002-2	5.661.122	264.731	850	1992-2013	V
P39	Lago Caburga	09417001-K	5.657.195	257.428	480	1976-2013	V
P40	Pucón	09420002-4	5.648.450	245.489	230	1984-2013	V
P41	Villarrica	09420003-2	5.655.795	733.836	210	1961-2013	V
P42	Chanlelfu	09420004-0	5.625.394	737.898	345	1987-2013	V
P43	Quitratue	09433003-3	5.663.812	703.055	90	1961-2013	V
P44	Teodoro Schmidt	09438001-4	5.678.310	666.373	13	1989-2013	V
P45	Toltén	09439001-K	5.659.350	655.412	5	1994-2013	V
P46	Lican-Ray	10106003-9	5.627.369	743.868	275	1992-2013	V
P47	Loncoche	10130001-3	5.639.435	703.164	120	1990-2013	V

[Fuente: DGA]; *WGS-84.
V: Vigente
NV: No Vigente

La Figura 4-8 presenta un resumen de la disponibilidad histórica de estadísticas de precipitación mensual en las estaciones pluviométricas DGA a partir de 1940 a la fecha. Sólo las estaciones Freire y Los Laureles poseen registros pluviométricos desde 1939.

La red ha ido creciendo constantemente en el tiempo, instalándose la última estación en el año 2010. Se observa que la mayoría de las estaciones no tienen su información completa entre los meses de mayo 2010 y julio 2012. Algunas estaciones presentan series de datos largas con más de 50 años, mientras que otras tienen 10 años con registros. Del total hay 20 estaciones que tienen más de 30 años con registros y 8 tienen más de 50 años.

Fueron considerados los datos mensuales cuyo registro se efectuó por más de 20 días al mes. De esta forma se eliminaron los registros con menos de 20 días ya que podrían no haber registrado eventos importantes de precipitaciones en los días faltantes.

La Figura 4-9 muestra la distribución espacial de las estaciones. Se observa que las estaciones se encuentran bien distribuidas espacialmente. Es posible observar que 8 estaciones se ubican al norte y este de la cuenca del río Imperial (Desde la estación Liucura (P1) hasta la estación El Vergel (Angol) (P8)) y tres se ubican al sur de la cuenca del río Toltén (Las estaciones Chanlelfu (P42), Lican-Ray (P46) y Loncoche (P47)).

N	Estación	1940-1949	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	10-13
P1	Liucura								
P2	Lonquimay								
P3	Encimar Malleco								
P4	Laguna Malleco								
P5	Collipulli								
P6	Ercilla (Vida Nueva)								
P7	Angol (La Mona)								
P8	El Vergel (Angol)								
P9	Tranaman								
P10	Lumaco								
P11	Las Mercedes (Victoria)								
P12	Traiguén								
P13	Quillén								
P14	Perquenco								
P15	Galvarino								
P16	La Cabaña								
P17	Cholchol								
P18	Manzanar								
P19	Malalcahuello								
P20	Curacautín								
P21	Rari Ruca								
P22	Lautaro								
P23	Cerro Ñielol								
P24	Pueblo Nuevo (Temuco)								
P25	Cherquenco								
P26	Vilcún								
P27	Freire								
P28	Freire Sendos								
P29	Carahue								
P30	Puerto Saavedra								
P31	Tricauco								
P32	Cunco								
P33	Los Laureles								
P34	Quecheregua								
P35	Curarrehue								
P36	Puesco (Aduana)								
P37	Llafenco								
P38	Lago Tinquilco								
P39	Lago Caburga								
P40	Pucón								
P41	Villarrica								
P42	Chanlelfu								
P43	Quitratue								
P44	Teodoro Schmidt								
P45	Toltén								
P46	Lican-Ray								
P47	Loncoche								

Figura 4-8. Disponibilidad de datos en estaciones pluviométricas con registros de precipitación mensual (Azul: 12 datos, Rojo: entre 10 y 11 datos, Verde: entre 7 y 9 datos, Amarillo: entre 1 y 6 datos por año).

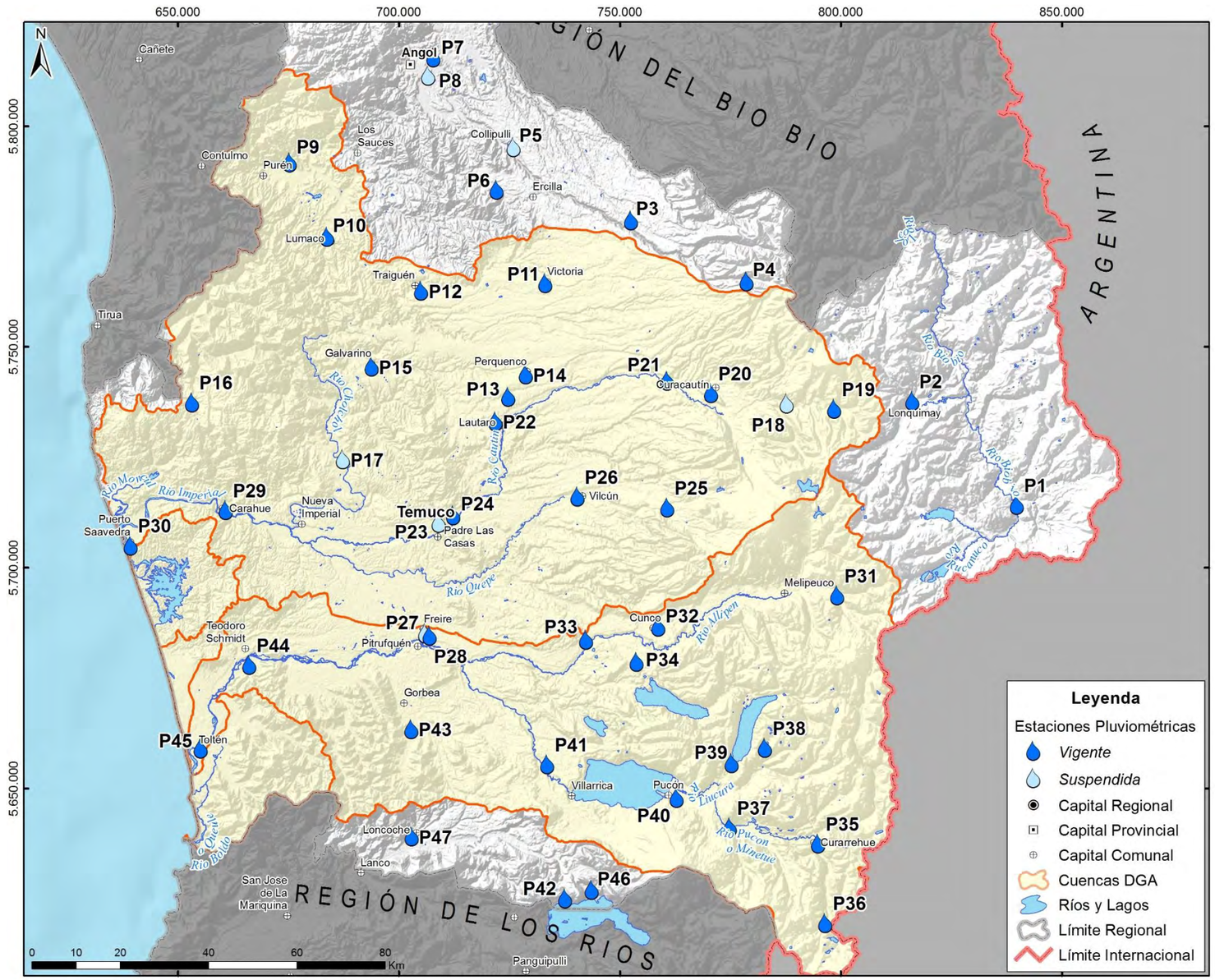


Figura 4-9. Distribución estaciones pluviométricas con registros de precipitación mensual seleccionadas

4.2.2 Corrección y relleno de estadísticas pluviométricas

a) Análisis de consistencia de precipitaciones anuales

Se analizó la consistencia de las series de datos anuales en cada estación utilizando el método de los residuos acumulados. Este método es un procedimiento establecido para detectar fallas en la homogeneidad en el tiempo, mediante la comparación de las mediciones con un registro patrón. Para ello se controlan los residuos o errores acumulados de la correlación existente entre una serie cronológica y una serie testigo o patrón, siendo los residuos las diferencias entre el valor observado y el predicho con una regresión lineal a partir de la estación patrón.

Si una estación tiene consistencia con el patrón, significa que los eventos ocurridos en ambas estaciones varían de forma homogénea en el tiempo. La consistencia con el patrón se verificó al comparar gráficamente la magnitud de los residuos acumulados con una elipse que muestra los límites permitidos para los residuos. Estos límites se calculan al considerar una distribución normal para los residuos acumulados y una probabilidad de cometer error de tipo I de 95%. Esto significa que en promedio el 5% de los eventos que salgan fuera de la elipse (indicando falta de homogeneidad) provienen igualmente de una serie homogénea.

El patrón se escoge eligiendo una estación cuyos registros sean confiables. En el presente estudio se seleccionaron como patrón estaciones con registros largos y con alta correlación espacial con las estaciones de la cuenca. Las estaciones patrón seleccionadas fueron la estación Lautaro (P22) para las estaciones Laguna Malleco (P4), Curacautín (P20), Rari Ruca (P21), Cunco (32) y Los Laureles (P33); Llafenco (37) para la estación Curarrehue (P35) y Los Laureles (P33) para el resto de las estaciones.

La Figura 4-10 muestra las estaciones que no presentaron consistencia con el patrón en una cantidad significativa de datos anuales, según el método de los residuos acumulados. La estación es Curacautín (P20). El límite de la elipse se construyó con una probabilidad de cometer error de tipo I de 95%.

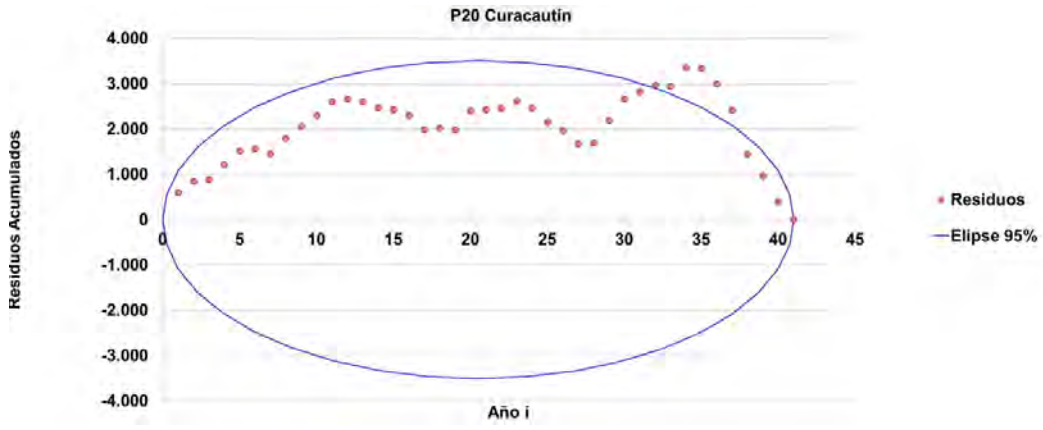


Figura 4-10. Estaciones que presentaron problemas de consistencia según método de la elipse para las series de precipitaciones anuales.

Se corrigieron todos los datos del año 2009 y del mes de mayo de 2010 para la estación Curacautín, logrando que la estadística sea consistente con el patrón seleccionado. El Anexo C.2 muestra los resultados del método de los residuos acumulados en las estaciones pluviométricas.

b) Relleno de precipitaciones mensuales faltantes

Con el objetivo de poder considerar al menos 50 años de registros para el análisis de las condiciones hidrológicas de la cuenca, fue necesario completar la estadística disponible rellenando los datos faltantes. Para ello se usaron los datos obtenidos de la DGA y se rellenó con series que poseen un número importante de datos, mediante regresiones de las series de datos mensuales completas, sin hacer diferencia entre un mes y otro. La estación utilizada para rellenar en cada caso se eligió de entre las estaciones con buena correlación, que posean un alto número de datos y que estén a menos de 50 km de distancia a la estación rellenada.

Se buscaron valores anómalos en las series de datos originales con el objetivo de chequear la validez de la serie. Estos valores anómalos se definen como un valor que supere al promedio en 6 veces la desviación estándar. Bajo este criterio se encontraron 2 valores anómalos en las series de precipitaciones de las estaciones Liucura (P1) y Galvarino (P15) en el mes de junio del 2000. En esta fecha ocurre la máxima precipitación en varias estaciones, por lo que el valor anómalo corresponde a una tormenta importante, y no a un error de anotación.

Para realizar el relleno de forma correcta y mantener las propiedades estadísticas de la serie a rellenar se usó la siguiente ecuación (Fernández y Salas, 1995)[2] :

$$y_t = a + b \cdot x_t + \alpha \cdot \sqrt{1 - R^2} \cdot \sigma_y \cdot \varepsilon_t$$

Ecuación 4-1

Donde,

y_t = *Valor estimado en el periodo t para la variable a rellenar.*

x_t = *Valor disponible en el periodo t de la variable independiente.*

a = *Constante de la recta de regresión.*

b = *Coeficiente de regresión.*

R^2= *Coeficiente de determinación de la regresión.*

$\alpha = \dfrac{N_1 \cdot (N_1 - 4) \cdot (N_1 - 1)}{(N_2 - 4) \cdot (N_1 - 3) \cdot (N_1 - 2)}$ *Coeficiente para considerar el sesgo por pocos datos.*

N_1= *Número de datos comunes disponibles en ambas series.*

N_2= *Número de datos a rellenar.*

σ_y= *Desviación estándar de la serie a rellenar.*

ε_t= *Error o residuo (Variable aleatoria Normal con media 0 y varianza 1).*

[2] Fernández, B. y J.D. Salas, 1995. Transferencia de Información Hidrológica pro Correlación. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, SOCHID, Vol. 10 N1, págs. 22 a 33.

Las estadísticas básicas de las regresiones mensuales se resumen en la Tabla 4-6. Las estaciones con más de 600 datos mensuales (50 años) no fueron rellenadas porque poseen un número importante de datos en el registro original.

Tabla 4-6: Características de las relaciones de precipitaciones mensuales para el relleno de datos faltantes.

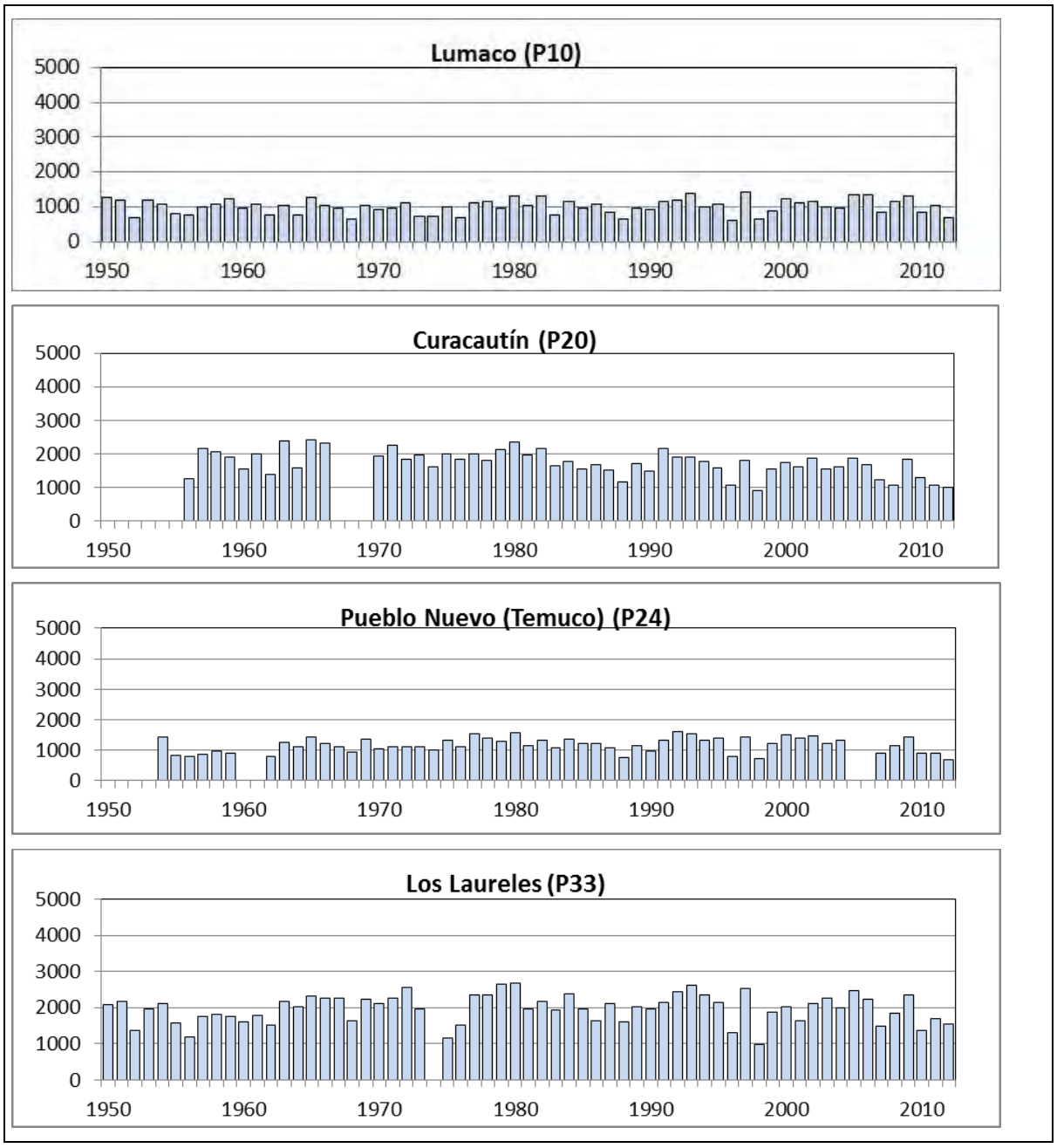
No.	Estación a rellenar	Estación que rellena	a	b	R^2	N_1	N_2	ΔS (%)
P1	Liucura	Laguna Malleco	-2,33	0,31	0,67	255	353	2,51
P2	Lonquimay	Laguna Malleco	2,04	0,52	0,75	272	347	6,97
P3	Encimar Malleco	Laguna Malleco	5,57	0,69	0,89	265	358	6,58
P5	Collipulli	Lumaco	10,59	1,17	0,81	527	203	0,04
P6	Ercilla (Vida Nueva)	Collipulli	11,70	0,95	0,95	131	416	1,10
P7	Angol (La Mona)	Collipulli	-12,29	0,99	0,91	336	197	0,58
P8	El Vergel (Angol)	Collipulli	-8,19	0,72	0,89	169	376	1,16
P9	Tranaman	Lumaco	3,86	0,87	0,96	286	459	9,82
P11	Las Mercedes (Victoria)	Lumaco	25,96	1,16	0,87	314	430	6,09
P12	Traiguén	Lumaco	10,28	0,87	0,94	397	345	6,53
P14	Perquenco	Lumaco	24,60	0,90	0,89	127	625	6,69
P15	Galvarino	Lumaco	8,71	0,79	0,92	390	346	5,98
P16	La Cabaña	Lumaco	16,98	1,52	0,89	281	464	7,46
P17	Cholchol	Lumaco	17,10	0,73	0,88	257	489	10,90
P18	Manzanar	Curacautín	25,51	1,08	0,83	180	321	9,38
P19	Malalcahuello	Curacautín	26,55	1,19	0,77	285	218	3,89
P20	Curacautín	Laguna Malleco	32,43	0,45	0,76	458	164	2,48
P21	Rari Ruca	Vilcún	3,35	0,87	0,83	242	331	1,82
P23	Cerro Ñielol	Pueblo Nuevo (Temuco)	5,52	0,93	0,94	168	531	8,22
P25	Cherquenco	Vilcún	6,86	1,30	0,93	297	273	0,72
P26	Vilcún	Pueblo Nuevo (Temuco)	15,04	1,22	0,86	560	132	1,60
P27	Freire	Los Laureles	-1,95	0,79	0,88	257	488	9,81
P28	Freire Sendos	Pueblo Nuevo (Temuco)	-0,46	1,22	0,87	362	331	3,89
P29	Carahue	Puerto Saavedra	4,27	0,86	0,86	193	198	3,02
P30	Puerto Saavedra	Pueblo Nuevo (Temuco)	4,84	0,89	0,83	379	311	2,53
P31	Tricauco	Los Laureles	10,55	1,03	0,88	283	461	3,68
P32	Cunco	Los Laureles	16,43	0,81	0,73	464	266	5,27
P34	Quecheregua	Los Laureles	29,33	0,83	0,83	476	264	4,02
P35	Curarrehue	Llafenco	-5,50	0,76	0,87	430	133	3,57
P36	Puesco (Aduana)	Llafenco	-8,54	1,02	0,82	290	273	4,13
P37	Llafenco	Los Laureles	43,44	1,40	0,84	553	187	4,86
P38	Lago Tinquilco	Llafenco	-9,52	0,97	0,92	195	371	2,48
P39	Lago Caburga	Llafenco	-20,88	1,04	0,83	319	243	2,24
P40	Pucón	Llafenco	16,26	0,57	0,90	341	224	0,26
P42	Chanlelfu	Villarrica	11,92	1,07	0,88	297	309	4,21
P44	Teodoro Schmidt	Quitratue	11,24	0,60	0,78	277	321	0,13
P45	Toltén	Quitratue	50,77	0,76	0,83	212	392	1,77
P46	Lican-Ray	Quitratue	25,11	1,02	0,93	200	405	1,79
P47	Loncoche	Quitratue	12,51	0,85	0,85	228	375	4,52

[Fuente: Elaboración propia]

ΔS es el cambio porcentual de la desviación estándar antes y después de rellenar

Los valores de los coeficientes de determinación (R^2) son en general altos, lo que se traduce en regresiones adecuadas para rellenar los datos, con valores de R^2 mayores a 0,67. Los cambios porcentuales (en valor absoluto) de la desviación estándar antes y

después de rellenar (Δs) son en promedio de 4% (valor absoluto) y el mayor cambio porcentual ocurre en la estación Cholchol (P17), donde la desviación estándar pasa de 73 a 65. En el Anexo C.3 se muestra el detalle de las regresiones utilizadas para rellenar las estadísticas. La Figura 4-11 muestra las series de precipitaciones anuales de las estaciones usadas con mayor frecuencia para rellenar los datos en el presente estudio. Los años sin datos no se muestran en las series.



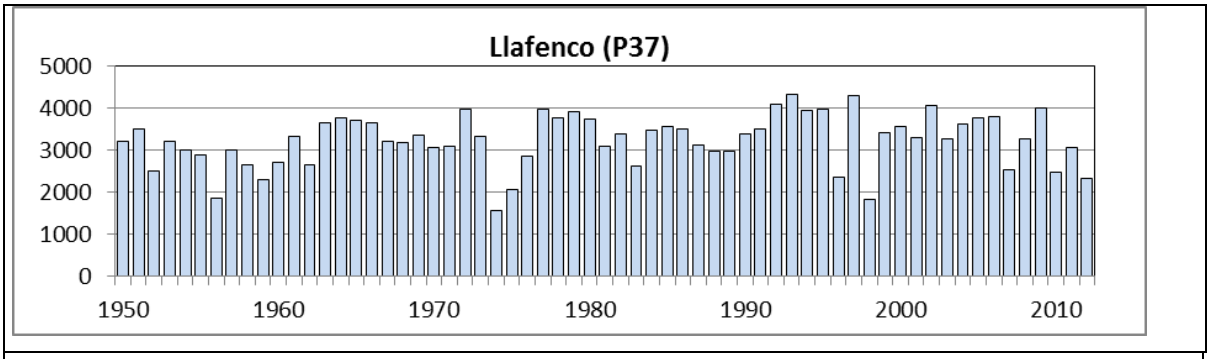


Figura 4-11. Series de Pp anual en estaciones más utilizadas para rellenar. (mm)

c) Precipitaciones rellenadas

Utilizando la Ecuación 4-1 y las relaciones de la Tabla 4-6 se realizó el relleno de los datos faltantes. La Tabla 4-7 resume los promedios de las series de precipitación ya rellenadas. Los resultados se presentan para cada mes, para las temporadas de invierno, verano y para el año hidrológico. Las estadísticas de temporadas se calcularon en los casos con 5 o más meses con información y las anuales con 10 o más de meses de información.

Tabla 4-7: Promedios de las series de precipitación (mm).

No.	AB	MA	JU	JU	AG	SE	OC	NO	DI	EN	FE	MA	IN	VE	AN	BHN
P1	71	139	189	136	110	71	67	42	42	26	25	29	703	230	937	-
P2	111	228	305	251	209	134	114	73	62	45	48	59	1220	389	1617	1943
P3	155	314	385	346	280	164	145	107	83	56	60	79	1645	511	2157	-
P4	225	469	541	476	387	240	215	149	113	82	69	93	2302	704	3043	2653
P5	81	216	243	227	165	99	79	52	41	36	29	40	1026	277	1302	1287
P6	91	208	246	224	170	108	95	64	49	34	36	43	1037	317	1355	-
P7	63	199	238	211	155	86	66	35	31	15	18	26	952	182	1144	-
P8	61	150	167	148	111	69	49	27	18	19	12	18	703	139	852	-
P9	65	152	169	153	121	73	53	37	27	21	18	29	729	185	914	-
P10	69	168	191	166	138	77	56	39	29	22	19	30	805	195	999	970
P11	103	220	253	223	191	123	94	71	60	46	42	60	1107	371	1477	1467
P12	67	157	177	156	134	76	63	48	35	26	26	33	764	229	993	1373
P13	93	187	206	185	151	101	87	61	50	36	34	44	917	309	1228	1267
P14	85	179	195	171	149	91	75	64	47	46	39	52	868	320	1188	-
P15	60	143	159	140	118	74	58	38	29	24	21	33	690	201	891	912
P16	114	258	311	274	239	140	106	78	64	47	51	62	1327	405	1732	-
P17	67	143	148	139	118	75	59	48	37	34	27	41	685	244	929	-
P18	157	318	344	285	230	186	186	130	111	74	87	78	1513	667	2183	2230
P19	180	328	398	311	248	164	179	142	137	74	86	104	1604	725	2329	2067
P20	128	253	297	238	202	143	122	96	92	58	48	69	1257	479	1737	2023
P21	97	200	260	220	168	119	114	76	72	52	53	60	1057	425	1482	-
P22	91	180	216	188	156	104	87	57	48	38	33	45	913	305	1220	1442
P23	84	161	191	168	141	97	78	58	51	44	37	46	833	314	1141	1267
P24	87	169	197	181	147	96	79	59	50	37	35	47	865	306	1169	1265
P25	157	313	392	326	263	183	170	118	109	71	76	87	1617	633	2249	2039
P26	118	226	265	241	197	136	123	81	78	52	54	57	1170	446	1618	1757
P27	110	237	248	225	190	122	113	76	60	46	43	59	1127	394	1521	1579
P28	104	199	258	218	172	120	94	56	63	50	38	61	1061	363	1420	-
P29	78	149	176	151	132	79	68	51	35	25	31	47	753	260	1007	-
P30	81	158	178	169	144	90	73	56	42	37	33	44	808	287	1094	1183

No.	AB	MA	JU	JU	AG	SE	OC	NO	DI	EN	FE	MA	IN	VE	AN	BHN
P31	165	307	348	307	271	172	158	111	97	79	63	89	1563	594	2157	-
P32	124	252	287	262	231	151	140	104	80	61	60	73	1293	519	1810	1977
P33	142	286	322	292	249	160	149	101	84	67	57	74	1444	530	1973	2128
P34	148	273	302	278	232	169	153	115	105	85	70	85	1388	613	2001	2081
P35	186	342	408	376	307	206	182	132	120	77	86	98	1813	692	2481	2487
P36	224	463	561	477	394	268	269	159	173	99	126	136	2366	961	3333	-
P37	242	452	514	474	394	261	239	167	169	119	110	132	2328	934	3238	3367
P38	248	443	540	471	378	237	224	160	151	98	110	129	2301	873	3177	-
P39	251	441	569	510	399	263	243	179	137	102	111	114	2416	881	3299	3768
P40	150	284	361	290	243	171	168	115	113	74	71	98	1492	639	2138	2100
P41	144	305	372	311	279	169	148	108	89	63	56	76	1563	538	2116	2159
P42	163	339	409	361	320	187	169	130	98	77	70	93	1760	631	2407	-
P43	150	327	410	355	301	165	137	102	82	51	47	67	1668	481	2144	2264
P44	108	208	264	228	181	107	97	77	72	42	39	56	1075	378	1447	-
P45	149	305	354	330	286	184	170	122	115	78	75	96	1585	648	2236	-
P46	175	357	446	388	338	202	171	129	111	73	75	91	1867	641	2519	2191
P47	140	293	352	331	274	154	125	90	76	51	54	80	1508	475	1988	-

Las estadísticas de las series consideradas en el estudio, que fueron o no rellenadas y los estadísticos principales de las series (número de datos, promedio, desviación estándar, coeficiente de asimetría, mínimo y máximo) se muestran en el Anexo C.4.

A partir de los resultados obtenidos se procedió a generar las curvas isoyetas de precipitaciones anuales y estacionales sobre el área de estudio, presentadas en la Figura 4-13 a Figura 4-15.

4.2.3 Análisis de precipitaciones

4.2.3.1 Magnitud de las precipitaciones y efecto de la altura

Los datos de precipitación muestran un comportamiento pluvial, con mayores precipitaciones en los meses de invierno que en los de verano. Las precipitaciones de invierno son en promedio un 74% de las lluvias anuales. Los valores de precipitación anual promedio son similares a los presentados en el Balance Hidrológico Nacional Regiones VII, IX y X (Ver Tabla 4-7). La Figura 4-12 muestra la precipitación anual en función de la altura de la estación.

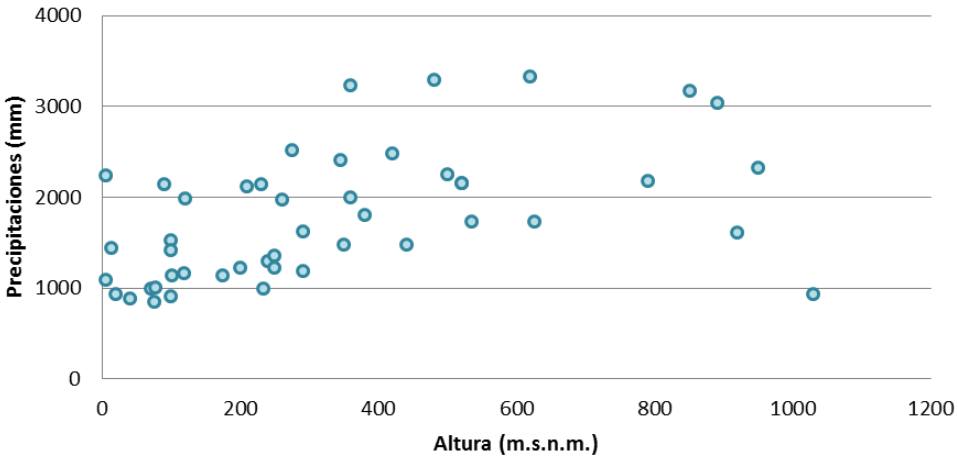


Figura 4-12. Precipitaciones anuales en función de la altura de la estación

La distribución espacial presentada en las curvas isoyetas y en la Figura 4-12 muestra que las mayores precipitaciones ocurren en las estaciones ubicadas alrededor del volcán Villarrica (P36 a P39), con valores entre 3177 mm y 3333 mm. Por otro lado, también ocurren altas precipitaciones en el borde norte de la cuenca del río Imperial (P3 y P4), alrededor del volcán Lonquimay (P18 y P19) y en las cercanía del volcán Llaima (P25). La estación Toltén (P45) presenta un comportamiento atípico, ya que se ubica a 5 m.s.n.m pero posee una precipitación anual promedio de 2236 mm. Este comportamiento se explica debido a la morfología de la cuenca del río Queule, que presenta un terreno elevado debido al resurgimiento de la cordillera de la costa (cordillera del Mahuidanche).

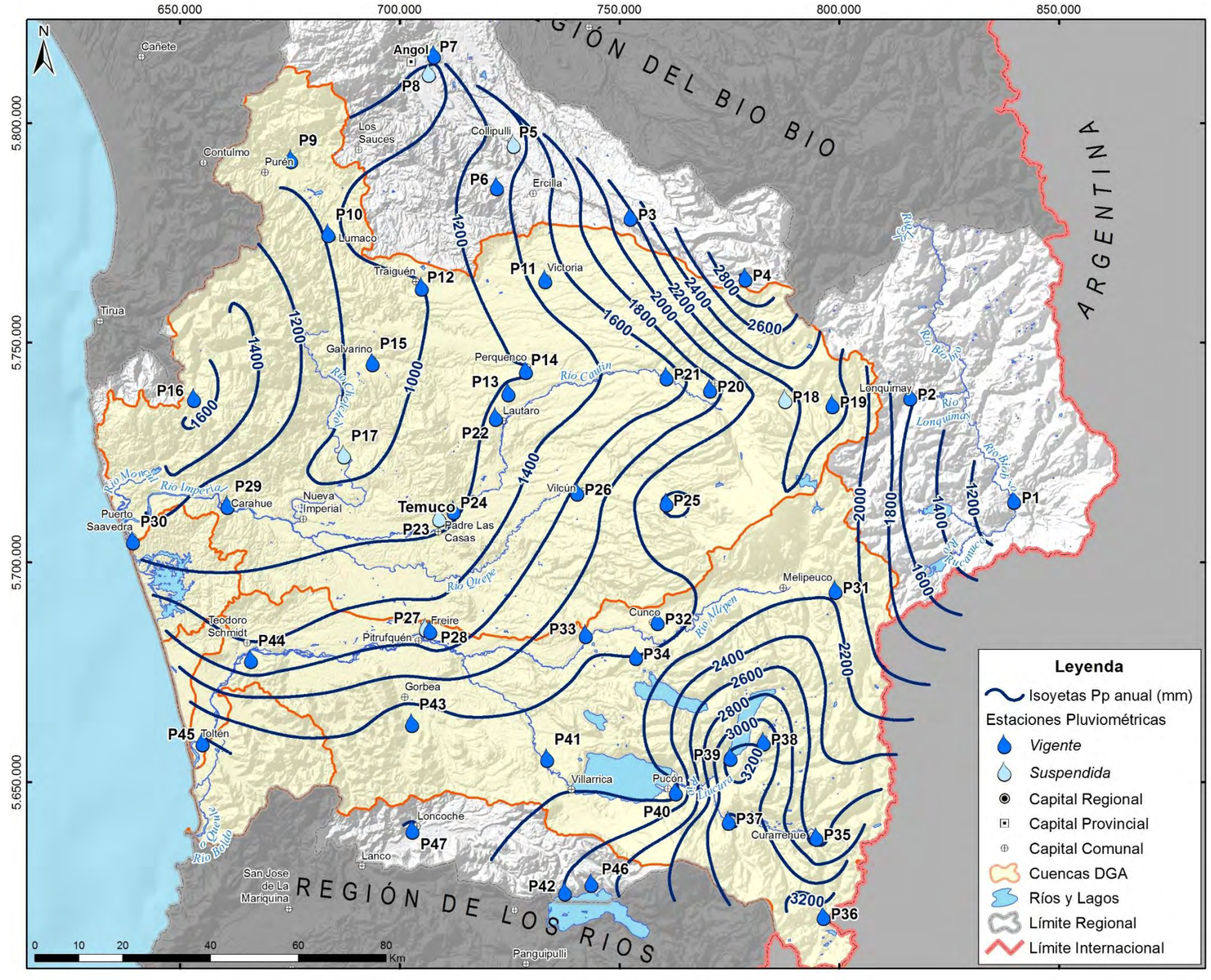


Figura 4-13. Curvas isoyetas de precipitaciones anuales promedio (mm)

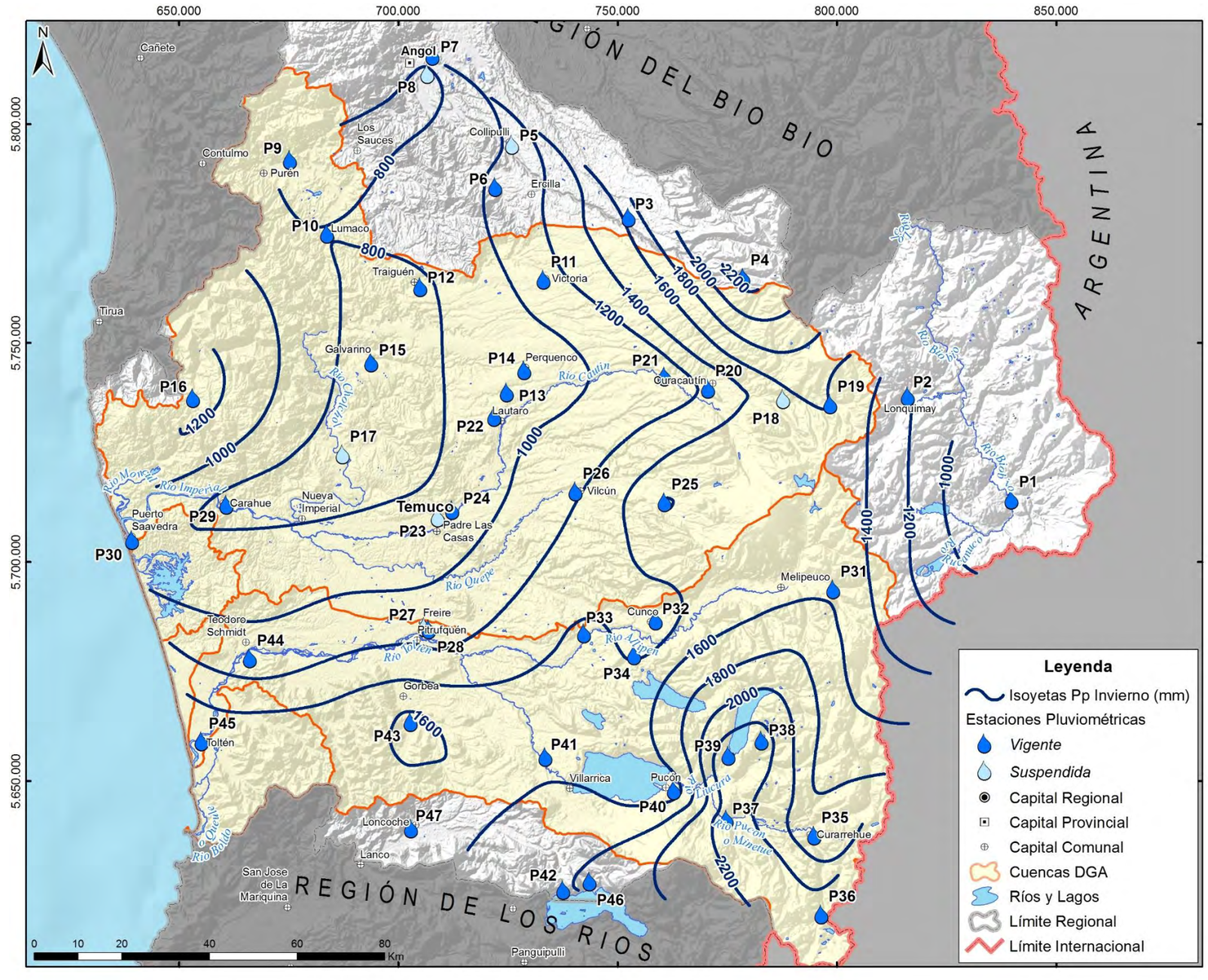


Figura 4-14. Curvas isoyetas del promedio de precipitaciones en invierno (mm)

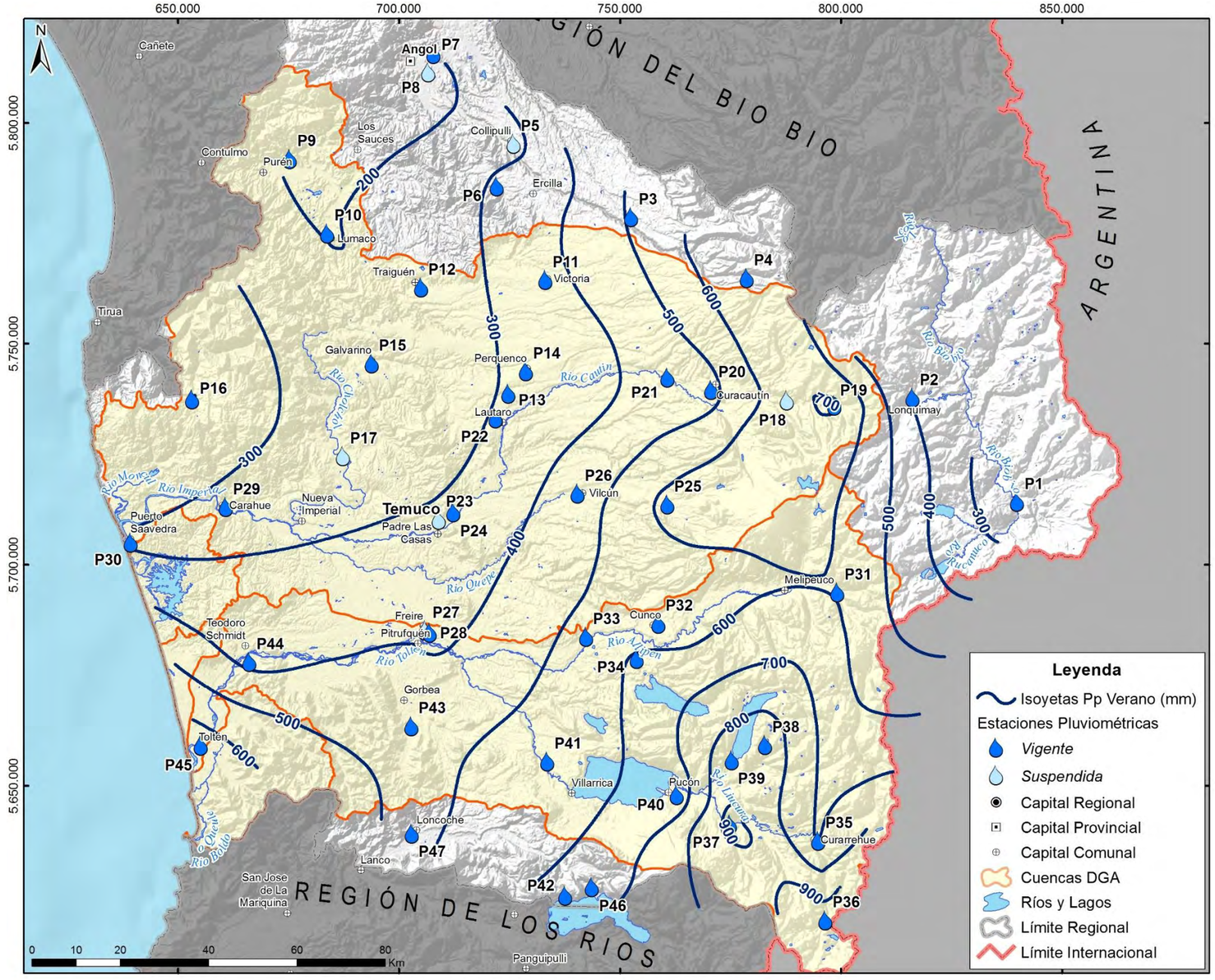


Figura 4-15. Curvas isoyetas de precipitaciones promedio en verano (mm)

4.2.3.2 Auto correlaciones

Se estudió la interacción de las estadísticas de precipitaciones promedio mensuales con la precipitación mensual del mes anterior, a fin de establecer la presencia de una autocorrelación temporal en las series. También se analizó la autocorrelación entre la precipitación anual con la del año anterior, entre los periodos de invierno con el verano anterior y los del verano con el invierno anterior. Se utilizó regresión lineal simple según la siguiente ecuación:

$$P_{m,t} = \beta_0 + P_{m,t-1} \cdot \beta_1$$

Ecuación 4-2

Donde $P_{m,t}$ es la precipitación del mes m, temporada o dato anual en el año t, β_1 y β_0 son los coeficientes de la regresión lineal. Se calcularon los valores de coeficiente de determinación (R^2) para cada regresión de autocorrelación. Los resultados de los cálculos se muestran en el Anexo C.5.

El máximo valor de coeficiente de determinación (R^2) corresponden a la estación Malalcahuello (P19) en el mes de mayo, con un valor de 0,19, mientras que la estación Lonquimay (P2) en el período estacional verano, es la que presenta un valor máximo de 0,3. El valor promedio de los coeficiente de determinación en la tabla anterior es de 0,03. Estos valores son muy bajos para rellenar información de un mes, estacion o año a partir del resultado del mes, estación o año anterior.

4.2.3.3 Isolíneas de correlación espacial de precipitaciones

El análisis determino las correlaciones de las series de cada estación con el resto de las estaciones para los valores mes a mes. Los resultados indican una alta correlación de la información dentro de toda la región. Esto es muy relevante, ya que la región presentaría uniformidad temporal en sus precipitaciones mensuales. La estación Los Laureles (P33) que se encuentra en una posición central dentro de la región, tiene una correlación promedio con las otras estaciones de 0,89 y 0,86 antes y después de ser rellenada. En la Figura 4-16 muestra las isolíneas de correlación espacial de los datos mensuales con la estación Los Laureles (P33). Se puede decir que la precipitación mensual en esta estación representa adecuadamente lo que ocurre en la región. Los valores de las correlaciones espaciales de las series mensuales de precipitaciones antes y después de rellenar los valores pueden ser revisados en el Anexo C.6.

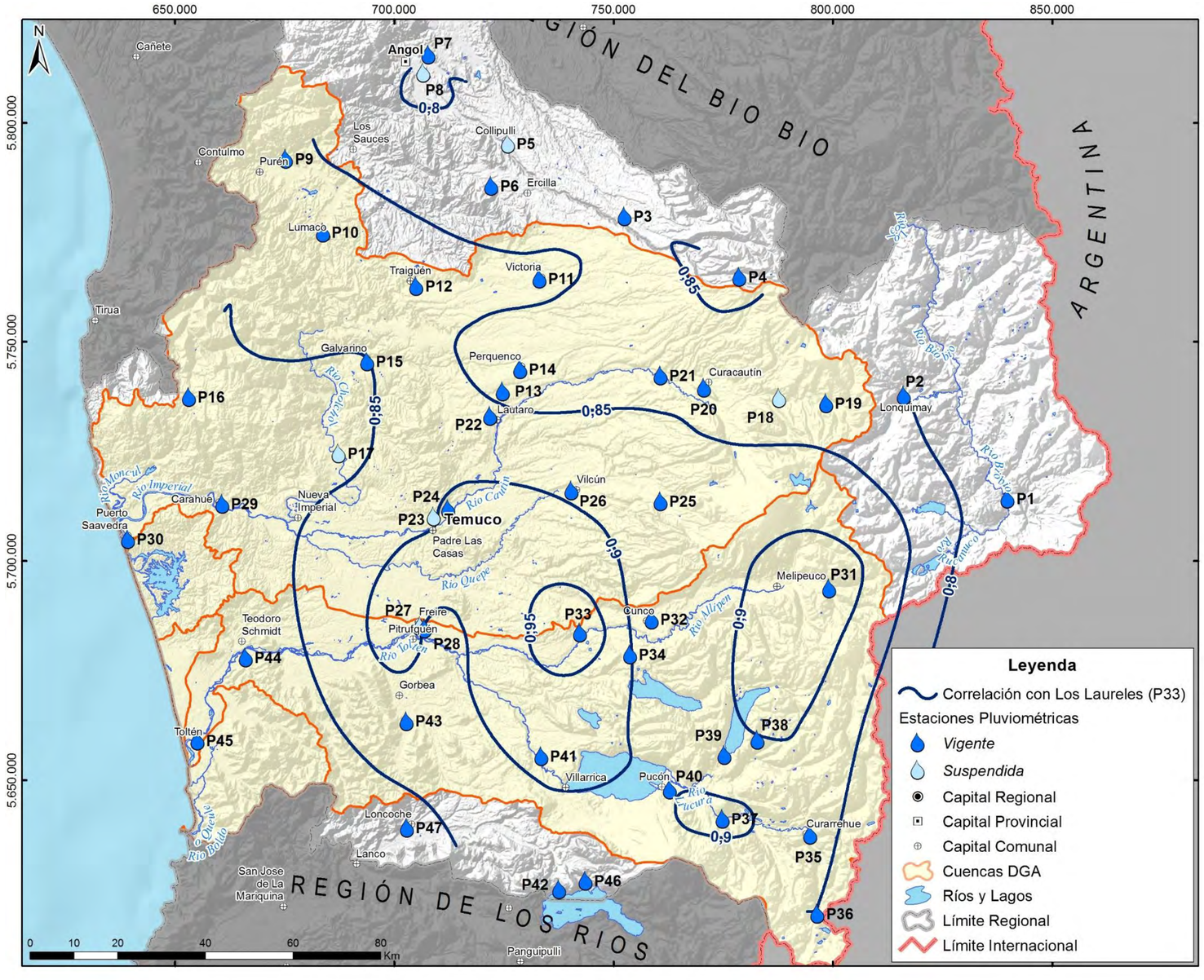


Figura 4-16. Distribución de isolíneas de correlación espacial de la precipitación mensual con estación Los Laureles (P33)

4.2.3.4 Analisis de frecuencia de precipitación

Se consideraron cuatro modelos alternativos de distribución de probabilidades, todos ellos para las series de valores de las precipitaciones. Son el Modelo Normal, Log Normal, Pearson III y Gamma de dos parámetros. Estos modelos tienen por objeto acomodar las variaciones de la asimetría que presentan los valores mensuales, invernales, veraniegos y anuales. Es posible apreciar que ésta es relativamente grande en algunos periodos y muy variable en otros (Ver Anexo C.4). Por ello el modelo Log Normal y Normal supone una asimetría nula, mientras el modelo de Pearson III, que es una distribución Gama de tres parámetros, permite acomodar cualquier valor de asimetría, con preferencia para valores positivos. Por su parte, el modelo Gamma de dos parámetros, corresponde a una distribución que puede acomodar asimetría en función a sus parámetros.

Con respecto al ajuste de las distintas distribuciones de probabilidad, existen numerosos métodos para comparar la bondad de los modelos ajustados a una muestra, de manera de seleccionar el que mejor satisface las propiedades que ella presenta. En este caso se aplicó el test de Chi-Cuadrado.

De acuerdo a los resultados obtenidos con este test, el mejor ajuste no favorece a una distribución en particular que pueda representar todos los meses y los valores de temporadas. Sin embargo para los meses de julio, junio, agosto y para las distribuciones de temporadas veraniegas, invernales y Anuales, la distribución Normal es la que presenta consistentemente menor número de rechazos en el test. Durante los meses de septiembre a mayo es la distribución Gamma de dos parámetros la que obtiene consistentemente menos rechazos. Estos resultados respaldan la noción teórica de que los meses más lluviosos y los valores de temporadas tiendan a distribuir de forma Normal, ya que incorporan una cantidad importante de lluvias independientes y no presentan valores nulos. La distribución Gamma de dos parámetros que es asimétrica y estrictamente positiva, es la que obtiene los mejores resultados durante los meses más secos, en los que se pueden apreciar un número importante de registros con valor cero. Los estadígrafos calculados en el test de Chi-Cuadrado pueden revisarse en detalle en el Anexo C.6.

La Figura 4-17 presenta un resumen de las precipitaciones para probabilidades de excedencia de 5, 20, 50, 85 y 95% calculados según el ajuste del modelo Gamma de dos parámetros para los meses de septiembre a mayo y distribución Normal para los meses junio, julio, agosto y las series de temporadas veraniegas, invernales y anuales en las estaciones analizadas.

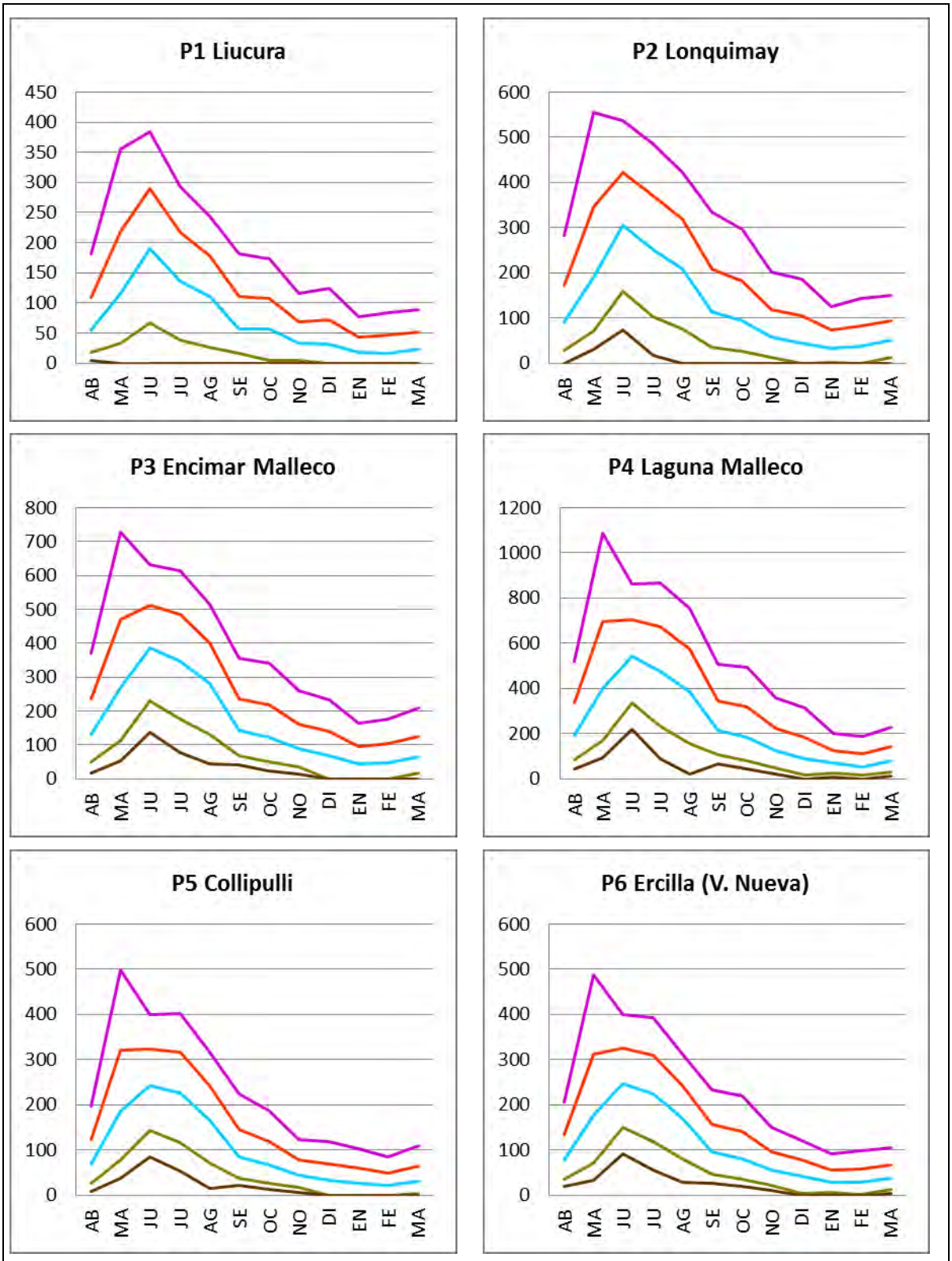


Figura 4-17. Precipitaciones para diferentes probabilidades en estaciones pluviométricas del área de estudio (mm).

Probabilidades de excedencia: morado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

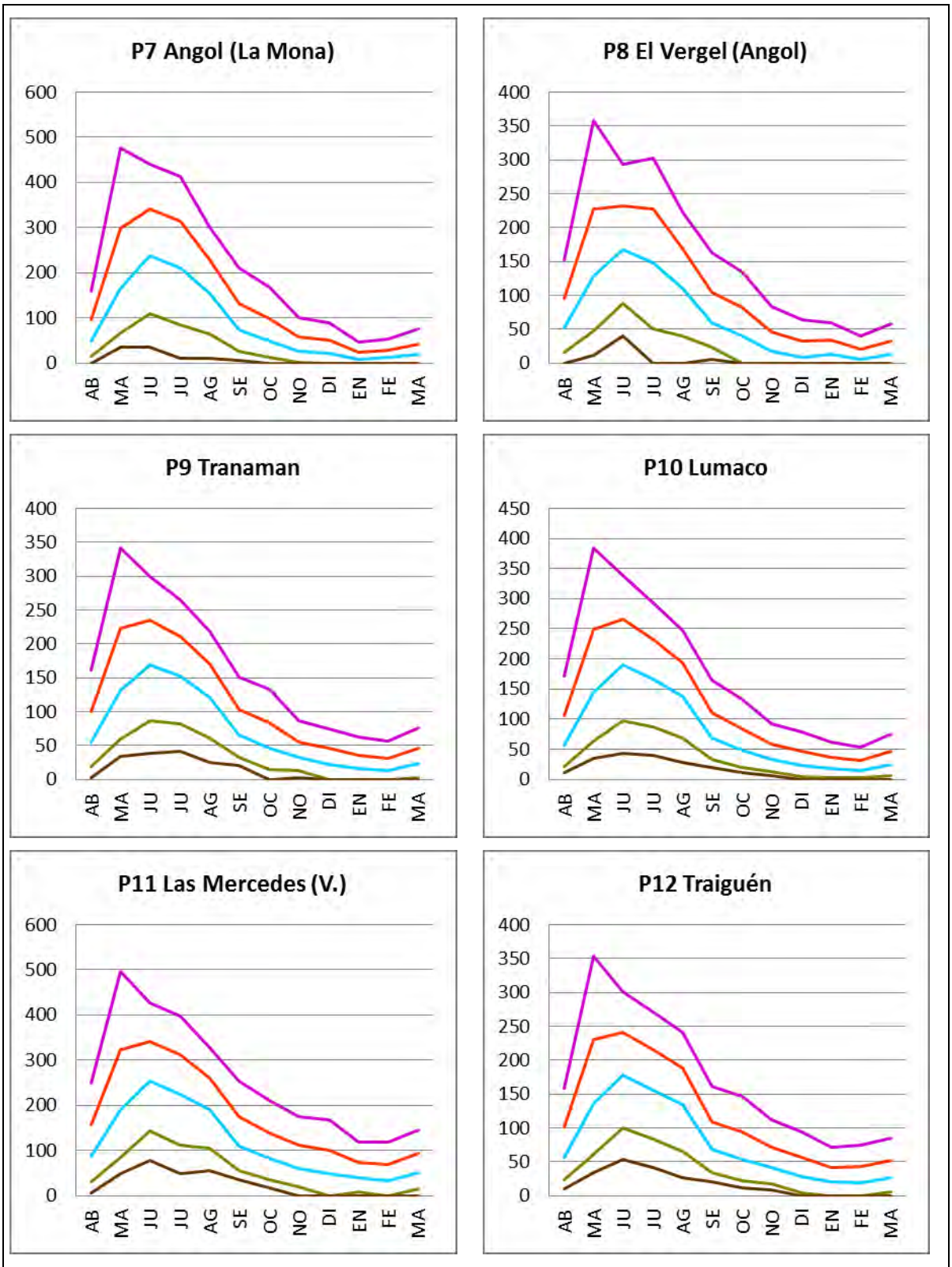


Figura 4-17. Precipitaciones para diferentes probabilidades en estaciones pluviométricas del área de estudio (mm). (continuación)

Probabilidades de excedencia: morado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

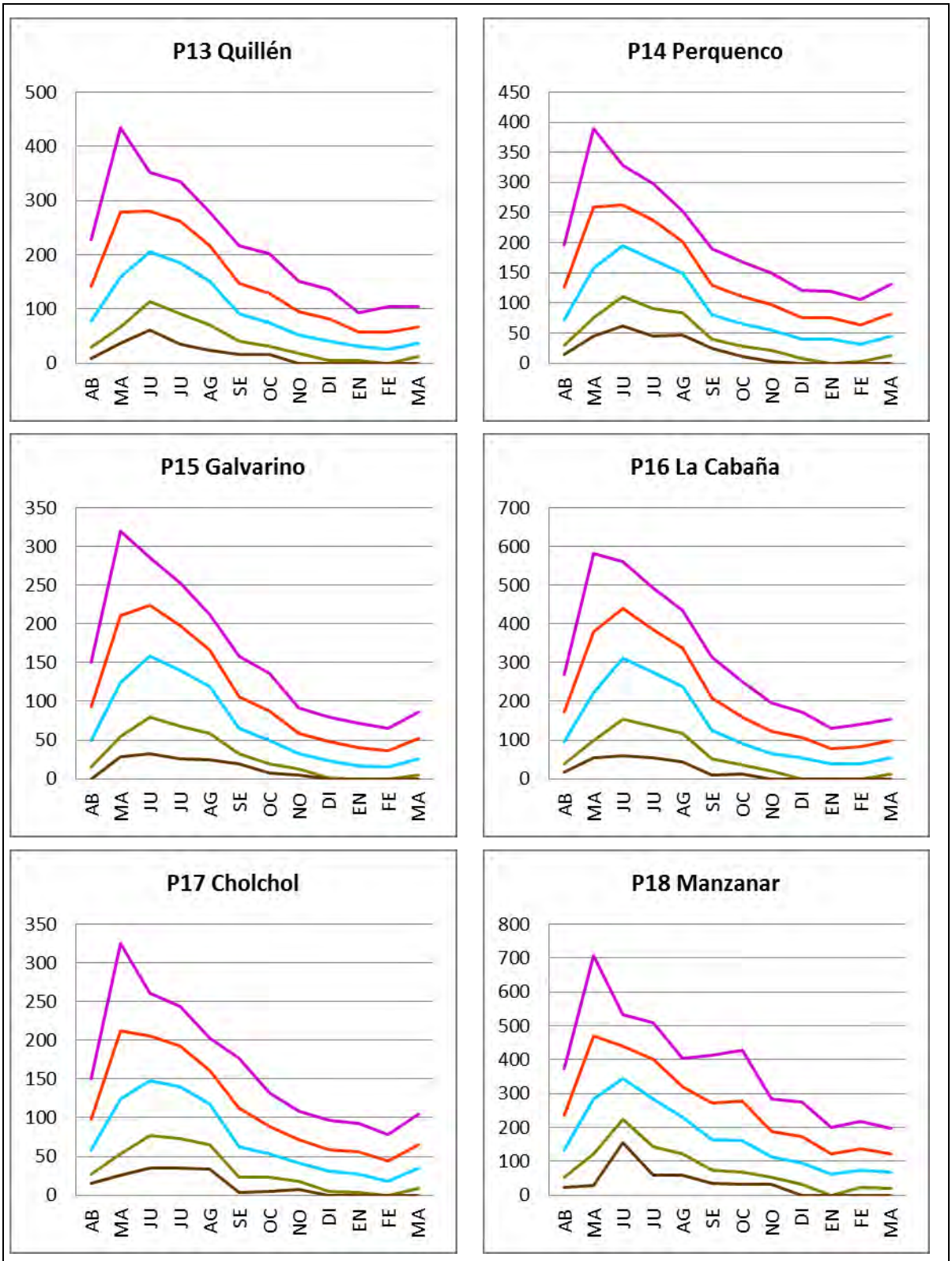


Figura 4-17. Precipitaciones para diferentes probabilidades en estaciones pluviométricas del área de estudio (mm). (continuación)

Probabilidades de excedencia: morado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

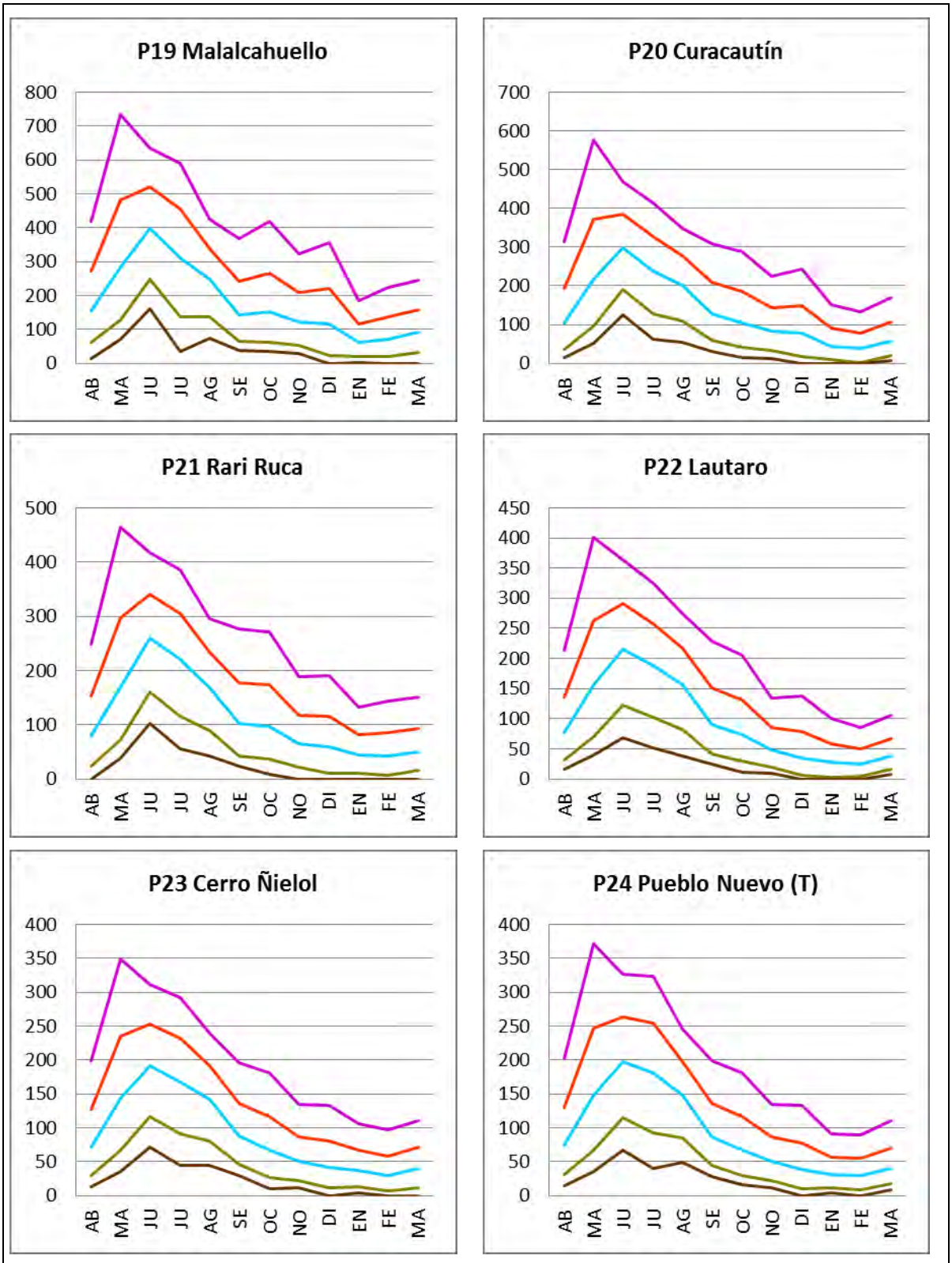


Figura 4-17. Precipitaciones para diferentes probabilidades en estaciones pluviométricas del área de estudio (mm). (continuación)

Probabilidades de excedencia: morado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

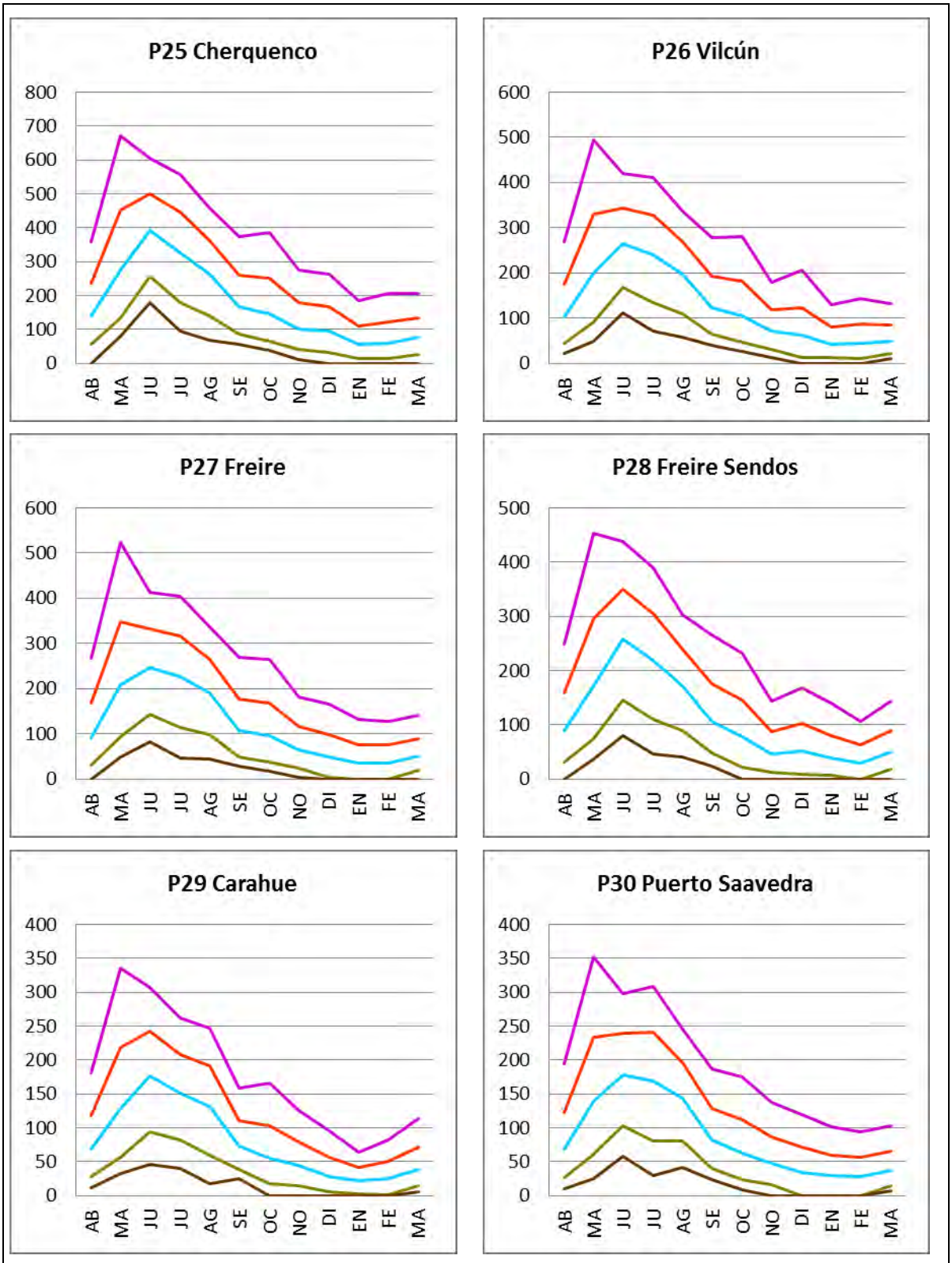


Figura 4-17. Precipitaciones para diferentes probabilidades en estaciones pluviométricas del área de estudio (mm). (continuación)

Probabilidades de excedencia: morado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

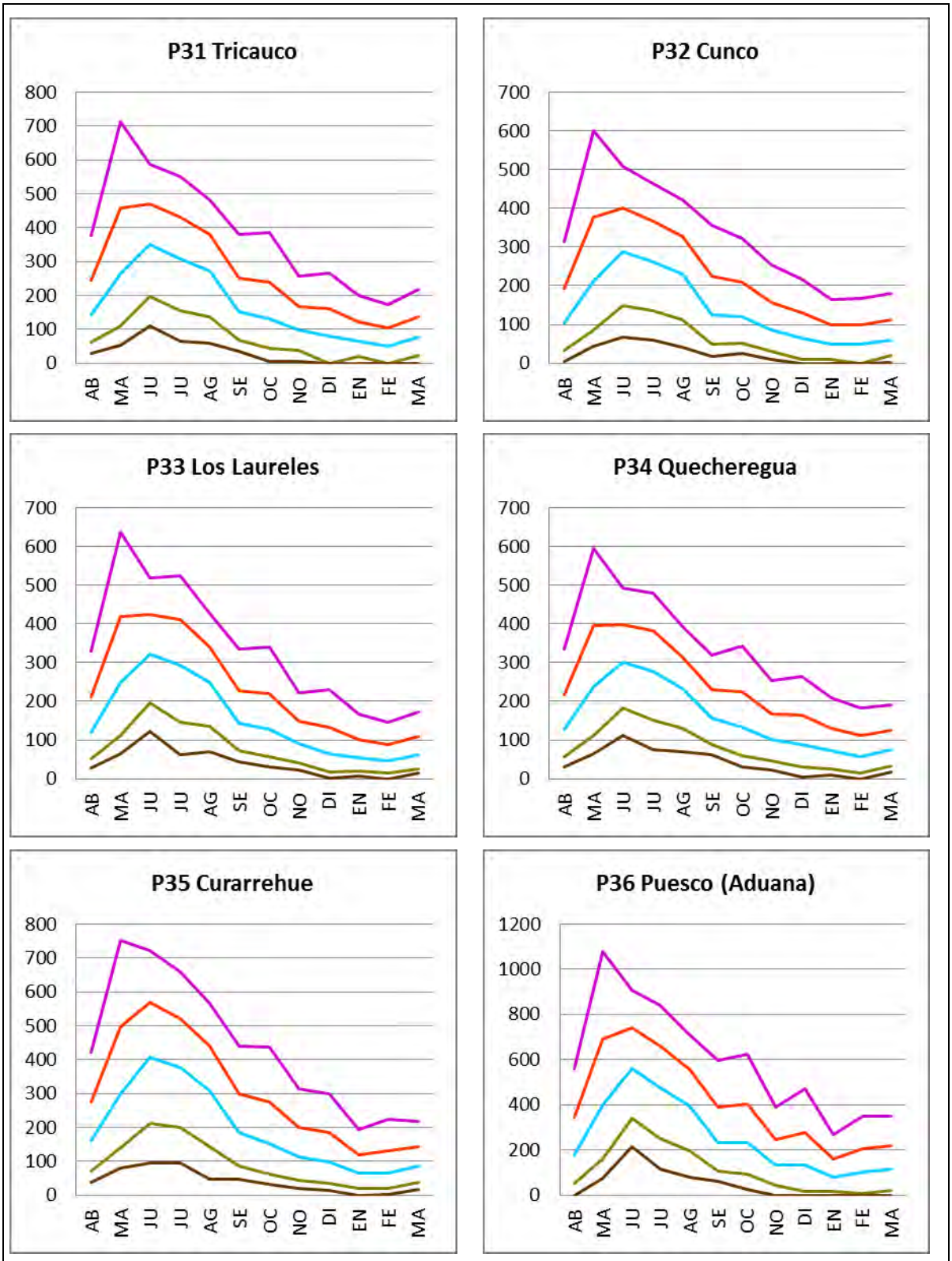


Figura 4-17. Precipitaciones para diferentes probabilidades en estaciones pluviométricas del área de estudio (mm). (continuación)

Probabilidades de excedencia: morado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

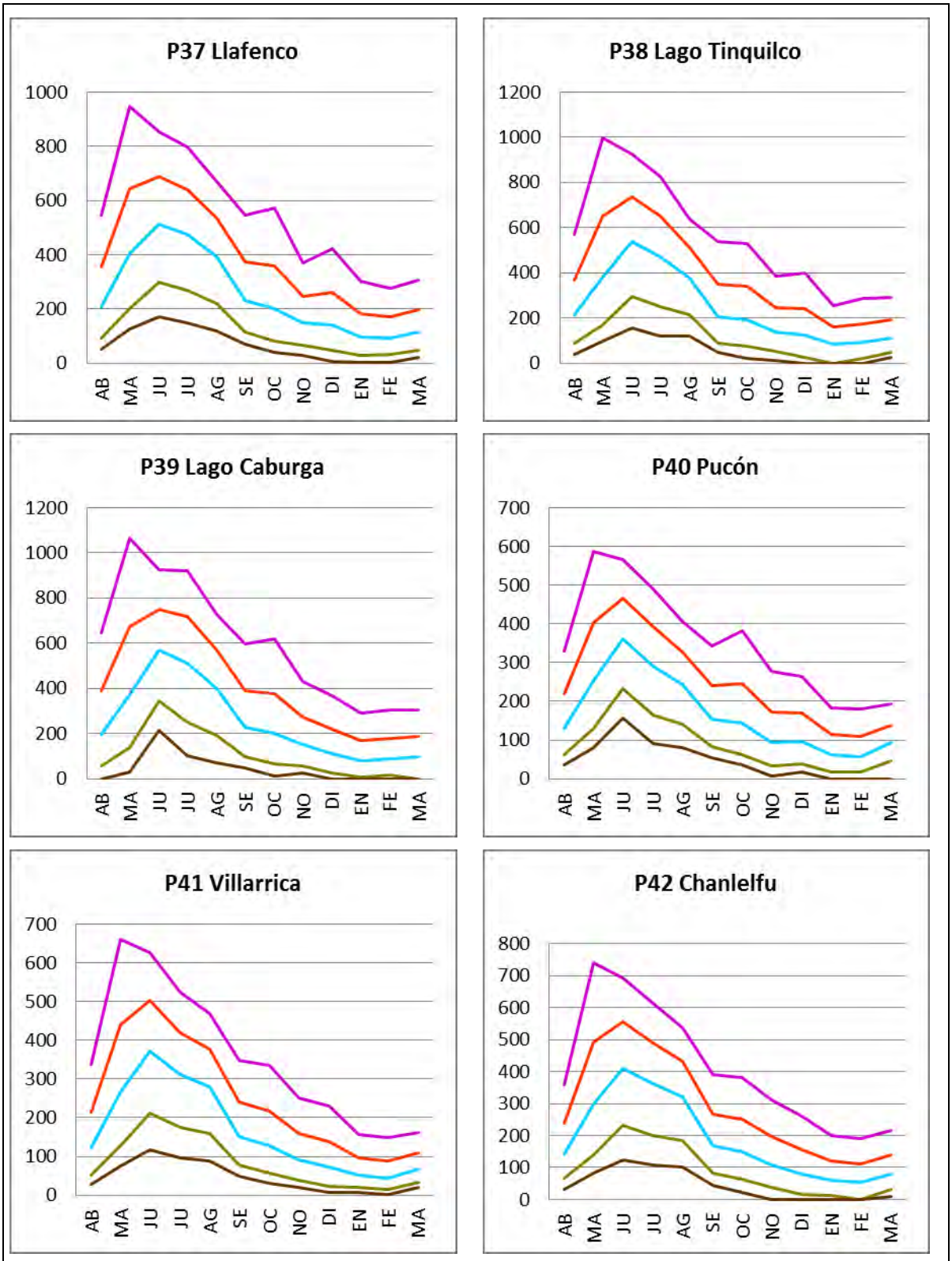


Figura 4-17. Precipitaciones para diferentes probabilidades en estaciones pluviométricas del área de estudio (mm). (continuación)

Probabilidades de excedencia: morado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

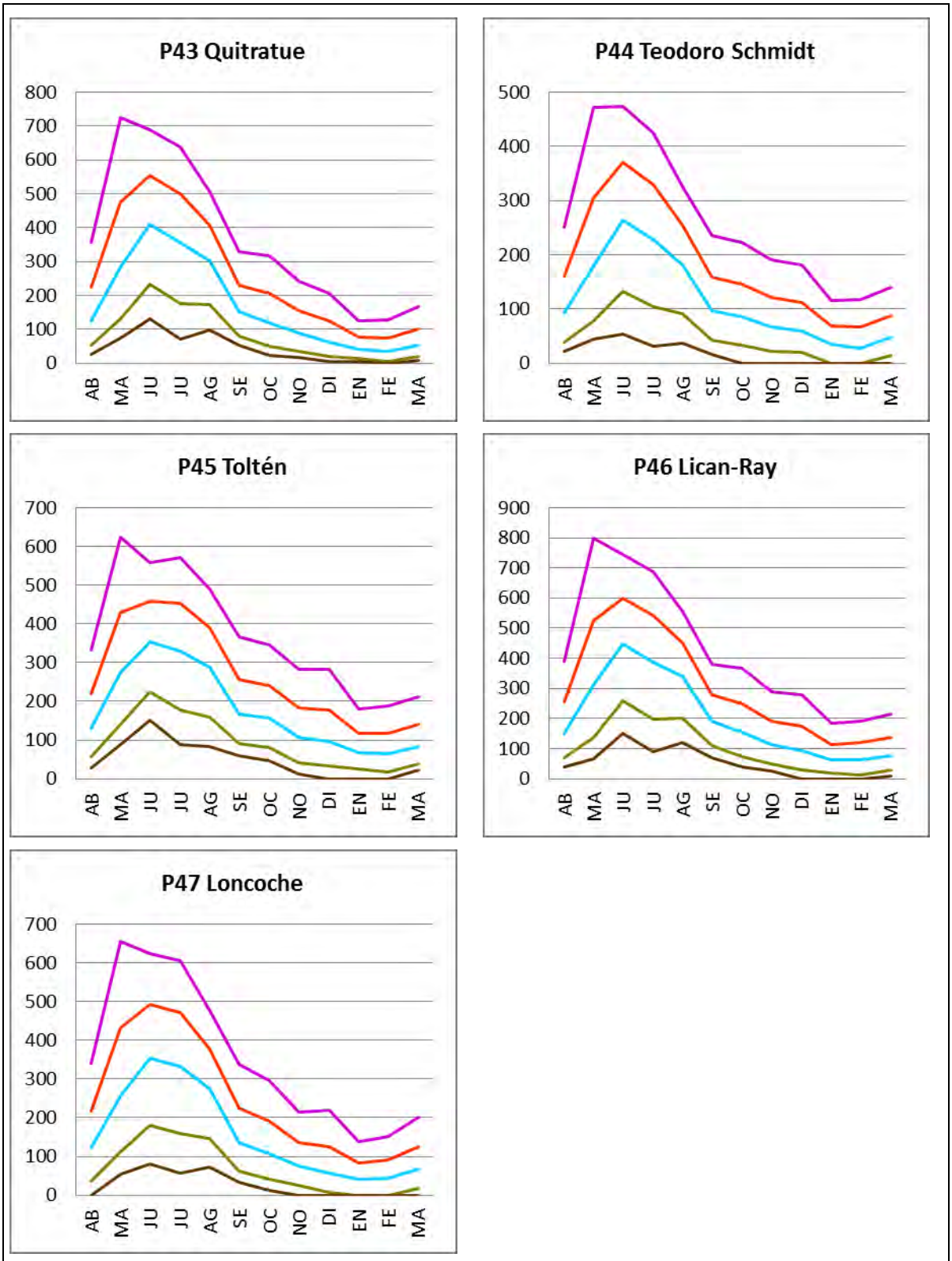


Figura 4-17. Precipitaciones para diferentes probabilidades en estaciones pluviométricas del área de estudio (mm). (continuación)

Probabilidades de excedencia: morado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

4.2.4 Conclusiones pluviometría

El análisis pluviométrico realizado permite concluir lo siguiente:

1. Existe una red pluviométrica adecuada para caracterizar la lluvia en la región que tiene 63 estaciones, de las cuales se consideraron 47 por tener más de 10 años de registros, y 8 de ellas poseen más de 50 años de registro.
2. Los promedios de lluvias anuales varían entre 852 y 3333 mm. Por otro lado, los coeficientes de variación tienen un promedio de 0,21 y están en el rango entre 0,16 y 0,32. También se observó que los coeficientes de asimetría son cercanos a 0 y varían entre -0,65 y 0,51.
3. Los coeficientes de variación de las lluvias anuales al ser menores a 0,32 indican que el valor de lluvia anual varía poco en relación a su promedio, y por consiguiente la probabilidad de tener lluvias comprendidas entre 0,7 y 1,3 veces el promedio es alta.
4. Las lluvias mensuales de junio, julio, agosto, las estacionales y anuales están bien representadas por un modelo de distribución Normal de dos parámetros y las lluvias de los meses entre septiembre y mayo están bien representadas por un modelo de distribución Gamma de dos parámetros.
5. La correlación espacial de las lluvias anuales es alta. Esto significa que la precipitación se puede estimar de buena manera a partir de una relación lineal con las estaciones vecinas. La Figura 4-16 muestra las curvas de igual correlación lineal, tomando como base el registro de Los Laureles (P33). Se puede apreciar que la totalidad de la región presenta coeficientes de correlación superiores a 0,8.
6. Dada 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. En puntos sin registros la lluvia de los puntos vecinos es un buen estimador.
7. La autocorrelación temporal de las lluvias mensuales y anuales no es significativa. Luego las lluvias anuales son estadísticamente independientes.

4.3 CARACTERIZACIÓN FLUVIOMÉTRICA DE LAS CUENCAS

El objetivo del análisis fluviométrico es contar con un conocimiento de los caudales en la región, ya que es una componente clave del balance hídrico y su correcta estimación permite representar las interacciones con el acuífero. Esto implica estar en condiciones de poder conocer o estimar en cualquier lugar de la red de drenaje, el valor del caudal mensual, estacional y anual. Lo anterior implica contar con una estimación de los estadísticos principales del valor mensual, estacional y anual; el modelo probabilístico que representa el caudal adecuadamente; caudales asociados a distintas probabilidades; las relaciones para estimarla en puntos sin registros y la variación espacial y temporal del caudal en la red de drenaje.

A continuación se muestran las características de las estaciones que tienen datos disponibles de caudales mensuales en la región y el relleno y análisis de la información para disponer de series de caudales más extensas. Finalmente se presenta un análisis estadístico e hidrológico de las series anuales, estacionales y mensuales.

4.3.1 Estaciones fluviométricas seleccionadas

En las cuencas de la región de La Araucanía existe una cantidad importante de estaciones con registro de caudales controlados por la DGA. Los registros originales se muestran en el Anexo C.7. Las características principales de las estaciones fluviométricas seleccionadas se indican en la Tabla 4-8. A cada estación se le asignó un número para facilitar su identificación. Las estaciones con menos de 110 datos mensuales (10 años) en su registro no fueron consideradas.

Tabla 4-8: Características de las estaciones fluviométricas seleccionadas.

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altura	Registro	Estado
Q1	Río Lonquimay antes junta Bio Bio	08304001-7	5.743.671	305.060		1985-2013	V
Q2	Río Renaico en Longitudinal	08342001-4	5.807.531	730.237	135	1982-2013	V
Q3	Río Mininco en Longitudinal	08343001-K	5.805.723	728.718	120	1963-2013	V
Q4	Río Malleco en La Laguna	08350001-8	5.766.570	252.373	850	1960-1984	NV
Q5	Río Malleco en Collipulli	08351001-3	5.794.927	725.238	160	1920-2013	V
Q6	Río Los Sauces en Las Balsas	08355001-5	5.795.599	690.333		1929-1946	NV
Q7	Río Rahue en Quebrada Culen	08356001-0	5.798.171	692.495	65	1997-2013	V
Q8	Río Vergara en Tijeral	08358001-1	5.821.029	710.032	40	1964-2013	V
Q9	Río Purén en Tranamán	09101001-1	5.788.560	674.069	90	1948-2004	NV
Q10	Río Purén en Purén	09101002-K	5.790.890	671.850		1994-2009	NV
Q11	Río Lumaco en Lumaco	09102001-7	5.775.388	684.017	70	1947-2013	V
Q12	Río Traiguén en Victoria	09104001-8	5.766.670	734.929	350	1950-2013	V
Q13	Río Dumo en Santa Ana	09104002-6	5.774.027	736.604	300	1987-2013	V
Q14	Río Quino en Longitudinal	09106001-9	5.757.588	728.829	450	1959-2013	V
Q15	Estero Chufquén en Chufquén	09107001-4	5.758.251	704.045	158	1987-2013	V
Q16	Río Quillén en Longitudinal	09111001-6	5.741.063	723.992	278	1959-1983	NV
Q17	Río Quillen en Galvarino	09113001-7	5.747.405	693.576	140	1959-2013	V
Q18	Río Cholchol en Cholchol	09116001-3	5.724.447	687.406	20	1929-2013	V
Q19	Río Cholchol en Nueva Imperial	09118001-4	5.710.748	678.194	20	1928-1954	NV
Q20	Río Blanco en Curacautín	09122002-4	5.740.200	249.905	405	1986-2013	V
Q21	Río Cautín en Rari Ruca	09123001-1	5.742.138	760.963	425	1929-2013	V
Q22	Río Collín en Codahue	09126001-8	5.726.280	745.139	250	1996-2013	V
Q23	Río Muco en Puente Muco	09127001-3	5.722.524	724.927	250	1950-2013	V
Q24	Río Cautín en Cajón	09129002-2	5.714.961	717.214	130	1949-2013	V
Q25	Río Quepe en Vilcún	09131001-5	5.714.658	740.670	292	1946-2013	V
Q26	Río Huichahue en Faja 24000	09134001-1	5.696.417	731.429	150	1985-2013	V
Q27	Río Quepe en Quepe	09135001-7	5.697.098	706.836	80	1929-2013	V
Q28	Río Cautín en Almagro	09140001-4	5.705.562	678.343	20	1965-2013	V
Q29	Río Allipén en Melipeuco	09402001-8	5.694.549	262.813	450	1985-2013	V
Q30	Río Allipén en Los Laureles	09404001-9	5.681.359	739.660	190	1946-2013	V
Q31	Río Curaco en Colico	09405001-4	5.675.402	752.474	250	1986-2013	V
Q32	Río Trancura en Curarrehue	09412001-2	5.640.022	277.635	400	1968-2013	V
Q33	Río Trancura antes Río Llafenco	09414001-3	5.642.507	261.528	386	1970-2013	V
Q34	Río Liucura en Liucura	09416001-4	5.650.926	256.283	402	1971-2013	V
Q35	Río Toltén en Villarrica	09420001-6	5.649.908	738.701	250	1929-2013	V
Q36	Río Toltén en Coipue	09423001-2	5.668.793	726.291	200	1929-1983	NV
Q37	Río Puyehue en Quitratue	09433001-7	5.663.912	701.642	90	1947-2013	V
Q38	Río Donguil en Gorbea	09434001-2	5.669.498	700.343	85	1947-2013	V
Q39	Río Mahuidanche en Santa Ana	09436001-3	5.671.870	678.763	50	1987-2013	V
Q40	Río Toltén en Teodoro Schmidt	09437002-7	5.679.798	665.995	15	1991-2013	V

[Fuente: DGA] *WGS-84
V: Vigente
NV: No Vigente

La Figura 4-18 presenta un resumen de la disponibilidad histórica de estadísticas de caudal mensual en las estaciones fluviométricas DGA a partir de 1920 a la fecha.

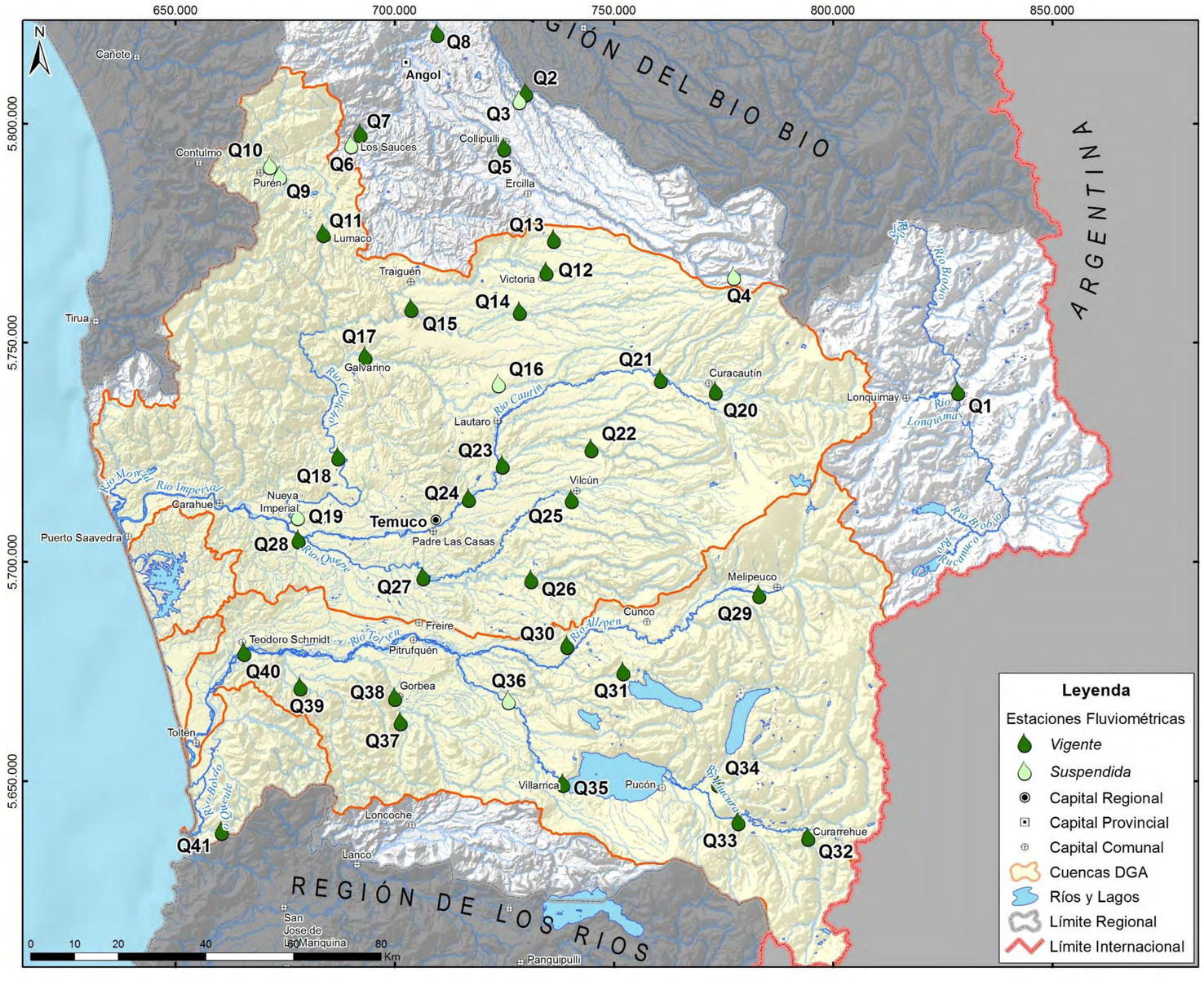
Los registros de caudales son un promedio en el tiempo. Tomando en cuenta esto y la inercia de los caudales en las cuencas, fueron considerados todos los datos mensuales con registro, sin importarla cantidad de días al mes.

Se observa que la red ha ido creciendo constantemente en el tiempo, de forma similar a la red pluviométrica. Algunas estaciones presentan series de datos largas con más de 75 años, mientras que otras tienen 10 años con registros. Del total hay 22 estaciones que tienen más de 30 años con registros y 14 tienen más de 50 años.

La Figura 4-19 muestra la distribución espacial de las estaciones. Se observa que las estaciones se encuentran bien distribuidas espacialmente dentro de la red fluvial de la región. Es posible observar que 8 estaciones se encuentra ubicadas al norte de la cuenca del río Imperial (Desde la estación Río Lonquimay antes junta Bio Bio (Q1) hasta la estación Río Vergara en Tijeral (Q8)), 20 estaciones se ubican en la cuenca del río Imperial (Desde la estación Río Purén en Tranamán (Q9) hasta la estación Río Cautín en Almagro (Q28)) y 12 estaciones se ubican en la cuenca del río Toltén (Desde la estación Río Allipén en Melipeuco (Q29) hasta la estación Río Toltén en Teodoro Schmidt (Q40)).

No.	Nombre	1920-1929	1930-1939	1940-1949	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2013
Q1	Río Lonquimay antes junta Bio Bio										
Q2	Río Renaico en Longitudinal										
Q3	Río Mininco en Longitudinal										
Q4	Río Malleco en La Laguna										
Q5	Río Malleco en Collipulli										
Q6	Río Los Sauces en Las Balsas										
Q7	Rio Rahue en Quebrada Culen										
Q8	Río Vergara en Tijeral										
Q9	Río Purén en Tranamán										
Q10	Río Purén en Purén										
Q11	Río Lumaco en Lumaco										
Q12	Río Traiguén en Victoria										
Q13	Río Dumo en Santa Ana										
Q14	Río Quino en Longitudinal										
Q15	Estero Chufquén en Chufquén										
Q16	Río Quillén en Longitudinal										
Q17	Río Quillen en Galvarino										
Q18	Río Cholchol en Cholchol										
Q19	Río Cholchol en Nueva Imperial										
Q20	Río Blanco en Curacautín										
Q21	Río Cautín en Rari Ruca										
Q22	Río Collín en Codahue										
Q23	Río Muco en Puente Muco										
Q24	Río Cautín en Cajón										
Q25	Río Quepe en Vilcún										
Q26	Río Huichahue en Faja 24000										
Q27	Río Quepe en Quepe										
Q28	Río Cautín en Almagro										
Q29	Río Allipén en Melipeuco										
Q30	Río Allipén en Los Laureles										
Q31	Río Curaco en Colico										
Q32	Río Trancura en Curarrehue										
Q33	Río Trancura antes Río llafenco										
Q34	Río Liucura en Liucura										
Q35	Río Toltén en Villarrica										
Q36	Río Toltén en Coipue										
Q37	Río Puyehu en Quitratue										
Q38	Río Donguil en Gorbea										
Q39	Río Mahuidanche en Santa Ana										
Q40	Río Toltén en Teodoro Schmidt										
Q41	Río Santo Domingo en Rinconada de Piedra										

Figura 4-18. Disponibilidad de datos en estaciones fluviométricas con registros de caudal medio mensual (Azul: 12 datos, Rojo: entre 10 y 11 datos, Verde: entre 7 y 9 datos, Amarillo: entre 1 y 6 datos por año)


650.000
700.000
750.000
800.000
850.000
5.800.000
5.750.000
5.700.000
5.650.000
N
REGIÓN DEL BIO BIO
ARGENTINA
REGIÓN DE LOS RIOS
Cañete
Angol
Contulmo
Purén
Los Sauces
Collipulli
Ercilla
Lumaco
Traiguén
Victoria
Tirua
Galvarino
Curacautín
Lonquimay
Lautaro
Nueva Imperial
Carahue
Temuco
Padre Las Casas
Vilcún
Puerto Saavedra
Melipeuco
Cunco
Freire
Teodoro Schmidt
Pitrufquén
Gorbea
Tolten
Villarrica
Pucón
Loncoche
Curarrehue
Lanco
San Jose de La Mariquina
Panguipulli
Río Imperial
Río Quepe
Río Queuel
Río Bío Bío
Río Lonquimay
Río Allipen
Río Pucón
Río Carirriñe
Río Malleco
Río Traiguén
Río Toltén
Río Cautín
Río Chol Chol
Río Quillén
Río Huichahue
Río Donguil
Río Pedregoso
Río Renaico
Río Vergara
Río Huequecura
Río Rucalhue
Río Duqueco
Río Mininco
Río Huequén
Río Lumaco
Río Pangue
Río Huapi
Río Blanco
Río Quino
Río Huaiquillahue
Río Huaiquillahue
Río Huaiquillahue

4.3.2 Corrección y relleno de estadísticas fluviométricas

4.3.2.1 Análisis de consistencia de caudales anuales

Se analizó la consistencia de las series de datos anuales en cada estación utilizando el método de los residuos acumulados. Este método se explicó en la sección 4.2.2 del presente informe.

El patrón se escoge eligiendo una estación cuyos registros sean confiables. En el presente estudio se seleccionaron como patrón estaciones con registros extensos y con alta correlación espacial con las estaciones de la cuenca. La estación patrón para las estaciones ubicadas al norte de la cuenca del río Imperial (Q1 a Q7) fue la estación río Vergara en Tijeral (Q8), con la excepción de la estación Río Los Sauces en Las Balsas (Q6). Para esta estación el patrón fue la estación Río Traiguén en Victoria (Q12). Para las estaciones en la cuenca del río Toltén (Q29 a Q40) y las estaciones Río Traiguén en Victoria (Q12) y Río Cautín en Rari Ruca (Q21) se utilizó como patrón la estación Río Allipén en Los Laureles (Q30). Por último, se utilizó la estación Río Cautín en Cajón (Q24) como patrón para el resto de las estaciones ubicadas en la cuenca del río Imperial.

De acuerdo al análisis realizado, todas las estaciones presentaron consistencia con el patrón para sus datos anuales según el método de los residuos acumulados. El límite de la elipse se construyó con una probabilidad de cometer error de tipo I de 95%. El Anexo C.8 muestra los resultados del método de los residuos acumulados en las estaciones fluviométricas.

a) Relleno de caudales mensuales faltantes

Con el objetivo de poder considerar al menos 50 años de registros para el análisis de las condiciones hidrológicas de la cuenca, se completó la estadística rellenando los datos faltantes. Para ello se utilizaron los datos provenientes de la DGA y se rellenó con series que poseen un número importante de datos, mediante regresiones de las series de datos mensuales completas, sin hacer diferencia entre un mes y otro. La estación utilizada para rellenar en cada caso se eligió de entre las estaciones con buena correlación, que posean un alto número de datos y que preferentemente se encuentren ubicadas en la misma cuenca a la estación rellenada. Para realizar el relleno de forma correcta y mantener las propiedades estadísticas de la serie a rellenar se utiliza la Ecuación 4-1, explicada previamente.

Se buscaron valores anómalos en las series de datos originales con el objetivo de chequear su validez. Estos valores anómalos se definen como un valor que supere al promedio en 6 veces la desviación estándar. Bajo este criterio se encontraron 10 valores anómalos en total en las series de caudales, 4 en la estación Río Malleco en Collipulli (Q1) (julio de 1928, agosto de 1929, junio de 1931 y julio 1930) y 1 en cada una de las siguientes estaciones: Río Renaico en Longitudinal (Q2) (septiembre del 2000), Río Mininco en Longitudinal (Q3) (julio de 1982), Río Quillén en Longitudinal (Q16) (septiembre de 1963), Río Quillén en Galvarino (Q17) (julio de 1978), Río Quepe en Vilcún (Q25) (julio de 1978), y Río Liucura en Liucura (Q34) (junio de 1993). Se revisaron las fechas para cada estación, encontrándose que en otras estaciones también se registraron caudales de gran magnitud en las mimas fechas. Por lo que el valor anómalo se puede asociar a un periodo particularmente lluvioso y no a un error de anotación.

Las estadísticas básicas de las regresiones mensuales se resumen en Tabla 4-9. Las estaciones con más de 600 datos mensuales (50 años) no fueron rellenadas porque

poseen un número importante de datos en el registro original. Por otra parte, en la Tabla 4-9, N_1 es el número de datos comunes disponibles en ambas series y N_2 es el número de datos a rellenar.

Tabla 4-9: Características de las relaciones de caudales mensuales para el relleno de datos faltantes.

No.	Estación a rellenar	Estación que rellena	*a*	*b*	R^2	N_1	N_2	ΔS (%)
Q1	Río Lonquimay antes junta Bío Bío	Río Allipén en Los Laureles	-4,01	0,24	0,84	313	473	5,89
Q2	Río Renaico en Longitudinal	Río Mininco en Longitudinal	10,84	1,97	0,67	346	412	8,54
Q3	Río Mininco en Longitudinal	Río Vergara en Tijeral	1,04	0,27	0,87	522	11	0,49
Q4	Río Malleco en La Laguna	Río Trancura antes Río Llafenco	-1,70	0,05	0,88	88	404	4,33
Q6	Río Los Sauces en Las Balsas	Río Allipén en Los Laureles				6	726	
Q7	Rio Rahue en Quebrada Culen	Río Traiguén en Victoria	-0,41	1,57	0,92	183	543	7,18
Q8	Río Vergara en Tijeral	Río Purén en Tranamán	-11,96	6,87	0,86	435	229	5,95
Q10	Río Purén en Purén	Río Purén en Tranamán	0,71	0,93	0,88	117	547	3,71
Q13	Río Dumo en Santa Ana	Río Traiguén en Victoria	-0,06	0,51	0,94	308	418	5,53
Q14	Río Quino en Longitudinal	Río Traiguén en Victoria	0,38	3,04	0,93	584	142	5,84
Q15	Estero Chufquén en Chufquén	Río Traiguén en Victoria	-1,08	5,39	0,94	292	434	6,30
Q16	Río Quillén en Longitudinal	Río Traiguén en Victoria	-0,12	1,33	0,76	254	472	0,78
Q19	Río Cholchol en Nueva Imperial	Río Cholchol en Cholchol	-4,03	1,25	0,88	144	564	1,85
Q20	Río Blanco en Curacautín	Río Cautín en Cajón	0,66	0,05	0,88	307	429	3,1
Q22	Río Collín en Codahue	Río Muco en Puente Muco	0,68	0,55	0,97	180	542	11,61
Q26	Río Huichahue en Faja 24000	Río Muco en Puente Muco	0,03	0,50	0,89	332	390	4,06
Q28	Río Cautín en Almagro	Río Quepe en Quepe	8,88	2,94	0,92	534	71	0,78
Q29	Río Allipén en Melipeuco	Río Allipén en Los Laureles	26,49	0,36	0,79	325	461	9,58
Q31	Río Curaco en Colico	Río Allipén en Los Laureles	-22,18	0,53	0,87	256	530	5,31
Q32	Río Trancura en Curarrehue	Río Allipén en Los Laureles	-8,41	0,29	0,88	511	275	4,34
Q33	Río Trancura antes Río Llafenco	Río Trancura en Curarrehue	14,26	3,31	0,94	481	40	1,65
Q34	Río Liucura en Liucura	Río Trancura antes Río Llafenco	-2,66	0,30	0,87	440	52	0,38
Q36	Río Toltén en Coipue	Río Toltén en Villarrica	-5,41	1,28	0,81	328	647	4,00
Q38	Río Donguil en Gorbea	Río Puyehue en Quitratue	0,21	4,61	0,95	561	200	3,53
Q39	Río Mahuidanche en Santa Ana	Río Donguil en Gorbea	2,89	0,49	0,93	302	278	2,51
Q40	Río Toltén en Teodoro Schmidt	Río Donguil en Gorbea	219,23	10,34	0,91	260	320	0,71

[Fuente: Elaboración propia]

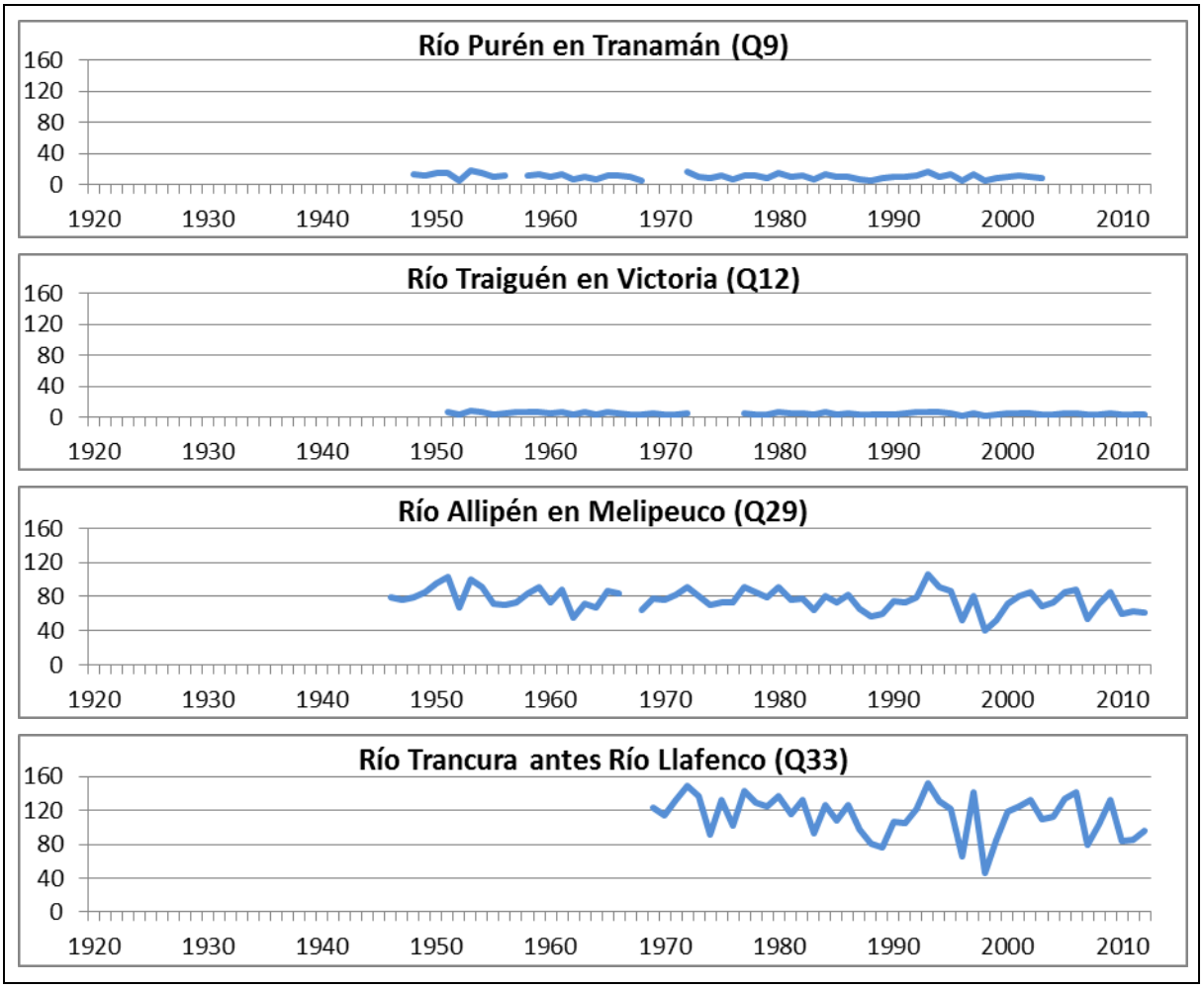
ΔS es el cambio porcentual de la desviación estándar antes y después de rellenar

Se puede apreciar que los valores de los coeficientes de determinación (R^2) son en general altos, lo que se traduce en regresiones adecuadas para rellenar los datos, con valores de R^2 mayores a 0,67. Los cambios porcentuales (en valor absoluto) de la desviación estándar antes y después de rellenar (Δs) son en promedio de 4% (valor absoluto) y el mayor cambio porcentual ocurre en la estación Río Collín en Codahue

(Q22), donde la desviación estándar pasa de 11,6 a 12,9. El Anexo C.9 muestra el detalle de las regresiones utilizadas para rellenar las estadísticas.

La estación Río Los Sauces en Las Balsas (Q6) tiene buena correlación con las estaciones que podrían rellenar sus datos, pero esta correlación se calcula con una cantidad extremadamente limitada de datos en común (N_1 igual a 6). Además sus registros van entre los años 1929 a 1946, por este motivo son pocas las estaciones con las que se puede rellenar y tienen una cantidad muy baja de datos en común. Considerando lo anterior se descartó el relleno y uso de esta estación en los posteriores análisis.

Utilizando la Ecuación 4-1 y las relaciones de la Tabla 4-9 se realizó el relleno de los datos. La Figura 4-20 muestra las series de caudales anuales de las estaciones usadas con frecuencia para rellenar los datos en el presente estudio. Los años sin datos no se muestran en las series.



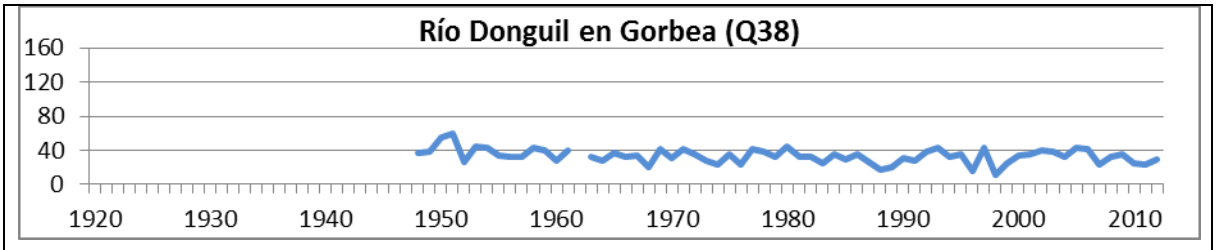


Figura 4-20. Series de caudal anual desde 1920 a 2012 en estaciones más utilizadas para rellenar. (m^3/s)

4.3.2.2 Caudales mensuales rellenados

La Tabla 4-10 resume los promedios de las series de caudales ya rellenados. Los resultados se presentan para cada mes, para los promedios de los caudales de invierno, verano y para el año hidrológico. Para el cálculo de los promedios se consideraron toda la estadística de las series rellenadas. Se consideró un periodo desde 1920 en adelante, sin embargo la mayoría de las estaciones tienen datos desde 1960. Para el cálculo de los promedios de temporadas se consideraron todos los años con 5 o más meses con información, para el promedio anual, todos los años con 10 o más de meses de información.

Tabla 4-10: Promedios de las series de caudales (m^3/s).

No.	AB	MA	JU	JU	AG	SE	OC	NO	DI	EN	FE	MA	IN	VE	AN
Q1	15	31	45	49	41	38	37	32	28	19	14	13	37	24	30
Q2	17	40	88	102	93	71	46	35	26	17	12	13	69	25	47
Q3	3	12	29	41	37	27	17	11	6	3	3	2	24	7	16
Q4	2	5	9	9	7	6	6	5	3	1	1	1	6	3	4
Q5	12	45	85	96	77	42	32	19	13	7	5	6	60	14	34
Q7	1	6	15	18	16	11	6	3	2	1	1	1	11	2	7
Q8	15	63	114	149	122	92	55	34	20	12	13	12	93	25	59
Q9	4	9	17	23	21	17	11	8	5	4	3	3	15	6	10
Q10	5	9	16	24	20	16	10	8	5	5	4	5	15	6	11
Q11	4	14	35	49	41	31	17	10	7	4	3	3	29	7	18
Q12	1	4	10	12	10	7	4	3	2	1	1	0	7	2	5
Q13	0	2	5	6	5	4	2	1	1	0	0	0	4	1	2
Q14	3	14	30	38	31	22	14	8	5	3	2	2	23	6	14
Q15	4	23	52	63	53	38	21	12	8	5	3	3	39	9	24
Q16	2	6	12	16	13	10	6	3	3	2	1	1	10	3	6
Q17	7	19	42	49	38	26	16	11	8	6	6	6	30	9	20
Q18	31	114	285	347	278	189	119	77	52	32	23	22	206	54	131
Q19	48	153	349	426	355	235	135	100	76	55	33	29	262	71	166
Q20	3	8	14	15	13	11	9	7	5	4	3	2	11	5	8
Q21	50	110	170	172	157	138	121	104	85	58	47	42	133	76	104
Q22	6	16	30	33	28	22	15	11	8	5	4	4	22	8	15
Q23	9	27	52	58	50	39	26	18	14	7	6	5	39	13	26
Q24	56	138	248	277	237	202	159	123	93	57	45	41	194	86	140
Q25	19	36	53	58	47	41	34	29	24	19	17	16	42	23	33
Q26	5	14	27	30	26	19	12	9	7	4	3	3	20	6	13
Q27	34	87	164	192	161	129	93	68	53	31	24	22	128	49	88
Q28	93	262	514	573	472	386	282	224	157	86	74	74	383	150	268
Q29	52	77	100	103	94	87	86	82	72	60	53	52	85	67	77
Q30	82	150	211	222	196	172	153	139	118	89	76	72	173	108	140
Q31	23	56	96	99	82	68	55	50	41	23	17	14	70	33	52
Q32	14	36	54	55	45	41	37	34	25	16	12	11	41	22	32
Q33	51	117	197	194	160	142	138	124	97	59	46	39	143	84	114

No.	AB	MA	JU	JU	AG	SE	OC	NO	DI	EN	FE	MA	IN	VE	AN
Q34	15	35	58	55	45	42	38	33	24	14	10	9	41	21	31
Q35	138	236	384	432	398	368	315	288	244	182	145	130	327	217	273
Q36	181	284	492	559	507	470	410	363	306	220	164	160	416	270	344
Q37	2	8	15	18	15	11	7	4	3	2	1	1	12	3	7
Q38	8	31	71	84	69	54	32	20	13	8	4	5	53	14	34
Q39	7	18	38	45	35	26	19	12	9	6	5	4	28	9	19
Q40	271	516	917	1100	883	720	610	473	390	297	249	232	740	376	552

Las estadísticas de las series consideradas en el estudio, que fueron o no rellenadas y los estadísticos principales de las series (número de datos, promedio, desviación estándar, coeficiente de asimetría, mínimo y máximo) se muestran en el Anexo C.10.

4.3.3 Análisis de caudales

4.3.3.1 Magnitud de los caudales y efecto de la altura

Los datos de caudales muestran un comportamiento pluvial, con mayores caudales en los meses de invierno que en los de verano. Esto es coincidente con el comportamiento de las precipitaciones. Los caudales de verano son en promedio un 40% de los del invierno. Los valores de caudal anual promedio son similares a los presentados en el Balance Hidrológico Nacional Regiones VII, IX y X (BHN) y se comparan con los del presente estudio en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11: Comparación de caudales del BHN con el presente estudio. (m^3/s).

No.	Caudales (m^3/s)	
	BHN	Presente estudio
Q1	30	30
Q5	28	34
Q8	68	59
Q9	11	10
Q11	21	18
Q12	5	5
Q19	131	166
Q25	36	33
Q27	100	88
Q28	284	268
Q30	146	140
Q31	45	52
Q32	33	32
Q33	119	114
Q34	32	31
Q35	276	273
Q36	323	344
Q37	8	7
Q38	33	34
Q40	609	552

Por otra parte, se calcularon las producciones específicas (caudal anual promedio por unidad de área de la cuenca) de las cuencas aportantes a cada estación fluviométrica, obteniéndose los resultados indicados en la Tabla 4-12. De acuerdo a estos valores se

puede establecer que las mayores producciones ocurren en las cuencas de cabecera, con valores mayores a 80 L/s/Km^2.

Tabla 4-12: Producciones específicas de las cuencas aportantes a las estaciones fluviométricas (L/s/Km^2).

No.	Área aportante (Km^2)	Altura centroide (m.s.n.m.)	Producción específica (L/s/Km2)
Q1	467	1480	64,7
Q2	697	896	66,9
Q3	436	419	36,5
Q4	35	1043	125,8
Q5	413	688	82,5
Q7	675	218	10,2
Q8	2401	247	24,6
Q9	24	170	30,8
Q10	315	376	33,6
Q11	791	163	22,9
Q12	100	595	45,5
Q13	83	484	27,5
Q14	301	520	47,7
Q15	724	379	33,0
Q16	147	423	42,4
Q17	709	256	27,7
Q18	5052	178	25,9
Q19	5731	251	29,0
Q20	35	581	79,5
Q21	1332	1064	78,1
Q22	259	584	58,0
Q23	653	477	39,6
Q24	2820	645	49,8
Q25	384	701	85,6
Q26	348	563	38,0
Q27	1617	408	54,7
Q28	5565	355	48,1
Q29	820	1668	93,3
Q30	1625	462	86,0
Q31	420	1081	123,9
Q32	356	872	89,1
Q33	1342	469	84,8
Q34	354	711	89,0
Q35	2652	1342	102,8
Q36	3461	436	99,3
Q37	131	126	55,6
Q38	753	377	44,5
Q39	384	101	48,3
Q40	7917	970	69,7

La Figura 4-21 muestra la producción especifica en función de la altura del centroide de la cuenca aportante a la estación fluviométrica. Esta figura muestra una correlación importante entre la altura del centroide y la producción especifica. A mayor altura la producción tiende a ser mayor. Los valores más altos de producción especifica se

observan en cuencas con centroide ubicados alrededor de los 1000 m.s.n.m. y corresponden a las estaciones Río Malleco en La Laguna (Q4) y Río Curaco en Colico (Q31). Estas estaciones drenan las precipitaciones que caen sobre la cordillera de Los Andes, donde la escorrentía es muy alta. La mayor producción con la altura se debe a la presencia de mayores precipitaciones y al hecho de que el terreno es principalmente basamento, con una baja capacidad de infiltrar la precipitación.

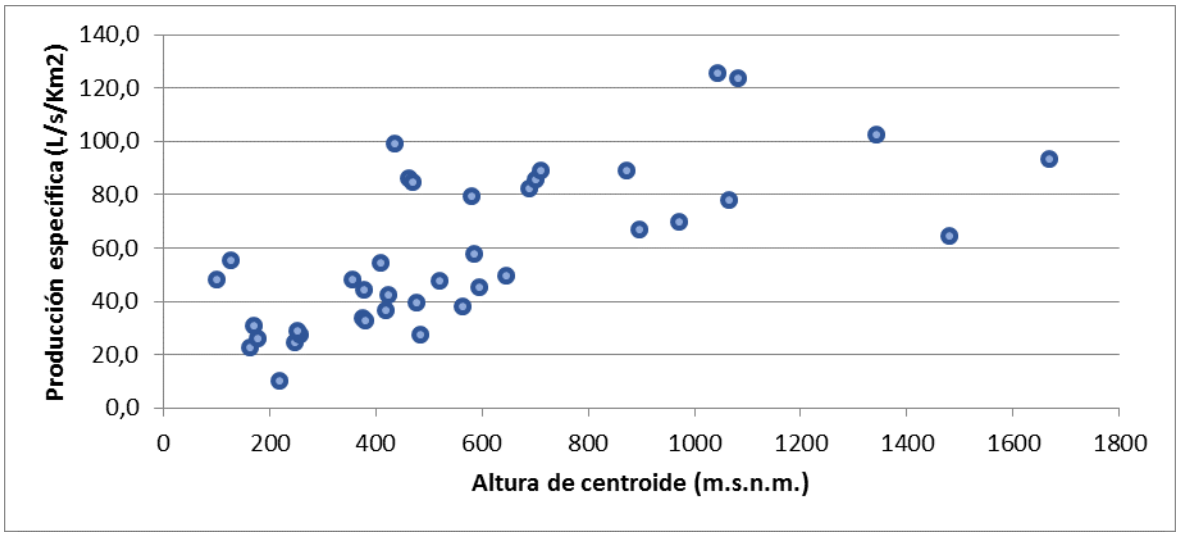


Figura 4-21. Producción especifica en función de la altura del centroide de la cuenca aportante a la estación fluviométrica.

Los mayores caudales ocurren en la estación Río Toltén en Teodoro Schmidt (Q40), Río Cholchol en Nueva Imperial (Q19) y Río Cautín en Almagro (Q28). Estás estaciones se ubican a baja altitud y poseen grandes áreas aportantes. También se aprecian caudales de gran magnitud en las estaciones Río Toltén en Coipue (Q36) y Río Toltén en Villarrica (Q35) que pertenecen al río Toltén, tienen área aportantes de gran tamaño y se encuentran a 200 y 250 m.s.n.m. respectivamente. De un total de 40 estaciones sólo 9 superan los 100 m^3/s como caudal promedio anual.

No se realizó un análisis de autocorrelación temporal para los caudales ya que al verificarse que las precipitaciones no poseen esta característica, es de esperar que los caudales medios tampoco la tengan, ya que las lluvias determinan de manera importante la magnitud de los caudales.

4.3.3.2 Analisis de frecuencia de caudales

Se consideraron los mismos modelos de distribución de probabilidades, la misma consideración para los valores nulos, el mismo test estadístico y metodología para comparar la bondad de ajuste (Test de Chi-Cuadrado) utilizados en la sección 4.2.3 de análisis de precipitaciones.

Los resultados del test de Chi-cuadrado no favorecen a una distribución en particular que pueda representar todos los meses y los valores de temporadas. Es claro que la distribución Gamma de dos parámetros no logra ajustarse a los datos. Para las series mensuales es la distribución Log Normal la que presenta mejor ajuste y para las

temporadas veraniegas, invernales y anuales, la distribución Normal es la que obtiene menor número de rechazos del test. Estos resultados respaldan la noción teórica de que los valores de temporadas y anuales tiendan a distribuirse de forma simétrica (Normal), ya que promedian los eventos ocurridos a lo largo de varios periodos y los valores extremos se ven atenuados al promediarse en la temporada. Los estadígrafos calculados en el test de Chi-Cuadrado pueden revisarse en detalle en el Anexo C.11.

La Figura 4-22 presenta un resumen de los caudales para probabilidades de excedencia de 5, 20, 50, 85 y 95% para las estaciones ubicadas en la región. Se utilizó la distribución Log Normal para las series mensuales y la distribución Normal para las series de temporadas veraniegas, invernales y anuales en las estaciones analizadas.

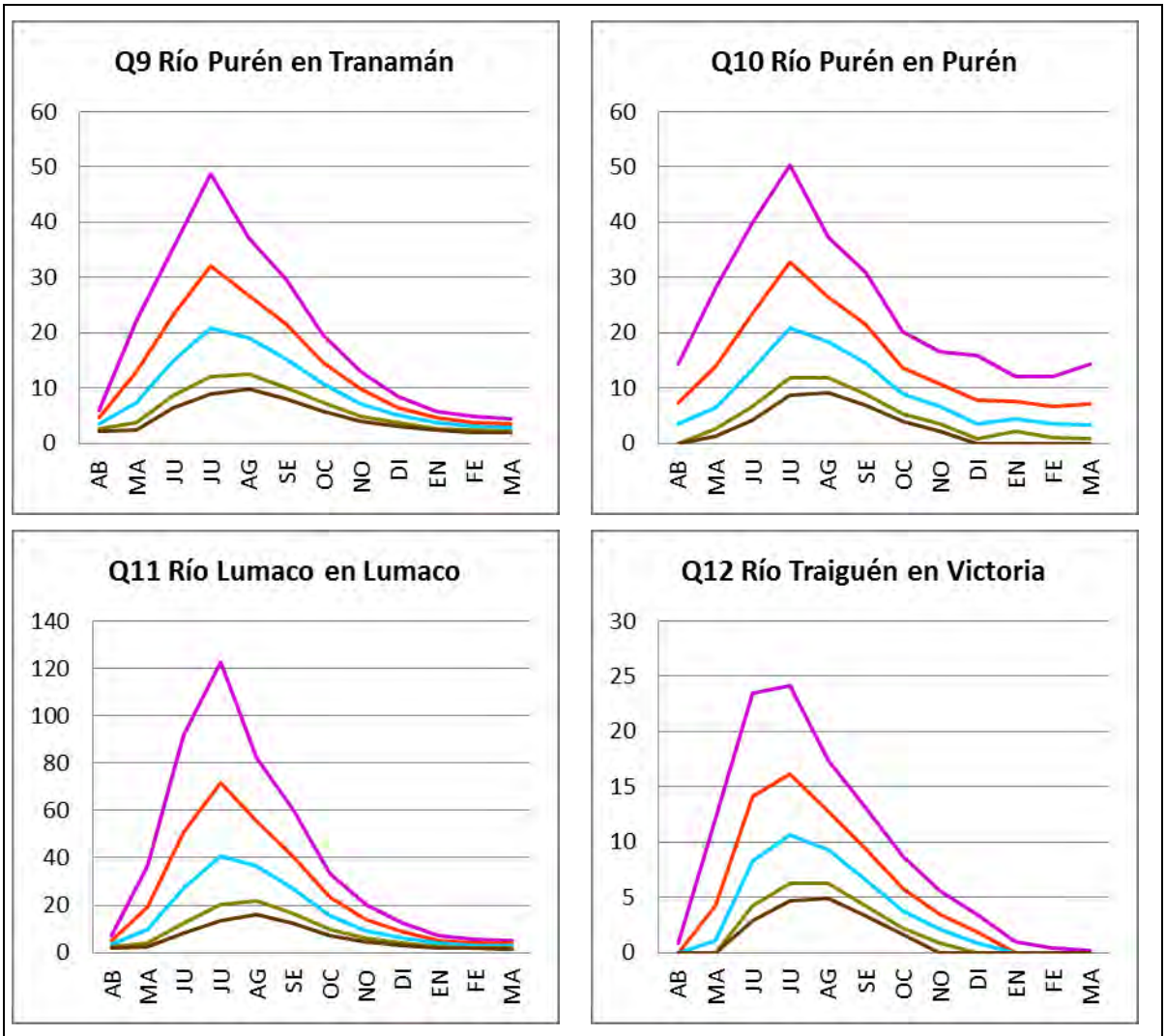


Figura 4-22. Caudales para diferentes probabilidades en estaciones ubicadas en la región de La Araucanía (m^3/s).

Probabilidades de excedencia: rosado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

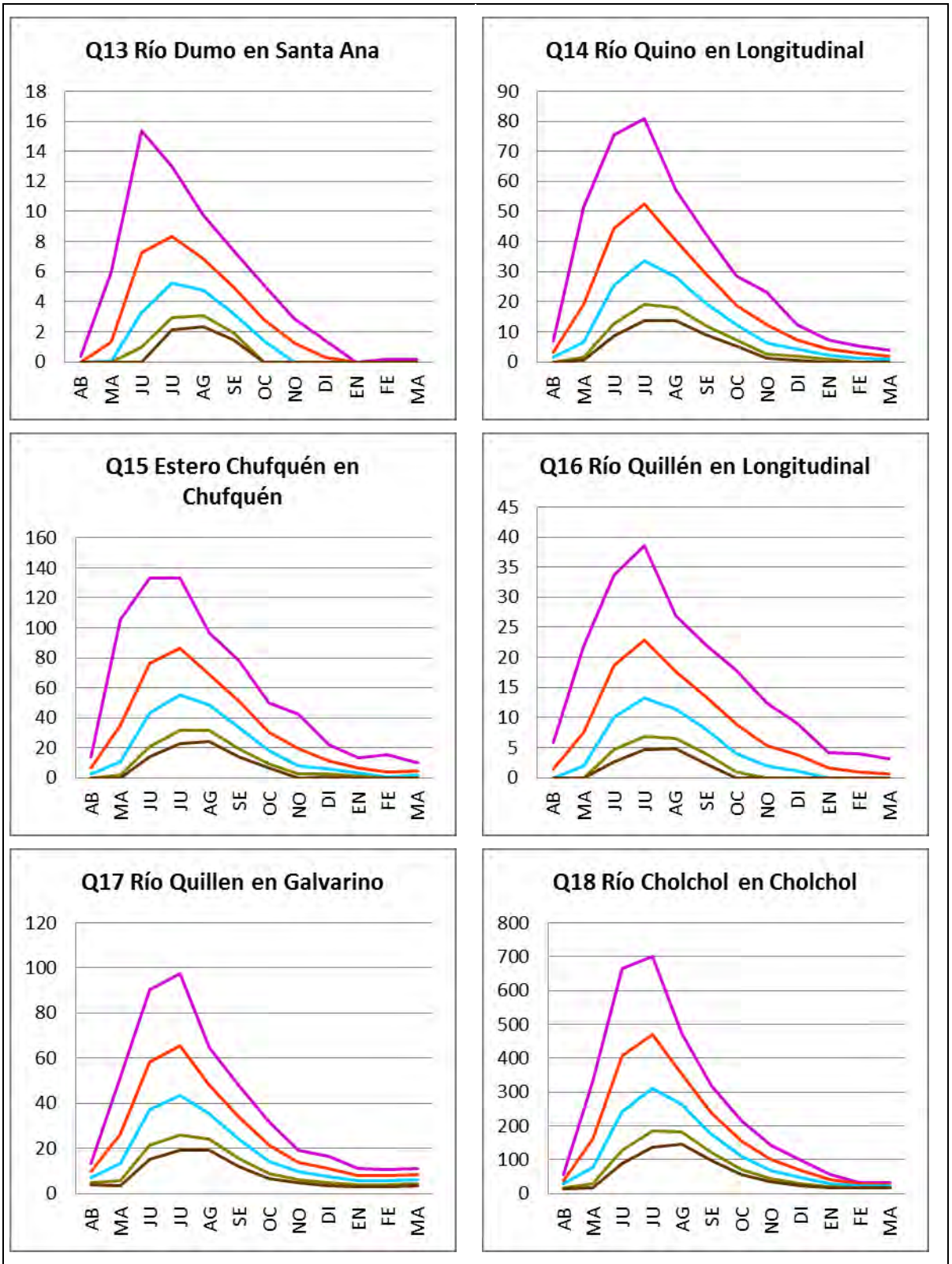


Figura 4-22. Caudales para diferentes probabilidades en estaciones ubicadas en la región de La Araucanía (m^3/s). (Continuación)

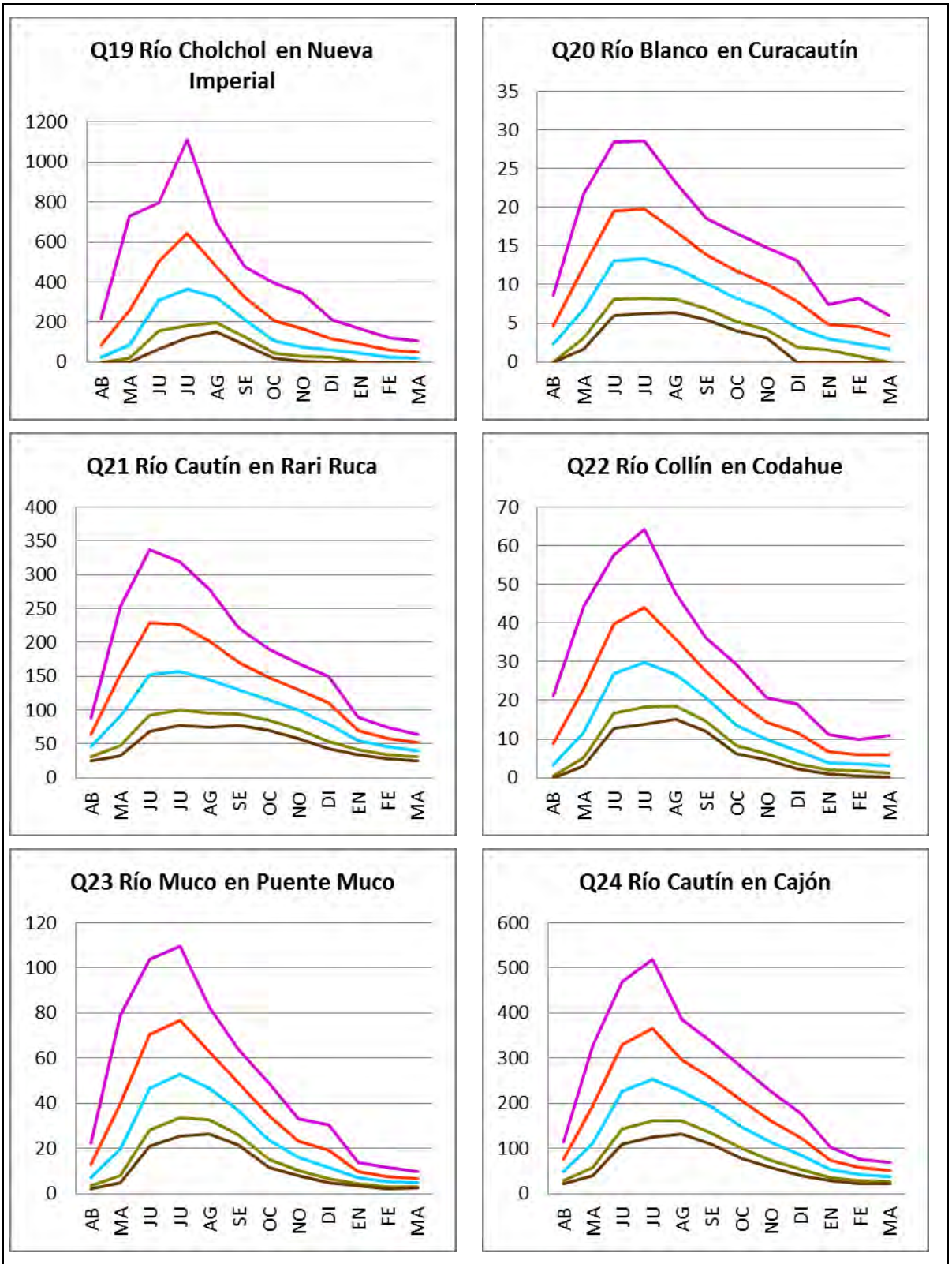


Figura 4-22. Caudales para diferentes probabilidades en estaciones ubicadas en la región de La Araucanía (m^3/s). (Continuación)

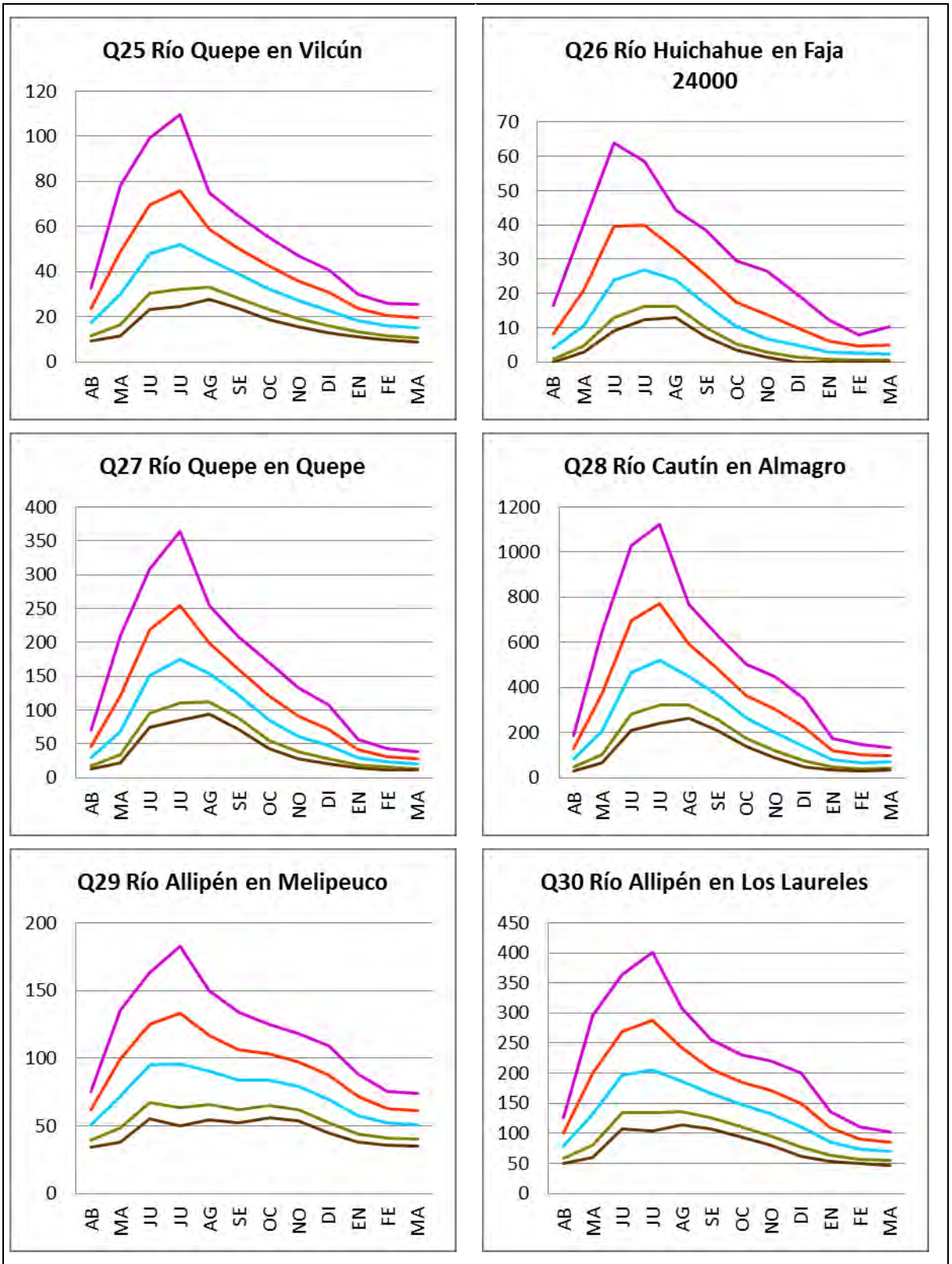


Figura 4-22. Caudales para diferentes probabilidades en estaciones ubicadas en la región de La Araucanía (m^3/s). (Continuación)

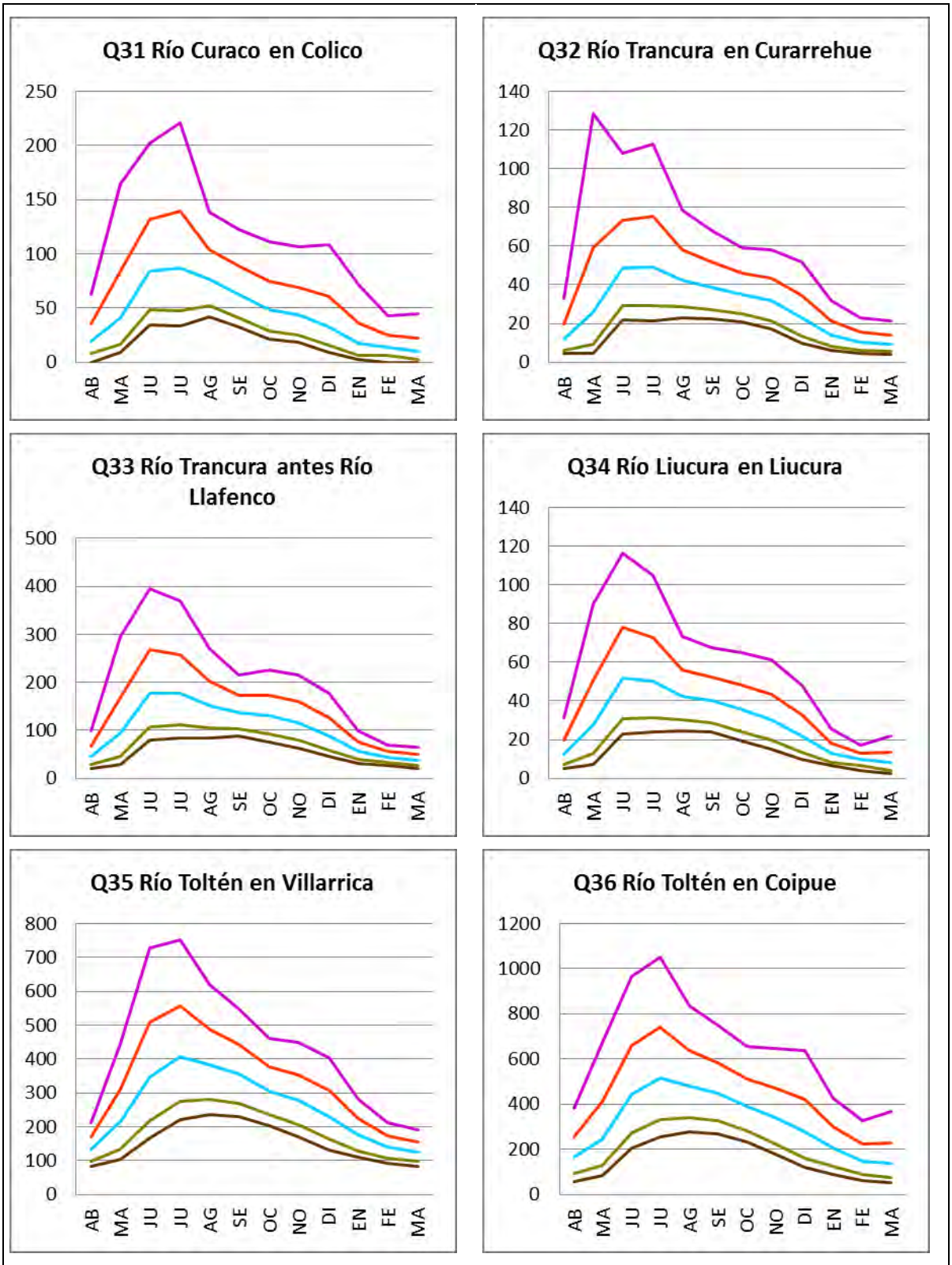


Figura 4-22. Caudales para diferentes probabilidades en estaciones ubicadas en la región de La Araucanía (m^3/s). (Continuación)

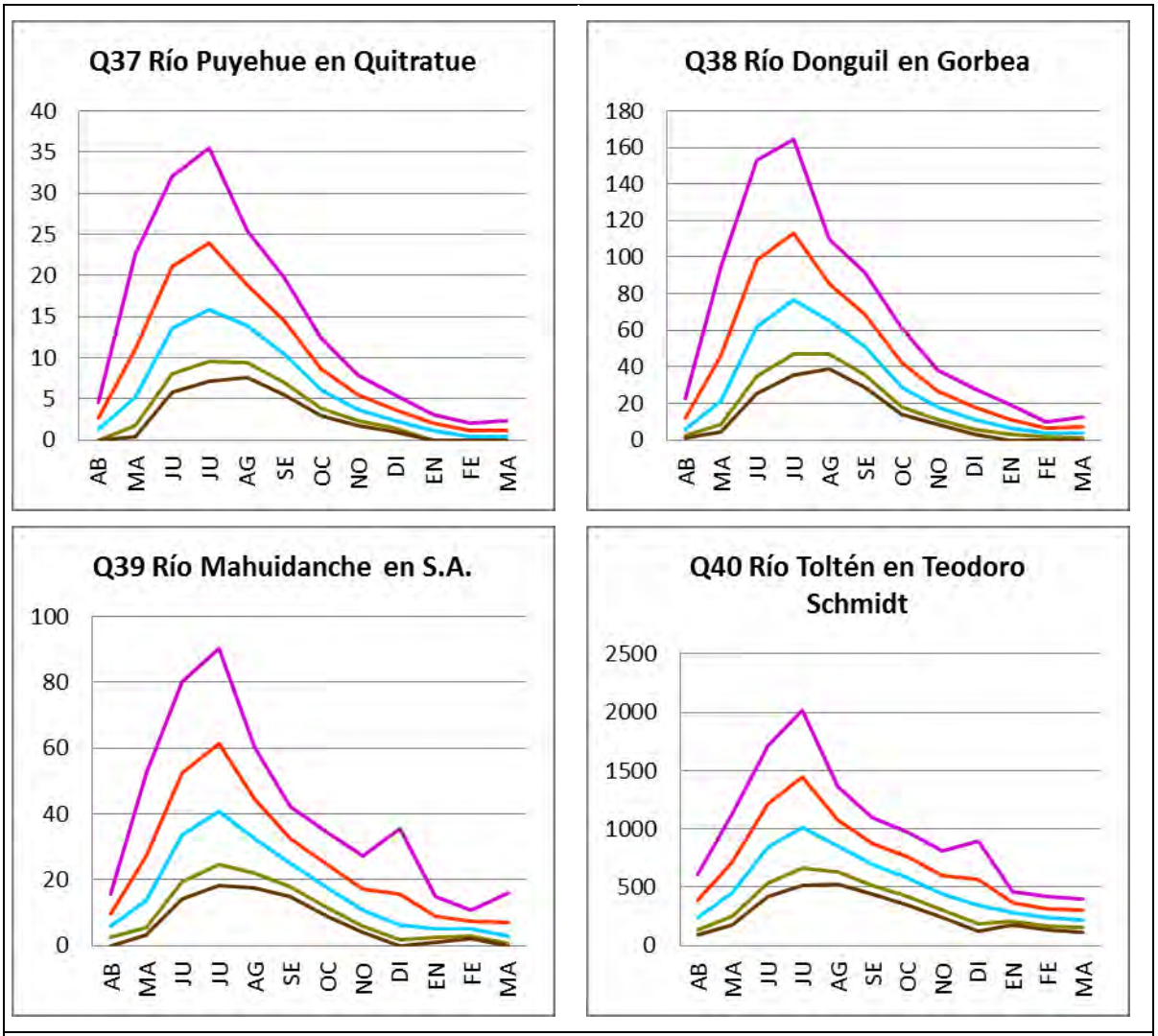


Figura 4-22. Caudales para diferentes probabilidades en estaciones ubicadas en la región de La Araucanía (m^3/s). (Continuación)

Probabilidades de excedencia: rosado 5%, rojo 20%, celeste 50%, verde 85% y café 95%

4.3.4 Conclusiones fluviometría

El análisis fluviométrico realizado permite concluir lo siguiente:

1. Existe una red fluviométrica adecuada para caracterizar los caudales en la región que tiene 54 estaciones, de las cuales se consideraron 40 por tener más de 10 años de registros, y 14 de ellas poseen más de 50 años de registro.
2. Los promedios de los caudales anuales varían entre 3 y 552 m^3/s. Por otro lado los coeficientes de variación tienen un promedio de 0,26 y están en el rango entre 0,16 y 0,36 (No se considera la estación Q5 que presenta un coeficiente de variación de 0,94). También se observó que los coeficientes de asimetría son cercanos a 0 y varían entre -0,71 y 1,07 (No se considera la estación Q5 que presenta una asimetría de 5,46).

3. Los coeficientes de variación de los caudales anuales al ser menores a 0,36 indican que el valor del caudal anual varía poco en relación a su promedio, y por consiguiente la probabilidad de tener caudales comprendidos entre 0,7 y 1,3 veces el promedio es alta.
4. Los caudales mensuales están bien representados por un modelo de distribución Log Normal y los caudales estacionales y anuales están bien representadas por un modelo de distribución Normal de dos parámetros.
5. 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 más impermeables, lo que produce una menor infiltración y una mayor escorrentía superficial.

4.4 CARACTERIZACIÓN DE EVAPORACIÓN DE LAS CUENCAS

El objetivo del análisis de evaporación y evapotranspiración es contar con un conocimiento de la evaporación en la región, dado que es un componente clave del balance hídrico. Considerando lo anterior, se carcateriza dicha componente de forma tal de estimar esta variable en toda el área de estudio, tanto a nivel mensual, estacional y anual. Lo anterior implica contar con una estimación de los estadísticos principales del valor mensual, estacional y anual; el modelo probabilístico que representa la evaporación; la evaporación asociada a distintas probabilidades; las relaciones para estimarla en puntos sin registros y la variación espacial y temporal de la evaporación. Las estaciones analizadas se ubican en las cuencas del río Imperial, Toltén y las cuencas costeras de la región. A continuación se muestran las características de las estaciones que tienen datos disponibles de evaporación mensual de tanque en el área de estudio. Se realiza el relleno y análisis de la información para disponer de series de evaporación más extensas. Finalmente se presenta un análisis estadístico e hidrológico de las series anuales, estacionales y mensuales.

4.4.1 Estaciones evaporimétricas seleccionadas

En las cuencas de la región de La Araucanía existe una cantidad baja de estaciones con registro de evaporación de tanque controladas por la DGA. Los registros originales se muestran en el Anexo C.12. Las características principales de las estaciones seleccionadas se indican en la Tabla 4-13. A cada estación se le asignó un número para facilitar su identificación. Las estaciones con menos de 120 datos mensuales (10 años) en su registro no fueron consideradas.

Tabla 4-13: Características de las estaciones evaporimétricas seleccionadas.

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altura	Registro	Estado
E1	Ercilla (Vida Nueva)	08353001-4	5785997	722382	250	1998-2011	V
E2	Angol (La Mona)	08358002-K	5815957	708089	101	1976-2012	V
E3	El Vergel (Angol)	08358003-8	5811793	706858	75	1981-1996	NV
E4	Traiguén	09105002-1	5763093	705310	234	1979-2010	V
E5	Manzanar	09120002-3	5739282	264487	790	1972-1989	NV
E6	Malalcahuello	09120003-1	5738790	275321	950	1988-2012	V
E7	Puerto Saavedra	09153001-5	5705383	639523	5	1979-2011	V

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altura	Registro	Estado
E8	Pucón	09420002-4	5648450	245489	230	1985-2012	V

[Fuente: DGA]; *WGS-84. - V: Vigente - NV: No Vigente

La Figura 4-23 presenta un resumen de la disponibilidad histórica de estadísticas de evaporación de tanque mensual en las estaciones DGA a partir de 1970 a la fecha. En los análisis estadísticos posteriores fueron considerados los datos mensuales con 11 o más días con registro, ya que la cantidad de datos disponibles para caracterizar la evaporación es relativamente baja.

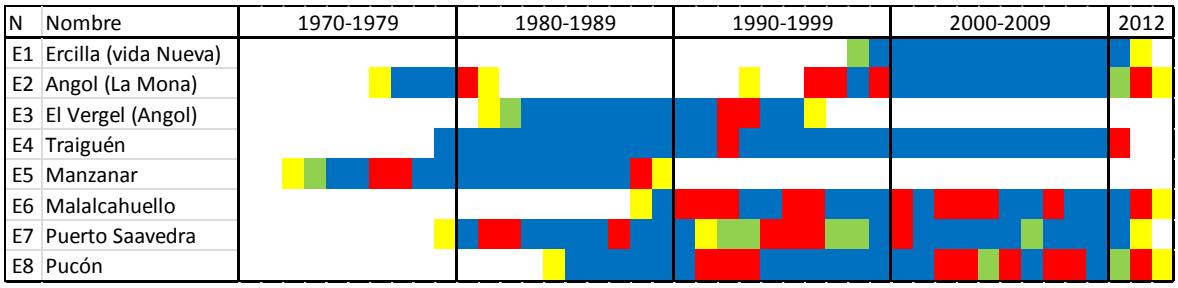


Figura 4-23. Disponibilidad de datos en estaciones con registros de evaporación mensual (Azul: 12 datos, Rojo: entre 10 y 11 datos, Verde: entre 7 y 9 datos, Amarillo: entre 1 y 6 datos por año)

Se observa que pese a poseer pocas estaciones, la red ha ido creciendo constantemente en el tiempo hasta el año 1998. Si bien sus registros comienzan en la década del 70, algunas estaciones presentan series de datos con más de 20 años, y otras presentan 10 años con registros. Del total hay 3 estaciones que tienen más de 25 años con registros y 1 tiene más de 30 años.

La Figura 4-24 muestra la distribución espacial de las estaciones. Se observa que las estaciones se encuentran ubicadas en puntos específicos y periféricos de la región, mientras que la zona media no presenta estaciones.

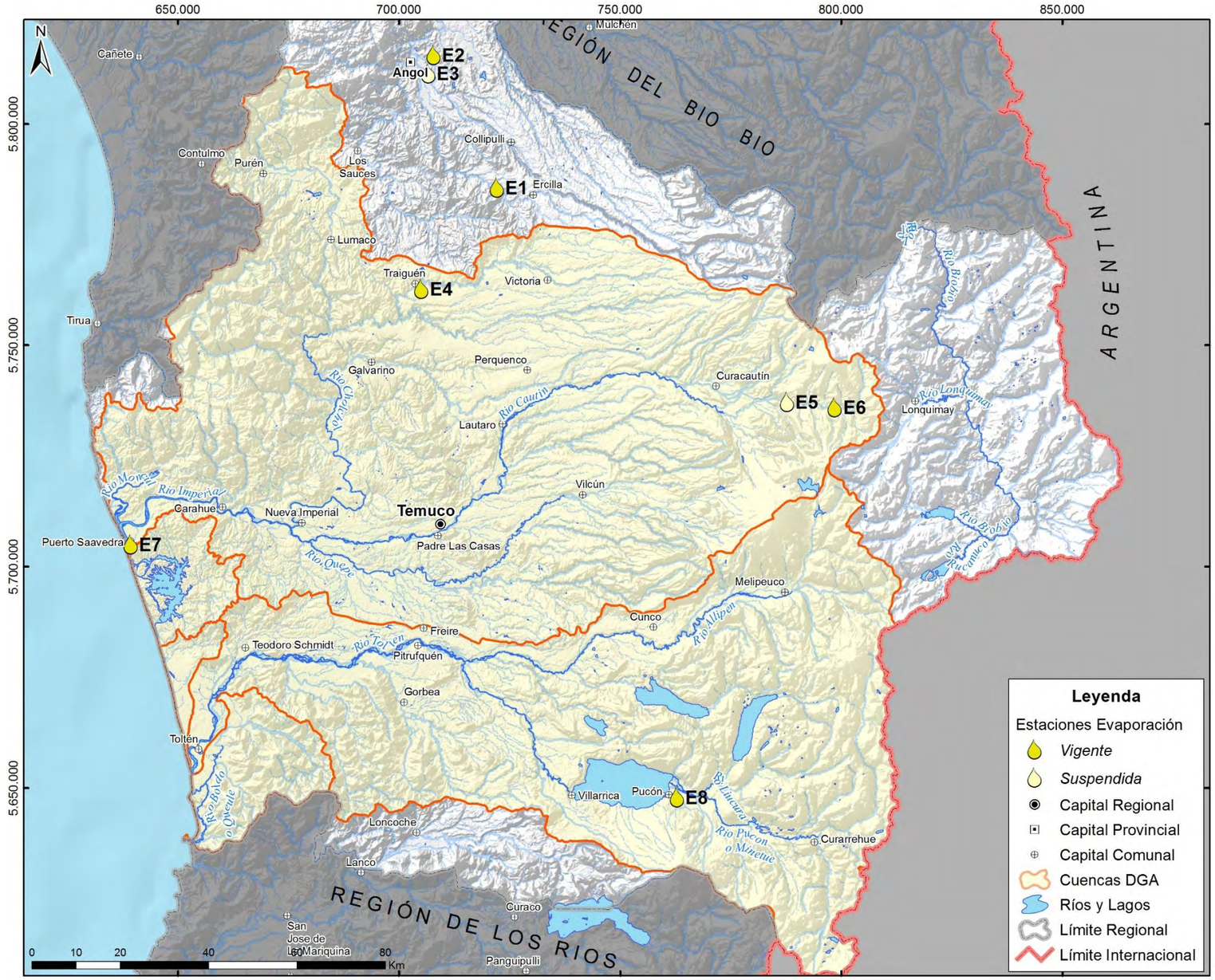


Figura 4-24. Distribución estaciones con registros de evaporación mensual

4.4.2 Corrección y relleno de estadísticas evaporimétricas

4.4.2.1 Análisis de consistencia de evaporaciones anuales

Se analizó la consistencia de las series de datos anuales en cada estación utilizando el método de los residuos acumulados. Este método se explicó en la sección 4.2.2 del presente informe.

El patrón se escoge eligiendo una estación cuyos registros sean confiables. En el presente estudio se seleccionó un patrón, caracterizado por registros largos y con buena correlación con el resto de las estaciones de la cuenca. La estación seleccionada para ello fue Traiguén (E4).

Todas las estaciones presentaron consistencia con el patrón para sus datos anuales según el método de los residuos acumulados. El límite de la elipse se construyó con una probabilidad de cometer error de tipo I de 95%. El Anexo C.13 muestra los resultados del método de los residuos acumulados en las estaciones evaporimétricas.

4.4.2.2 Relleno de datos de evaporación mensual faltantes

Con el objetivo de poder considerar la mayor cantidad de años de registros para el análisis de las condiciones hidrológicas de la cuenca, se completó la estadística rellenando los datos faltantes. Para ello se usaron los datos obtenidos de la DGA, rellenándose con series que poseen un número importante de datos, mediante regresiones de las series de datos mensuales completas, sin hacer diferencia entre un mes y otro. Se consideró un periodo desde 1970 en adelante. La estación utilizada para rellenar en cada caso se eligió de entre las estaciones con buena correlación y que preferentemente se ubican a menos de 50 Km de la estación a rellenar. Para realizar el relleno de forma correcta y mantener las propiedades estadísticas de la serie a rellenar se utiliza la Ecuación 4-1, explicada previamente.

Se buscaron valores anómalos en las series de datos originales con el objetivo de chequear su validez. Estos valores anómalos se definen como un valor que supere al promedio en 6 veces la desviación estándar. Bajo este criterio no se encontraron valores anómalos en las series de datos de evaporación.

Las estadísticas básicas de las regresiones mensuales se resumen en la Tabla 4-14. En esta Tabla, N_1 representa el número de datos comunes disponibles en ambas series y N_2 es el número de datos a rellenar.

Tabla 4-14: Características de las relaciones de evaporación mensual para el relleno de datos faltantes.

No.	Estación a rellenar	Estación que rellena	*a*	*b*	R^2	N_1	N_2	ΔS (%)
E1	Ercilla (Vida Nueva)	Angol (La Mona)	15,24	0,63	0,91	138	92	4,68
E2	Angol (La Mona)	Traiguén	13,46	1,17	0,88	180	195	1,36
E3	El Vergel (Angol)	Traiguén	10,55	1,02	0,88	163	212	1,88
E4	Traiguén	Angol (La Mona)	-0,18	0,76	0,88	180	50	2,70
E5	Manzanar	Traiguén	21,69	0,65	0,85	104	271	5,27
E6	Malalcahuello	Traiguén	18,37	0,66	0,85	237	138	2,96
E7	Puerto Saavedra	Traiguén	32,63	0,42	0,49	313	62	1,42
E8	Pucón	Manzanar	11,41	0,62	0,87	50	124	9,84

[Fuente: Elaboración propia]
ΔS es el cambio porcentual de la desviación estándar antes y después de rellenar.

Se puede apreciar que los valores de los coeficientes de determinación (R^2) son en general altos con excepción de la regresión para la estación Puerto Saavedra (E7) que tiene un valor de R^2 medio (0,49). Las regresiones son adecuadas para rellenar los datos. En particular la regresión para la estación Puerto Saavedra (E7) se juzga adecuada, ya que se rellenan pocos valores (62) y el cambio en la desviación estándar Δs es bajo (1,42). Los cambios porcentuales (en valor absoluto) de la desviación estándar antes y después de rellenar (Δs) son en promedio de 4% (valor absoluto) y el mayor cambio porcentual ocurre en la estación Pucón (E8), donde la desviación estándar pasa de 42,6 a 38,4. El Anexo C.14 muestra el detalle de las regresiones utilizadas para rellenar las estadísticas.

4.4.2.3 Datos de evaporación rellenados

Utilizando la Ecuación 4-1 y las relaciones de la Tabla 4-14 se realizó el relleno de los datos. La Tabla 4-15 resume los promedios de las series de evaporación ya rellenadas. Los resultados se presentan para cada mes, para las temporadas de invierno, verano y para el año hidrológico. Las estadísticas de temporadas se calcularon en los casos con 5 o más meses con información y las anuales con 10 o más de meses de información.

Tabla 4-15: Promedios de las series de evaporación (mm).

No.	AB	MA	JU	JU	AG	SE	OC	NO	DI	EN	FE	MA	IN	VE	AN
E1	58	35	31	26	31	54	75	101	140	163	137	100	228	707	934
E2	76	41	34	31	34	62	102	139	191	234	195	136	274	987	1264
E3	64	33	17	26	35	53	87	129	181	211	161	129	224	897	1120
E4	49	18	14	15	24	45	72	109	157	184	148	111	164	773	941
E5	52	33	34	29	37	48	73	90	125	142	120	97	227	640	873
E6	55	30	22	26	29	44	71	96	120	144	121	97	204	649	851
E7	53	39	34	31	40	45	64	77	102	115	107	89	240	555	795
E8	38	31	23	30	33	47	54	69	95	116	101	73	192	495	688

Las estadísticas de las series consideradas en el estudio, que fueron o no rellenadas y los estadísticos principales de las series (número de datos, promedio, desviación estándar, coeficiente de asimetría, mínimo y máximo) se muestran en el Anexo C.15.

4.4.2.4 Isolíneas de evaporación anual

Las Figura 4-25, Figura 4-26 y Figura 4-27 muestran las isolíneas de evaporación anual y estacional sobre el área de estudio. Las figuras permiten comparar las diferencias de la magnitud de la evaporación entre las estaciones. La interpolación 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.

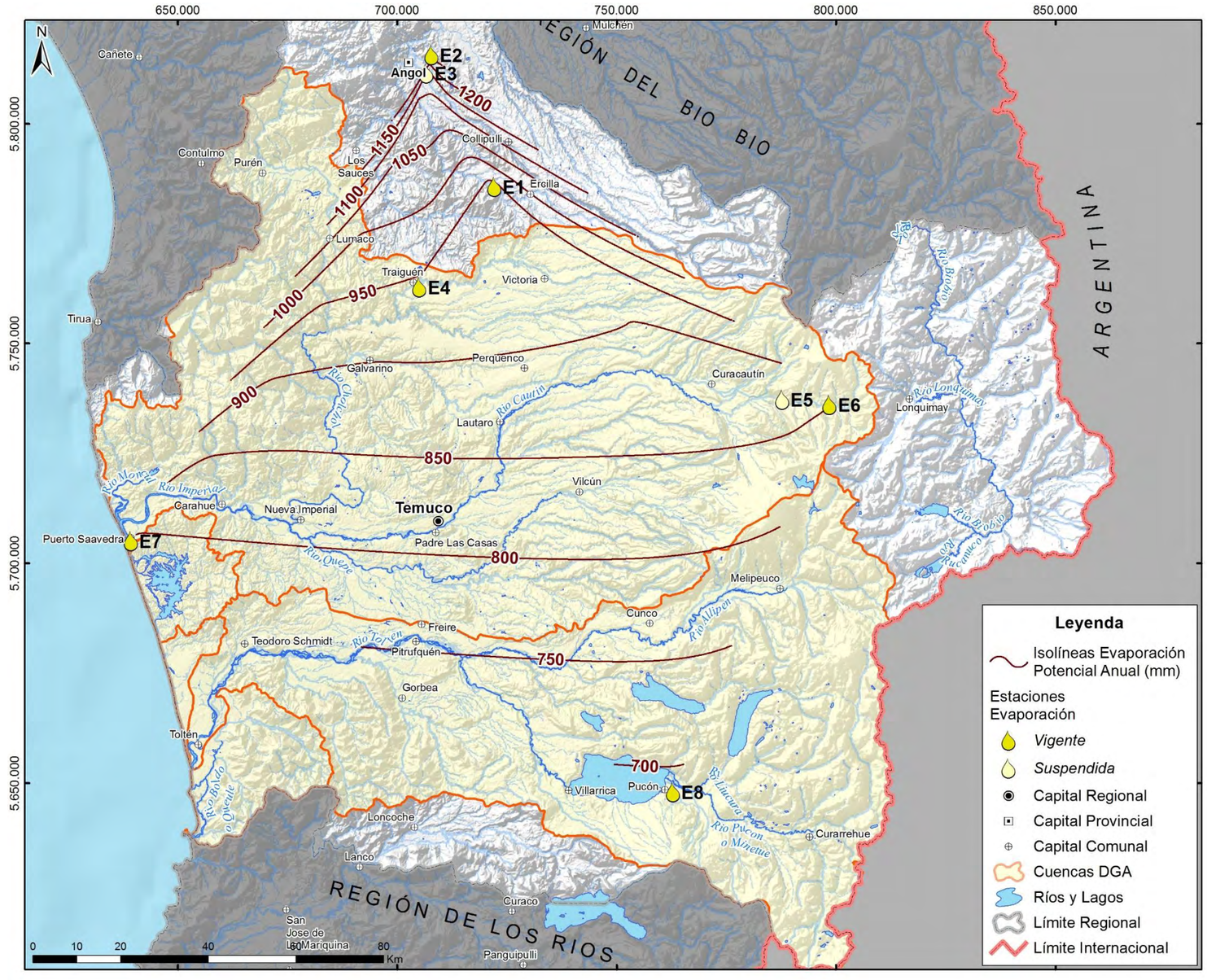


Figura 4-25. Isolíneas de evaporación anual

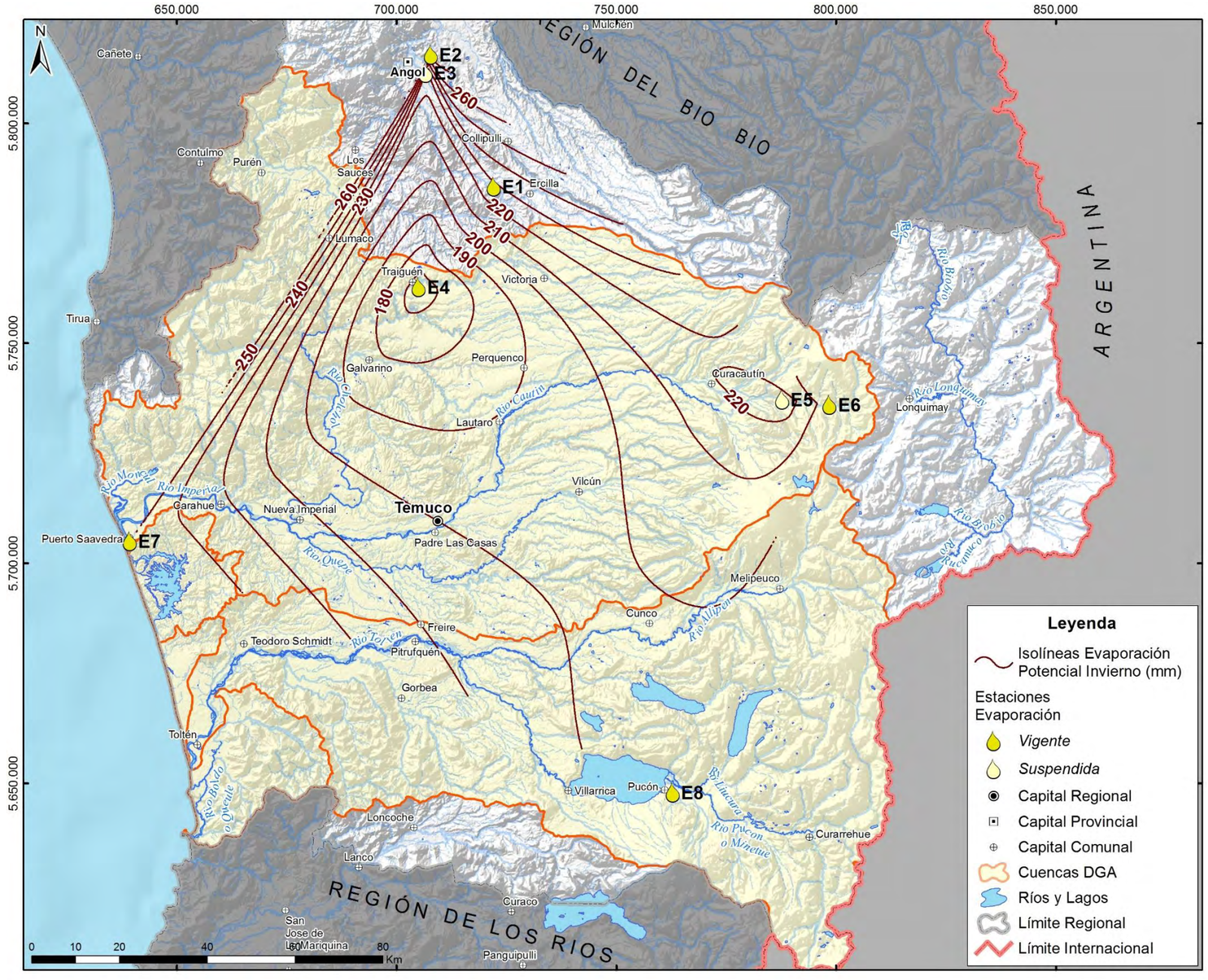


Figura 4-26. Isolíneas de evaporación en invierno

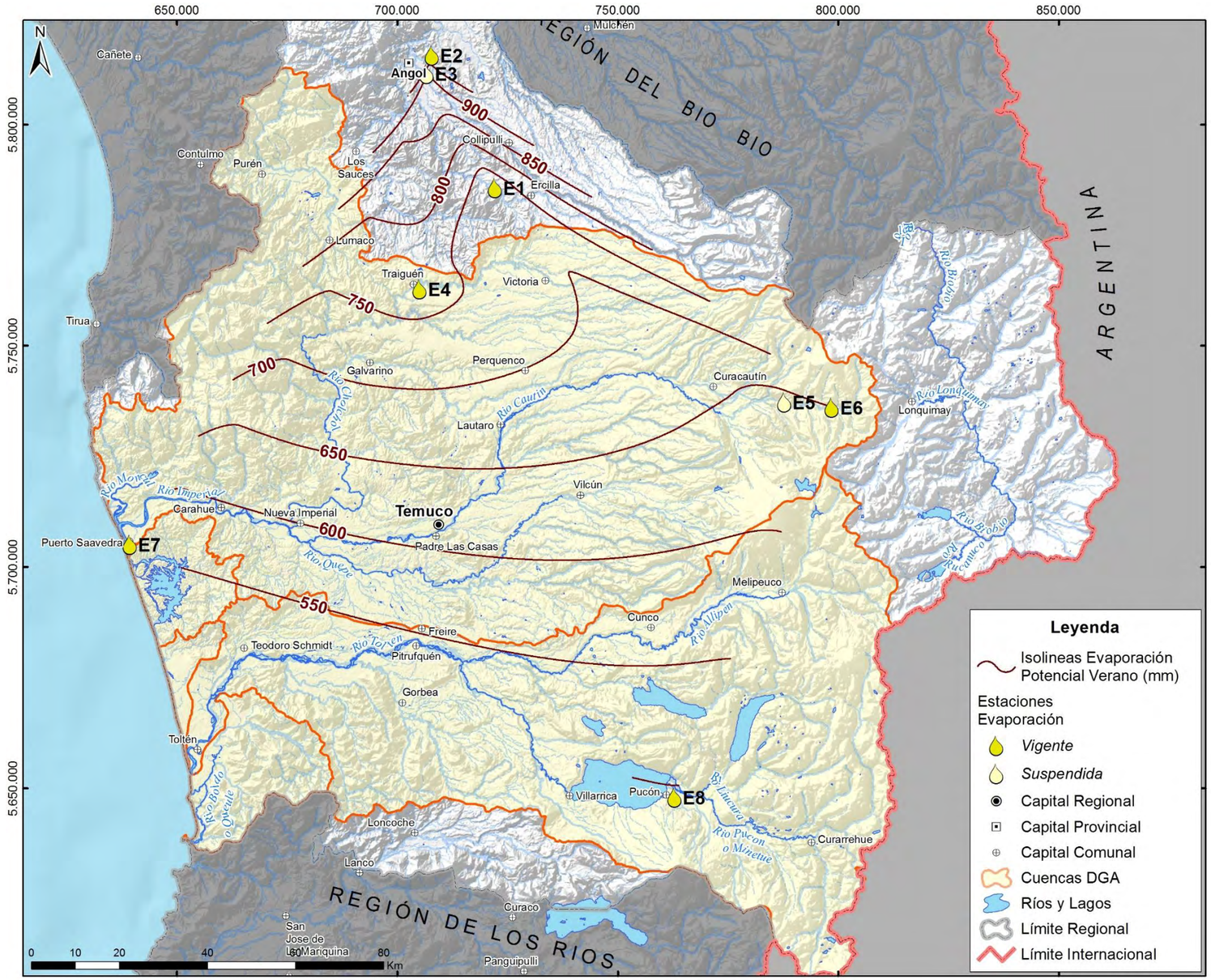


Figura 4-27. Isolíneas de evaporación en verano

4.4.3 Análisis de evaporación

4.4.3.1 Magnitud de la evaporación y efecto de la altura

Los datos muestran mayores valores de evaporación durante los meses de verano. La evaporación de invierno 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. La evaporación para la estación Ercilla (Vida Nueva) (E1) 974 mm, para El Vergel (Angol) (E3), para Traiguén (E4) es 908 mm y para Puerto Saavedra (E7) es de 745 mm.

La Figura 4-28 muestra las evaporación anual en función de la altura de las estaciones. Según las isolíneas y la Figura 4-28, no existe una relación clara entre altura y evaporación de tanque. Las mayores evaporaciones ocurren en las estaciones Angol (La Mona) E2 y El Vergel (Angol) (E3), se ubican alrededor de los 100 m.s.n.m y se ubican al norte del área de estudio. Las menores evaporaciones se observan en las estaciones Puerto Saavedra (E7) y Pucón (E8), ubicadas en la parte sur del área de estudio. La cantidad y ubicación de las estaciones consideradas deja a la zona media de la región sin información confiable.

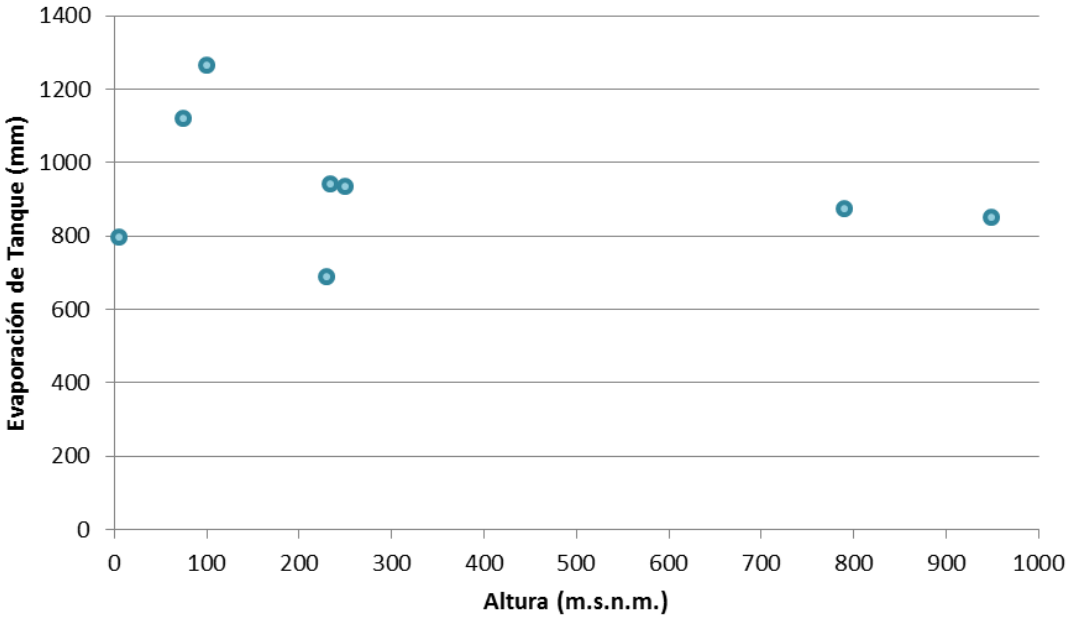


Figura 4-28. Evaporación anual en función de la altura de la estación

4.4.3.2 Auto correlación

No se realizó un análisis de autocorrelación temporal para los datos de evaporación ya que las series fueron rellenadas satisfactoriamente en la sección 4.4.2.

4.4.3.3 Isolíneas de correlación espacial de datos evaporométricos

El análisis determinó las correlaciones de las series de cada estación con el resto de las estaciones para los valores mes a mes. Los resultados muestran una correlación importante de la información mensual entre las estaciones ubicadas al norte de la región (E1 a E4), que se encuentran ubicadas a menos de 50 km. La correlación va empeorando en las estaciones ubicadas hacia el sur. La estación Puerto Saavedra (E7) presenta coeficientes de correlación bajos con el resto de las estaciones. El coeficiente es en promedio igual a 0,68. Por otro lado, la estación que presenta mayor coeficiente de correlación con el resto es Traiguén (E4), con un promedio de 0,87. Al rellenar los datos la correlación espacial empeora ligeramente. La disminución en los coeficientes de correlación es en promedio de 0,03. Los valores de las correlaciones espaciales de las series mensuales de datos de evaporación antes y después de rellenar los valores pueden ser revisados en el Anexo C.16.

4.4.3.4 Análisis de frecuencia de evaporación

Se consideraron los mismos modelos de distribución de probabilidades, la misma consideración para los valores nulos, el mismo test estadístico y metodología para comparar la bondad de ajuste (Test de Chi-Cuadrado) utilizados en la sección 4.2.3 de caracterización pluviométrica. Los resultados del test de Chi-cuadrado favorecen a las distribuciones Normal y Pearson III de igual manera para representar todos los meses y los valores de temporada. De estas dos, se seleccionó la Normal, debido a que es la más conocida, la menos compleja y sólo se necesitan estimar dos parámetros en vez de tres. Por otro lado, es claro que la distribución Gamma de dos parámetros no logra ajustarse a los datos. Los estadígrafos calculados en el test de Chi-Cuadrado pueden revisarse en detalle en el Anexo C.16.

Se obtuvieron curvas de evaporación potencial a partir de las curvas de evaporación de tanque calculadas según el ajuste del modelo Normal. Se utilizó un factor de bandeja típico de 0,70 para transformar los valores de evaporación de tanque en evaporación potencial. Este valor considera un estanque evaporimétrico Clase A, con una velocidad del viento entre 2 y 5 m/s y una humedad relativa del ambiente media (*FAO Irrigation and Drainage Paper* No. 24). La Figura 4-29 presenta un resumen de la evaporación potencial para probabilidades de excedencia de 5, 20, 50, 85 y 95%.

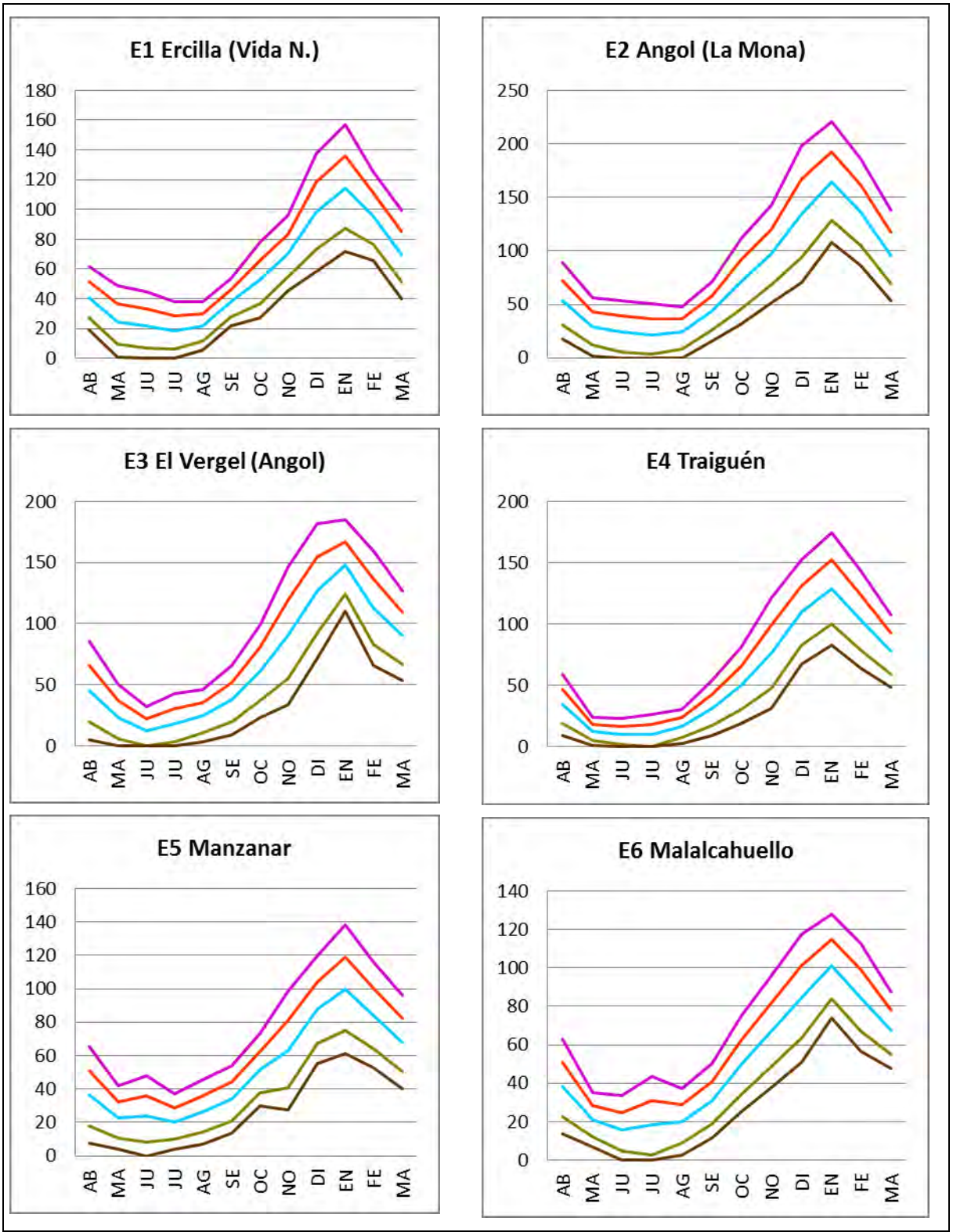
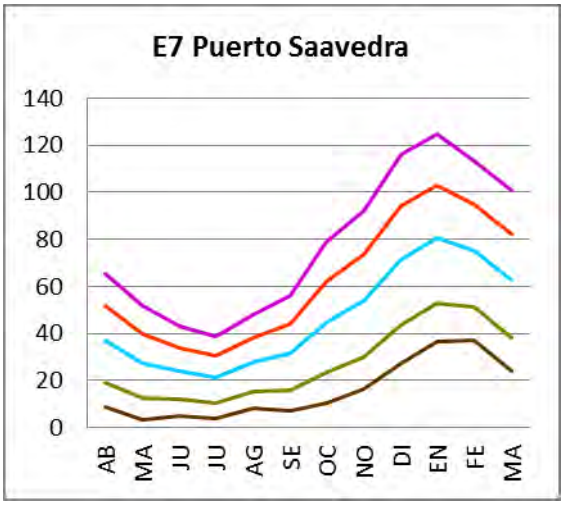


Figura 4-29. Evaporación potencial mensual para diferentes probabilidades en estaciones del área de estudio (mm).



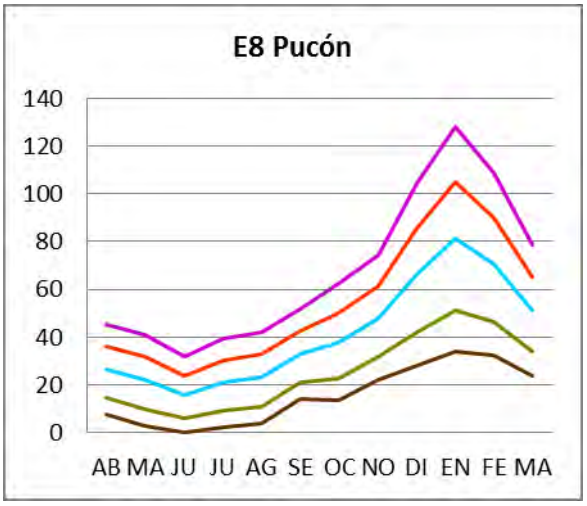


Figura 4-29. Evaporación potencial mensual para diferentes probabilidades en estaciones del área de estudio (mm).

4.4.4 Conclusiones evaporación

El análisis de evaporación realizado permite concluir lo siguiente:

1. No existe una red lo suficientemente extensa y bien distribuida para caracterizar la evaporación en toda la región a partir de mediciones directas. La red tiene 13 estaciones, de las cuales se consideraron 8 por tener más de 10 años de registros. De estas 8, solo 4 tienen más de 20 años de registro. Esta red solo permite caracterizar la evaporación local en un radio cercano a las estaciones consideradas.
2. Los promedios de la evaporación de tanque anual varían entre 688 y 1264 mm. Por otro lado, los coeficientes de variación tienen un promedio de 0,15 y están en el rango entre 0,11 y 0,27. También se observa que los coeficientes de asimetría son cercanos a 0 y varían entre -0,30 y 0,54.
3. Los coeficientes de variación de la evaporación anual, al ser menores a 0,15 indican que el valor de la evaporación anual varía poco en relación a su promedio, y por consiguiente la probabilidad de tener evaporaciones comprendidas entre 0,7 y 1,3 veces el promedio es alta.
4. La evaporación potencial esta bien representada por un modelo de distribución Normal.
5. La variación espacial de la evaporación anual permite caracterizar de forma certera la evaporación en la cercanía de las estaciones y comparar sus valores. Sin embargo, la interpolación a la zona media de la región es poco fiable, ya que el número y la ubicación de las estaciones consideradas deja amplios márgenes de esta zona sin información registrada.

6. La parte norte del área de estudio presenta una evaporación correlacionada de forma importante. Por otro lado, la estación Puerto Saavedra (E7) tiene una correlación espacial leve con el resto de las estaciones, esto se puede explicar en parte, debido a que es la única estación ubicada en la costa, por lo que sus registros están influenciados por condiciones climáticas diferentes a las del resto. La estación que representa de mejor manera el comportamiento de las estaciones evaporimétricas es Traiguén (E4), ya que el promedio de su coeficiente de correlación es el más alto.

4.5 CARACTERIZACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE LA TEMPERATURA MEDIA EN LAS CUENCAS

El objetivo de este análisis es caracterizar la evapotranspiración a partir de la temperatura. Se debe contar con un conocimiento de la temperatura en la región y calcular de manera indirecta la evapotranspiración. Ello implica estar en condiciones de poder conocer o estimar en cualquier lugar del área, el valor de la temperatura mensual, estacional y anual. Lo anterior implica contar con una estimación de los estadísticos principales del valor mensual, estacional y anual; el modelo probabilístico que representa la temperatura adecuadamente; la temperatura asociada a distintas probabilidades; las relaciones para estimarla en puntos sin registros y la variación espacial y temporal de la temperatura. Las estaciones se ubican en las cuencas del río Imperial, Toltén y las cuencas costeras de la región.

A continuación se muestran las características de las estaciones que tienen datos disponibles de temperatura mensual en el área de estudio y el relleno y análisis de la información para disponer de series de temperatura más extensas. Se presenta un análisis estadístico e hidrológico de las series anuales, estacionales y mensuales. Finalmente se presenta el cálculo de la evapotranspiración a partir de la temperatura.

4.5.1 Estaciones seleccionadas

En las cuencas de la región de La Araucanía existe una cantidad importante de estaciones con registros de temperatura controladas por la DGA y la DMC. Los registros originales se muestran en el Anexo C.17. Las características principales de las estaciones seleccionadas se indican en la Tabla 4-16. A cada estación se le asignó un número para facilitar su identificación. Las estaciones con menos de 84 datos mensuales (7 años) en su registro no fueron consideradas.

Tabla 4-16: Características de las estaciones de temperatura seleccionadas.

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altura	Registro	Estado
T1	Liucura	08301001-0	5719729	317952	1030	1987-2012	V
T2	Lonquimay	08304004-1	5741698	292831	920	1991-2012	V
T3	Laguna Malleco	08350002-6	5766299	253643	890	1989-2012	V
T4	Ercilla (Vida Nueva)	08353001-4	5785997	722382	250	1998-2012	V
T5	Angol (La Mona)	08358002-K	5815957	708089	101	1993-2011	V
T6	El Vergel (Angol)	08358003-8	5811793	706858	75	1981-1995	NV
T7	Parque Nahuelbuta	08358005-4	5811971	679582	1140	2002-2012	V
T8	Traiguén	09105002-1	5763093	705310	234	1979-2012	V
T9	Galvarino	09113003-3	5745912	694073	40	1979-1987	NV
T10	Manzanar	09120002-3	5739282	264487	790	1972-1988	NV
T11	Malalcahuello	09120003-1	5738790	275321	950	1988-2012	V

Nro.	Nombre	Código BNA	UTM Norte*	UTM Este*	Altura	Registro	Estado
T12	Lautaro	09124001-7	5733493	722130	200	1995-2005	NV
T13	Maquehue, Temuco Ad. (DMC)	-	5706095	705290	92	1965-2012	V
T14	Puerto Saavedra	09153001-5	5705383	639523	5	1979-2012	V
T15	Tricauco	09401001-2	5696644	278701	520	1989-2012	V
T16	Puesco (Aduana)	09412003-9	5622434	280981	620	1987-2012	V
T17	Pucón	09420002-4	5648450	245489	230	1986-2012	V
T18	Teodoro Schmidt	09438001-4	5678310	666373	13	1989-2012	V

[Fuente: DGA y DMC]; *WGS-84. - V: Vigente - NV: No Vigente

La Figura 4-30 presenta un resumen de la disponibilidad histórica de estadísticas de temperatura mensual en las estaciones DGA y DMC a partir de 1970 a la fecha. Sólo la estación Maquehue Temuco Ad. (T13) posee registros pluviométricos desde 1965.

Los registros de temperatura son un promedio en el tiempo. Tomando en cuenta esto y la poca variabilidad de la temperatura dentro del mes, fueron considerados todos los datos mensuales con registro, sin importar la cantidad de días al mes.

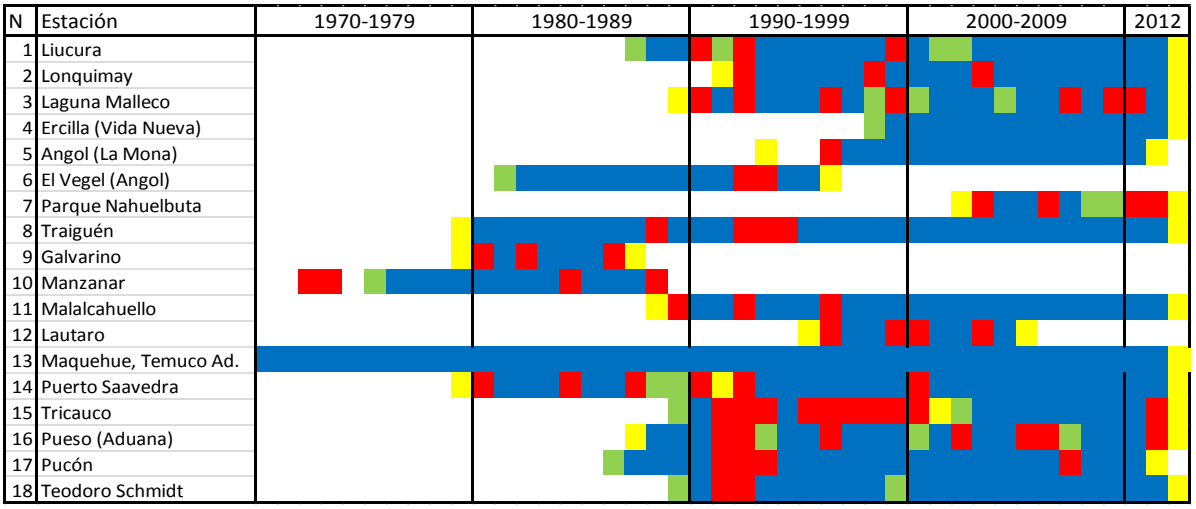


Figura 4-30. Disponibilidad de datos en estaciones con registros de temperatura mensual (Azul: 12 datos, Rojo: entre 10 y 11 datos, Verde: entre 7 y 9 datos, Amarillo: entre 1 y 6 datos por año)

Se observa que la red ha ido creciendo constantemente en el tiempo hasta el año 2002. Si bien sus registros comienzan en la década del 60. Algunas estaciones presentan series de datos con más de 20 años, y otras presentan 7 años con registros. Del total hay 10 estaciones que tienen más de 20 años con registros y 3 tienen más de 30 años.

La Figura 4-31 muestra la distribución espacial de las estaciones. Se observa que las estaciones se encuentran bien distribuidas espacialmente dentro de la región. Existen 7 estaciones que se encuentra ubicadas al norte de la cuenca del río Imperial (Desde la estación Liucura (T1) hasta la estación Parque Nahuelbuta (T7)).

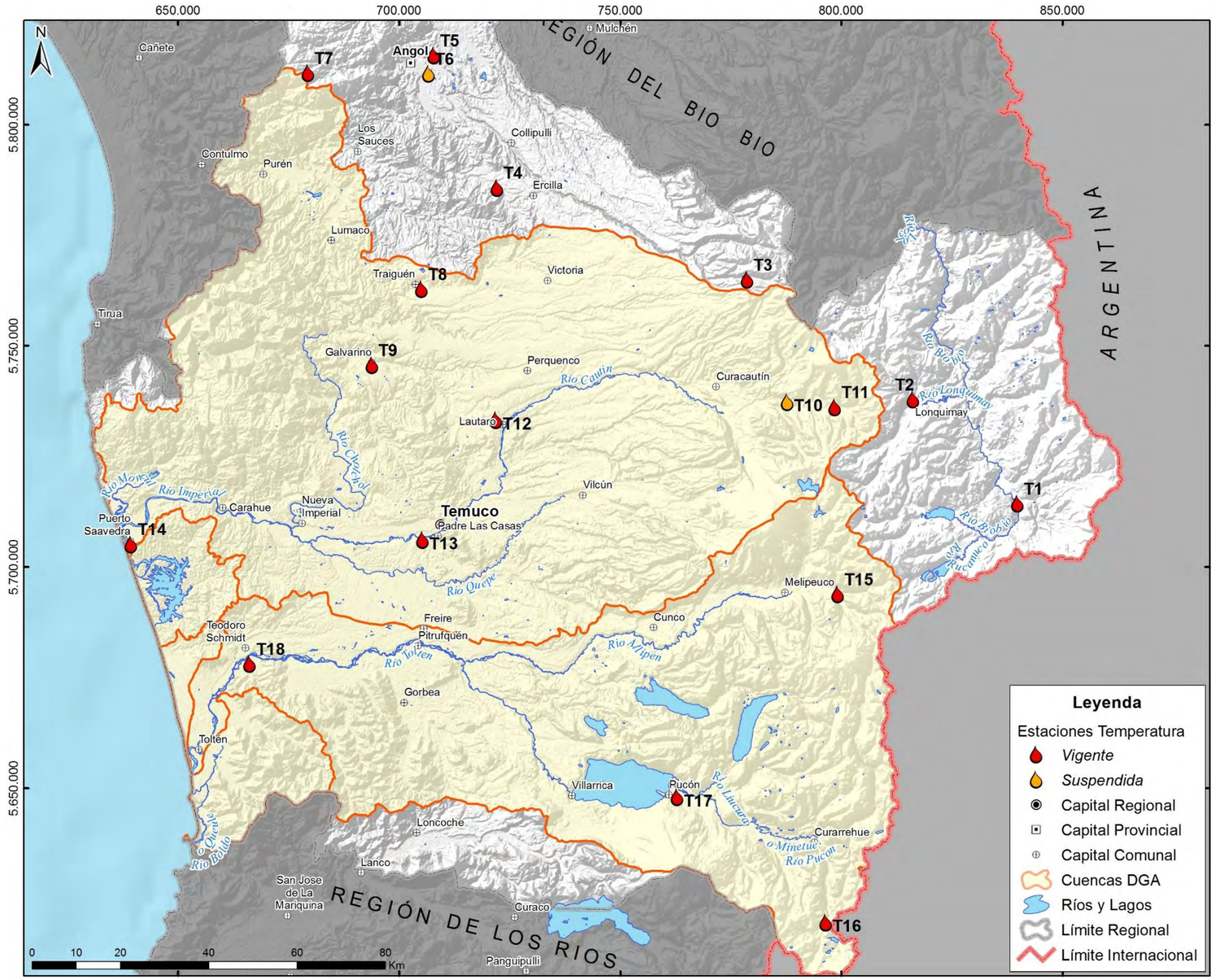


Figura 4-31. Distribución estaciones con registros de temperatura mensual

4.5.2 Corrección y relleno de estadísticas de temperatura

4.5.2.1 Análisis de consistencia de temperaturas anuales

Se analizó la consistencia de las series de datos anuales en cada estación utilizando el método de los residuos acumulados, este método se explicó en la sección 4.2.2 del presente informe.

El patrón se escoge eligiendo una estación cuyos registros sean confiables. En el presente estudio se seleccionaron como patrón estaciones con registros largos y con alta correlación espacial con las estaciones de la cuenca. La estación patrón para la estación Puerto Saavedra (T14) fue la estación Traiguén (T8). Se utilizó la estación Maquehue, Temuco Ad. (T13) como patrón para el resto de las estaciones ubicadas en el área de estudio.

Todas las estaciones presentaron consistencia con el patrón para sus datos anuales según el método de los residuos acumulados. El límite de la elipse se construyó con una probabilidad de cometer error de tipo I de 95%. El Anexo C.18 muestra los resultados del método de los residuos acumulados en las estaciones de temperatura.

4.5.2.2 Relleno de temperaturas mensuales faltantes

Con el objetivo de poder considerar la mayor cantidad de registros para el análisis de las condiciones hidrológicas de la cuenca, se completó la estadística rellenando los datos faltantes. Para ello se usaron los datos provenientes de la DGA y de la DMC. Se rellenó con series que poseen un número importante de datos, mediante regresiones de las series de datos mensuales completas, sin hacer diferencia entre un mes y otro. Se consideró un periodo desde 1970 en adelante. La estación utilizada para rellenar en cada caso se eligió de entre las estaciones con buena correlación. Para realizar el relleno de forma correcta y mantener las propiedades estadísticas de la serie a rellenar se utiliza la Ecuación 4-1, explicada previamente.

Se buscaron valores anómalos en las series de datos originales. Estos valores anómalos se definen como un valor que supere al promedio en 6 veces la desviación estándar. Bajo este criterio no se encontraron valores anómalos en las series de datos de evaporación. Por este motivo, no se requirió eliminar ningún valor.

Las estadísticas básicas de las regresiones mensuales se resumen en la Tabla 4-17. La estación Maquehue, Temuco Ad. (T13) tiene más de 540 datos mensuales (45 años) en el registro original, por lo que no fue rellenada. N_1 es el número de datos comunes disponibles en ambas series y N_2 es el número de datos a rellenar.

Tabla 4-17: Características de las relaciones de temperaturas mensuales para el relleno de datos faltantes.

No.	Estación a rellenar	Estación que rellena	a	b	R^2	N_1	N_2	ΔS (%)
T1	Liucura	Maquehue, Temuco Ad.	-6,26	1,35	0,88	286	272	2,27
T2	Lonquimay	Maquehue, Temuco Ad.	-5,61	1,31	0,92	244	314	2,29
T3	Laguna Malleco	Maquehue, Temuco Ad.	-4,77	1,21	0,93	255	303	2,63
T4	Ercilla (Vida Nueva)	Maquehue, Temuco Ad.	-0,67	1,19	0,97	169	389	3,97
T5	Angol (La Mona)	Maquehue, Temuco Ad.	-0,83	1,33	0,96	182	376	2,28

No.	Estación a rellenar	Estación que rellena	a	b	R^2	N_1	N_2	ΔS (%)
T6	El Vegel (Angol)	Maquehue, Temuco Ad.	-0,44	1,26	0,97	176	382	1,62
T7	Parque Nahuelbuta	Maquehue, Temuco Ad.	-2,46	1,04	0,85	100	458	2,44
T8	Traiguén	Maquehue, Temuco Ad.	-0,69	1,16	0,97	391	167	2,40
T9	Galvarino	Maquehue, Temuco Ad.	1,23	1,00	0,96	91	467	3,06
T10	Manzanar	Maquehue, Temuco Ad.	-3,07	1,18	0,88	184	374	1,27
T11	Malalcahuello	Maquehue, Temuco Ad.	-3,46	1,08	0,93	278	280	1,49
T12	Lautaro	Maquehue, Temuco Ad.	1,01	0,97	0,85	114	444	1,49
T14	Puerto Saavedra	Maquehue, Temuco Ad.	4,22	0,65	0,80	370	188	1,91
T15	Tricauco	Maquehue, Temuco Ad.	-1,49	0,99	0,81	251	307	0,08
T16	Puesco (Aduana)	Maquehue, Temuco Ad.	-2,57	1,08	0,85	274	284	2,98
T17	Pucón	Maquehue, Temuco Ad.	1,04	1,00	0,94	293	265	0,49
T18	Teodoro Schmidt	Maquehue, Temuco Ad.	3,29	0,75	0,85	271	287	0,50

[Fuente: Elaboración propia]

ΔS es el cambio porcentual de la desviación estándar antes y después de rellenar

Se puede apreciar que los valores de los coeficientes de determinación (R^2) son en general altos, lo que se traduce en regresiones adecuadas para rellenar los datos, con valores de R^2 mayores a 0,79. Los cambios porcentuales (en valor absoluto) de la desviación estándar antes y después de rellenar (ΔS) son en promedio de 2% (valor absoluto) y el mayor cambio porcentual ocurre en la estación Ercilla (Vida Nueva) (T4), donde la desviación estándar pasa de 4,00 a 3,84. El Anexo C.19 muestra el detalle de las regresiones utilizadas para rellenar las estadísticas.

4.5.2.3 Temperaturas rellenadas

Utilizando la Ecuación 4-1 y las relaciones de la Tabla 4-17se realizó el relleno de los datos. La Tabla 4-18 resume los promedios de las series de temperatura ya rellenadas. Los resultados se presentan para cada mes, para las temporadas de invierno, verano y para el año hidrológico. Las estadísticas de temporadas se calcularon en los casos con 5 o más meses con información y las anuales con 10 o más de meses de información.

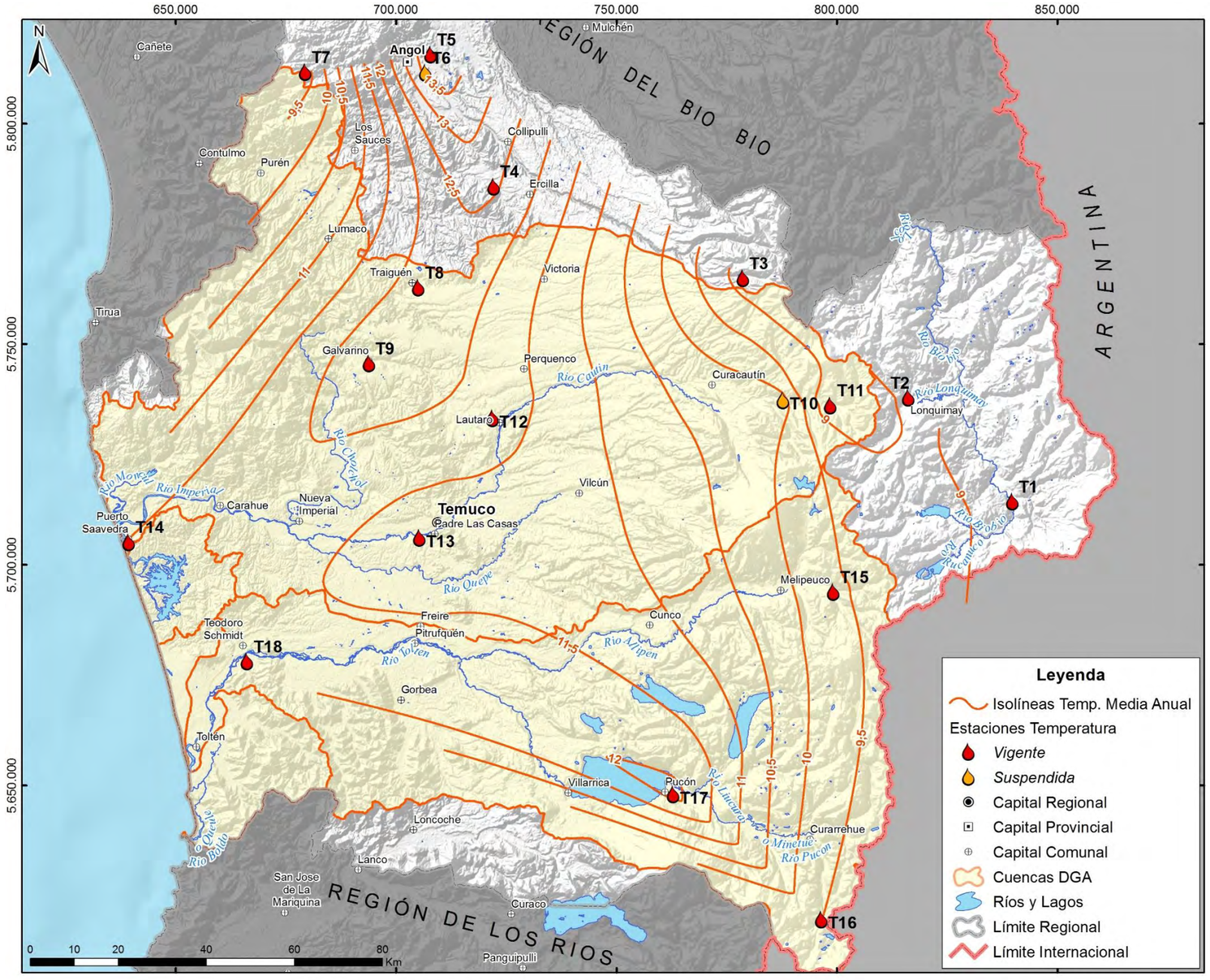
Tabla 4-18: Promedios de las series de temperatura (°C).

No.	AB	MA	JU	JU	AG	SE	OC	NO	DI	EN	FE	MA	IN	VE	AN
T1	9	6	4	3	4	6	8	11	14	15	15	13	5	13	9
T2	9	6	4	3	4	6	9	11	14	15	15	13	6	13	9
T3	8	6	4	4	4	6	8	11	13	15	14	12	6	12	9
T4	12	10	8	8	8	10	12	14	17	18	18	16	9	16	13
T5	14	11	9	8	9	11	13	16	19	20	20	18	10	18	14
T6	13	11	9	8	9	11	13	16	18	20	19	17	10	17	14
T7	9	8	6	5	5	7	9	10	13	14	14	12	7	12	9
T8	12	10	8	7	8	10	11	14	16	18	17	15	9	15	12
T9	12	11	9	8	9	10	12	14	16	17	17	15	10	15	12
T10	10	8	6	6	6	8	9	12	14	15	15	14	7	13	10
T11	9	7	5	4	5	6	8	10	12	14	13	12	6	12	9
T12	12	10	8	8	8	10	11	13	15	16	16	14	9	14	12
T13	11	9	8	7	8	9	11	13	15	16	16	14	9	14	11
T14	12	11	9	9	9	10	11	12	14	14	14	13	10	13	12
T15	10	8	6	5	6	7	9	11	13	14	14	12	7	12	10
T16	10	8	5	5	5	7	9	12	13	15	14	12	7	12	10
T17	12	10	8	8	8	10	11	14	15	17	17	15	10	15	12
T18	12	10	9	9	9	10	11	13	14	15	15	14	10	14	12

Las estadísticas de las series consideradas en el estudio, que fueron o no rellenadas y los estadísticos principales de las series (número de datos, promedio, desviación estándar, coeficiente de asimetría, mínimo y máximo) se muestran en el Anexo C.20.

4.5.2.4 Isolíneas de temperatura anual media

Las Figura 4-32 a Figura 4-34 muestran las isolíneas de temperatura anual y estacionales sobre el área de estudio.


650.000
700.000
750.000
800.000
850.000
5.800.000
5.750.000
5.700.000
5.650.000
N
Cañete
Angol
Mulchén
Contulmo
Purén
Los Sauces
Collipulli
Ercilla
Lumaco
Traiguén
Victoria
Tirua
Galvarino
Perquenco
Curacautín
Lonquimay
Lautaro
Río Cautín
Río Lonquimay
Río Bio Bio
Vilcún
Carahue
Nueva Imperial
Puerto Saavedra
Temuco
Padre Las Casas
Río Quepe
Melipeuco
Freire
Pitrufquén
Cunco
Teodoro Schmidt
Río Toltén
Río Allipen
Gorbea
Tolten
Villarrica
Pucón
Río Liucura
Río Pucon
Curarrehue
Loncoche
Lanco
San Jose de La Mariquina
Curaco
Panguipulli
Río Bueno
Río Calle Calle
Río Valdivia
Río Futa
Río Fuy
Río Enco
Río Pirihueico
Río Bueno Grande
Río Llanquihue
Río Puelo
Río Manso
Río Palena
Río Frio
Río Encuentro
Río Futaleufu
Río Espolon
Río Figueroa
Río Yelcho
Río Corcovado
Río Rosselot
Río Blanco
Río Chaiten
Río Negro
Río Gualletue
Río Amarillo
Río Yelcho Chico
Río Azul
Río Michinmahuida
Río Vodudahue
Río Frio
Río Gaviota
Río Palena
Río Claro

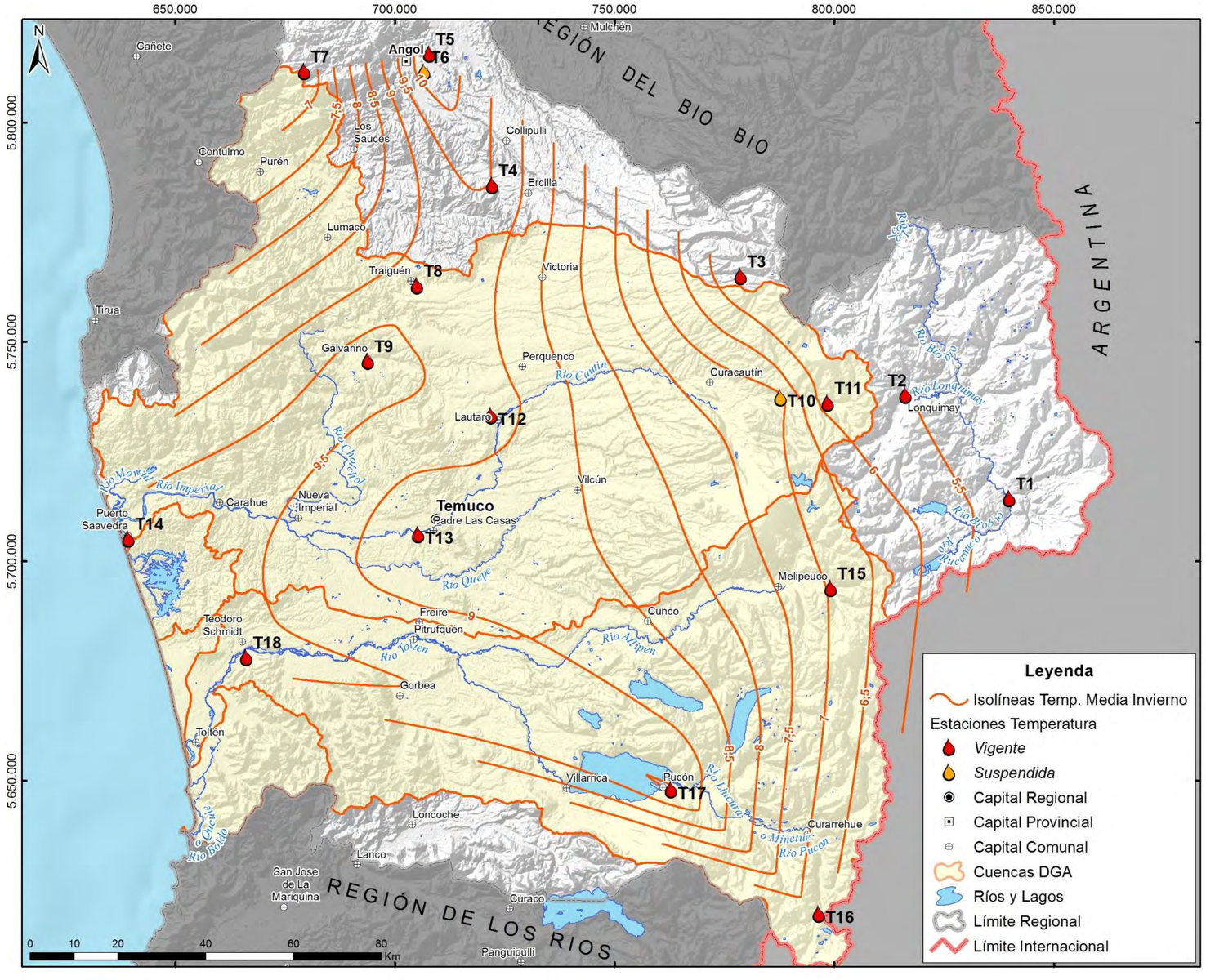


Figura 4-33. Isolíneas de temperatura media en invierno

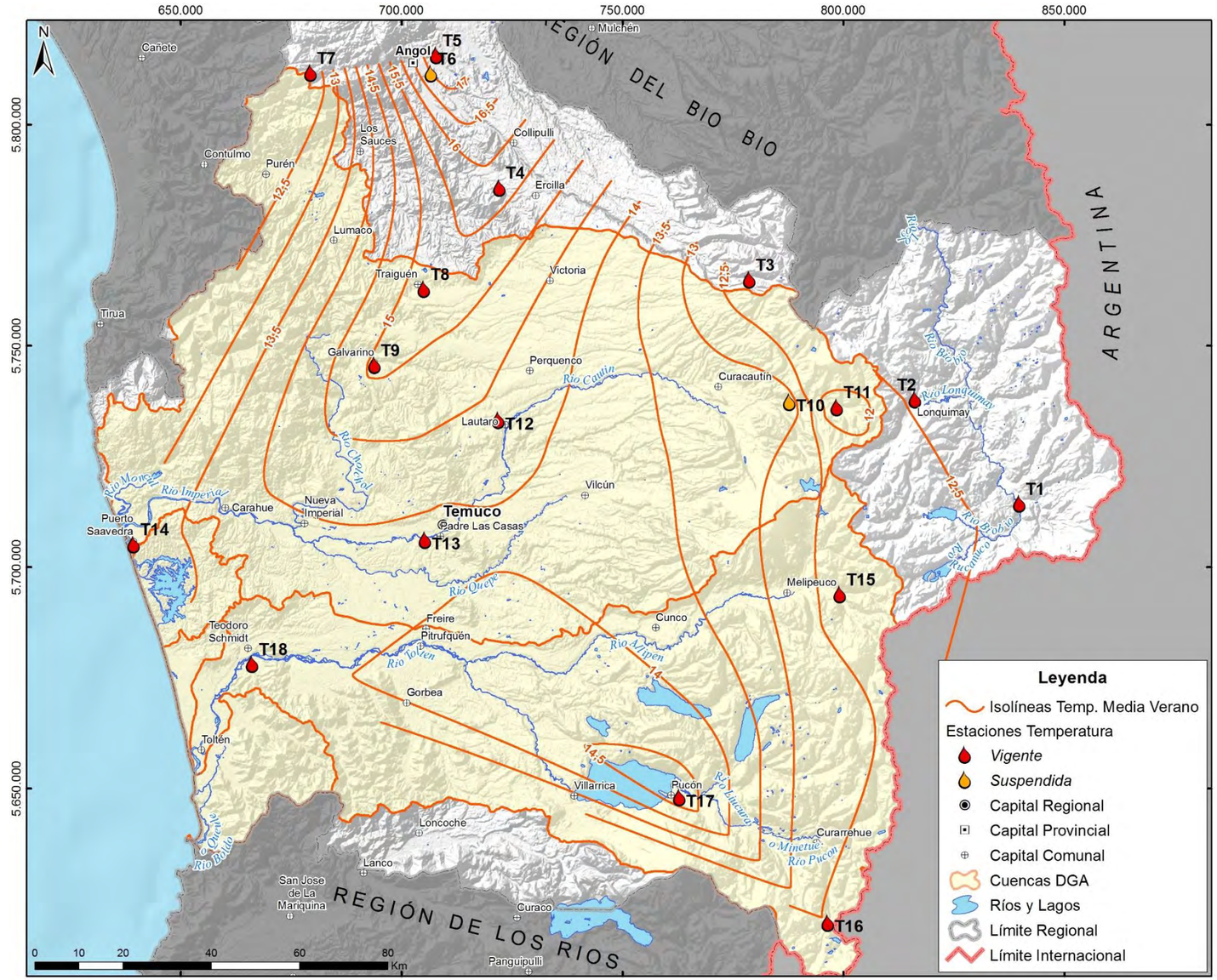


Figura 4-34. Isolíneas de temperatura media en verano

4.5.3 Análisis de Temperaturas

4.5.3.1 Magnitud de la temperatura y efecto de la altura

Los datos muestran mayores valores de temperatura durante los meses de verano. La temperatura en invierno es en promedio un 58% de la temperatura en verano. Los valores de la temperatura anual promedio son similares a los presentados de temperatura en el Balance Hidrológico Nacional Regiones VII, IX y X. La temperatura para la estación Lonquimay (T2) es de 8 °C, para Traiguén (T8) es de 12 °C, para Galvarino (T9) es 12 °C, para Manzanar (T10) es de 10 °C, para Puerto Saavedra (T14) 12 °C y para Pucón (T17) 12 °C.

La Figura 4-35 muestra la temperatura anual en función de la altura de las estaciones. La distribución espacial presentada en las isolíneas y en la Figura 4-35 muestra que la temperatura disminuye levemente con la altura. Las estaciones con temperaturas más bajas se ubican en la cordillera de Los Andes con excepción de la estación Parque Nahuelbuta (T7), que se ubica en la cordillera de la Costa. Las temperaturas más altas se observan en estaciones ubicadas alrededor de 90 m.s.n.m. Las estaciones que se ubican cerca de la costa, Puerto Saavedra (T14) y Teodoro Schmidt (T18), registran temperaturas en torno a los 11,6 °C. La cantidad y ubicación de las estaciones consideradas permite establecer la distribución de la temperatura en la cuenca. Todos los puntos de la cuenca están a 50 Km de alguna estación considerada.

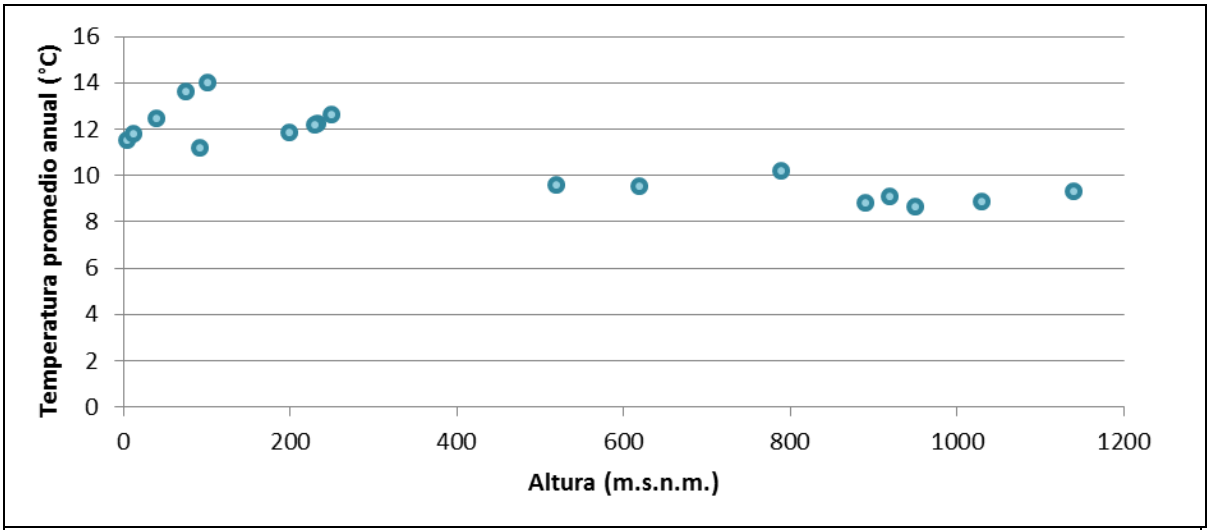


Figura 4-35. Temperatura anual en función de la altura de la estación

4.5.3.2 Auto correlación

No se realizó un análisis de autocorrelación temporal para las temperaturas ya que las series fueron rellenadas satisfactoriamente en la sección 4.5.2.

4.5.3.3 Isolíneas de correlación espacial de datos de temperatura

El análisis determino las correlaciones de las series de cada estación con el resto de las estaciones para los valores mes a mes. Los resultados indican una correlación importante de la información mensual entre todas las estaciones de la región. La peor correlación se observa con las estaciones Puerto Saavedra (T14) y Teodoro Schmidt (T18) con valores de 0,89 y 0,90 respectivamente. Estas estaciones están ubicadas hacia la costa. Al rellenar los datos el coeficiente de correlación aumenta ligeramente. El aumento es en promedio de 0,02. Los valores de los coeficientes de correlación espaciales de las series mensuales de datos de evaporación antes y después de rellenar los valores pueden ser revisados en el Anexo C.21.

4.5.3.4 Análisis de frecuencia de temperatura

Se consideraron los mismos modelos de distribución de probabilidades, la misma consideración para los valores nulos, el mismo test estadístico y metodología para comparar la bondad de ajuste (Test de Chi-Cuadrado) utilizados en la sección 4.2.4 de caracterización pluviométrica.

Los resultados del test de Chi-cuadrado favorecen a la distribución Normal ya que obtiene de forma consistente el menor número de rechazos para los meses y los valores de temporada. Es claro que la distribución Gamma de dos parámetros no logra ajustarse a los datos. Se selecciona la distribución Normal para ajustar los datos. Los estadígrafos calculados en el test de Chi-Cuadrado pueden revisarse en detalle en el Anexo C.21.

Se obtuvieron curvas de temperatura a partir de las curvas de temperatura calculadas según el ajuste del modelo Normal. La Figura 4-36 presenta un resumen de la temperatura para probabilidades de excedencia de 5, 20, 50, 85 y 95%.

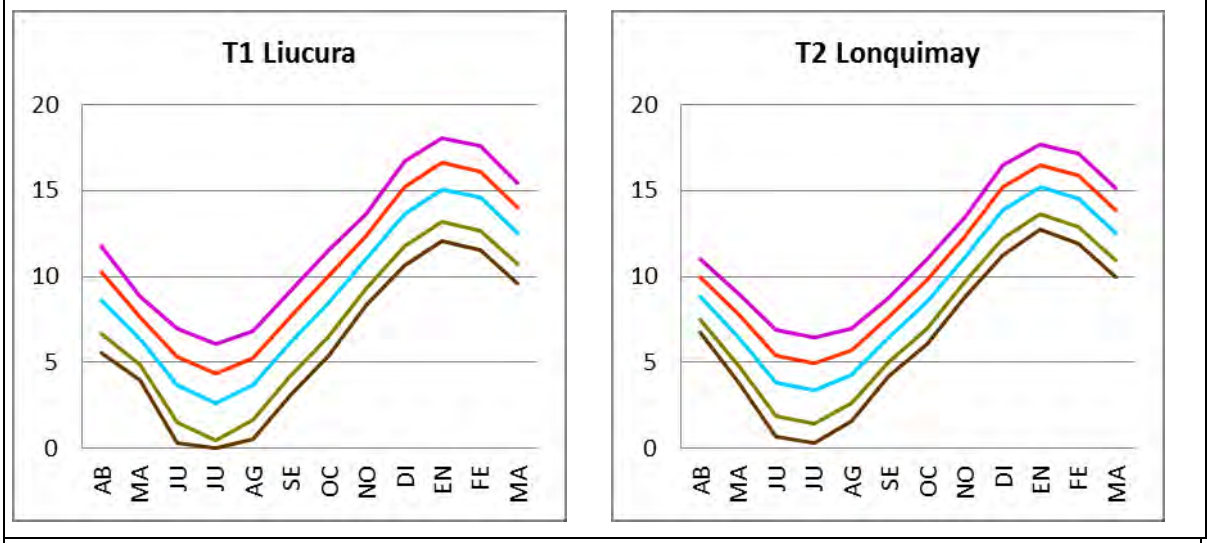


Figura 4-36. Temperatura mensual para diferentes probabilidades en estaciones del área de estudio (°C).

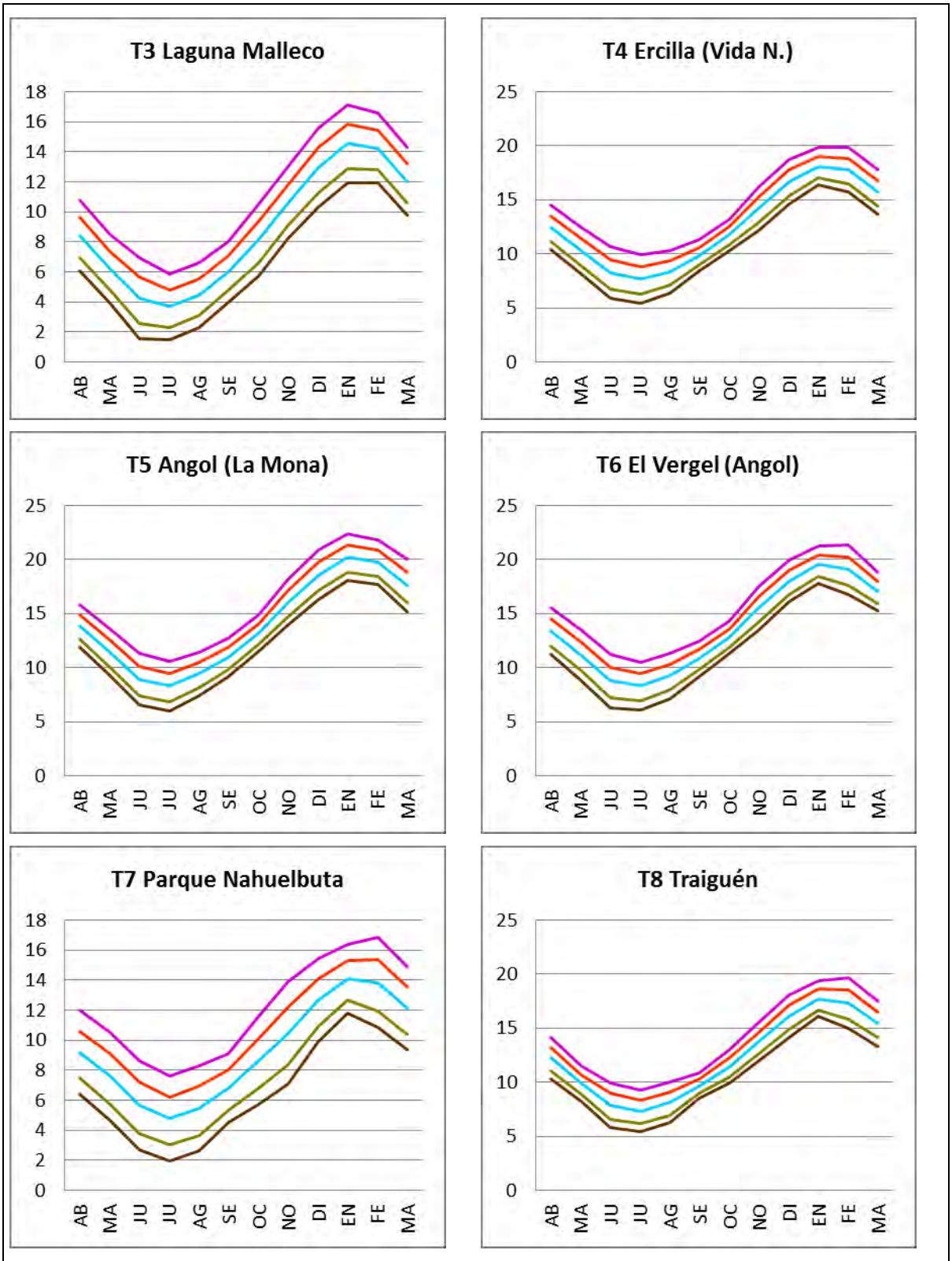


Figura 4-36. Temperatura mensual para diferentes probabilidades en estaciones del área de estudio (°C).(Continuación)

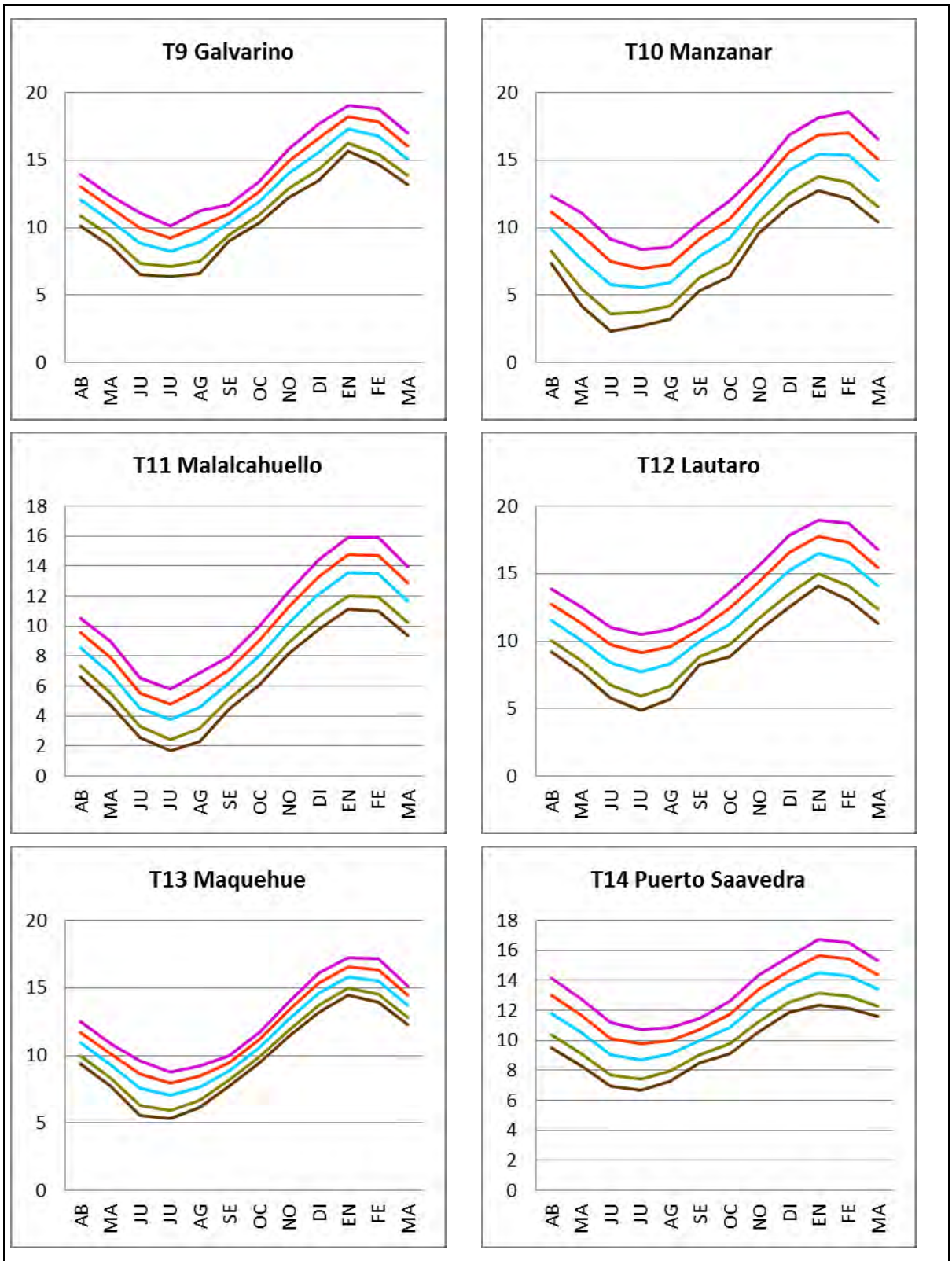


Figura 4-36. Temperatura mensual para diferentes probabilidades en estaciones del área de estudio (°C).(Continuación)

4.5.4 Cálculo de la evapotranspiración a partir de la temperatura

Para determinar la evapotranspiración a partir de la temperatura se utilizó el método de Blaney-Criddle, el método de Blaney-Criddle modificado por Doorenbos y Pruitt y el de Thornthwaite.

La ecuación asociada al método de Blaney-Criddle para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) se presenta a continuación:

$$ETP_{B\&C} = K_C \cdot p \cdot (0{,}46 \cdot T_m + 8{,}13) \qquad (\frac{mm}{mes})$$

Donde p es el porcentaje de horas de horas de luz (como un porcentaje del total anual) que depende de la latitud (38,6° de latitud sur para la zona de estudio), T_m es la temperatura media mensual (°C) y K_c es el coeficiente de cultivo (que se toma igual a 1 para el cultivo de referencia).

La ecuación asociada al método de Blaney-Criddle modificado por Doorenbos y Pruitt para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) se presenta a continuación:

$$ETP_{B\&C\ DyP} = K_c \cdot \left(a + b \cdot p \cdot (0{,}46 \cdot T_m + 8{,}13)\right) (\frac{mm}{mes})$$

Donde los parámetros a y b dependen de los rangos en que se encuentren la humedad relativa, la velocidad del viento y el tiempo de insolación efectivo. A partir de datos recabados de la DMC[3] y del centro de investigación Langley de la NASA[4], se estableció que la humedad relativa se puede considerar alta (>50%), la velocidad del viento diurna se puede considerar moderada (entre 2 y 5 m/s) y el tiempo de insolación efectivo se puede considerar bajo (<60%), por lo que los parámetros a y b toman los valores -1,55 multiplicado por el número de días en el mes y 0,88 respectivamente. El resto de los parámetros es igual que en el método de Blaney-Criddle.

La ecuación asociada al método de Thornthwaite para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) se presenta a continuación:

$$ETP_{Thor} = 16 * \left[\frac{l}{12}\right] * \left[\frac{N}{30}\right] * \left[\frac{10 * T_m}{I}\right]^a$$

$ETP_{Thor} ETP_{B\&C} = K_c * p * (0{,}46 * T_m + 8{,}13)\ ETP_{Thor} = 16 * \left[\frac{l}{12}\right] * \left[\frac{N}{30}\right] * \left[\frac{10 * T_m}{I}\right]^a$ (mm/mes)

Donde l es la duración del día (hrs), N es el número de días al mes, T_m es la temperatura media mensual ($°C$). El índice de calor anual (I) y el parámetro a se calcula como:

---

[3] Ver Estadísticas Meteorológicas Tomo II Elaborado por Ing. (E) Carlos Castillo Fontannaz publicado y editado por Dirección Meteorológica de Chile Santiago, marzo 2001.

[4] Ver sitio web http://www.gaisma.com/en/location/temuco.html

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left[\frac{T_m}{5}\right]^{1,514}$$

$$a = 6{,}75 * 10^{-7} * I^3 - 7{,}71 * 10^{-5} * I^2 + 0{,}0179 * I + 0{,}492$$

Se calculó la evapotranspiración anual media a partir de la temperatura anual media con las ecuaciones ya presentadas. Los resultados se presentan en la Tabla 4-19, junto con la temperatura media en cada estación.

Tabla 4-19: Evapotranspiración anual media calculada a partir de la temperatura (mm).

	B&C			B&C D y P			Thornthwaite			Temp		
No.	**IN**	**VE**	**AN**	**IN**	**VE**	**AN**	**IN**	**VE**	**AN**	**IN**	**VE**	**AN**
T1	456	792	1248	117	415	533	142	446	588	5	13	9
T2	463	795	1257	124	417	541	148	437	585	6	13	9
T3	462	780	1242	123	404	527	155	442	597	6	12	9
T4	541	875	1416	192	488	680	160	347	507	9	16	13
T5	561	924	1484	210	531	740	150	329	480	10	18	14
T6	557	909	1465	206	518	724	154	333	487	10	17	14
T7	483	777	1260	141	402	543	174	414	588	7	12	9
T8	535	864	1399	187	478	665	162	352	514	9	15	12
T9	547	859	1406	198	474	671	169	342	511	10	15	12
T10	547	859	1406	198	474	671	163	398	561	7	13	10
T11	466	764	1231	127	391	517	168	438	607	6	12	9
T12	537	839	1376	189	456	645	174	351	525	9	14	12
T13	522	825	1347	176	444	620	173	366	539	9	14	11
T14	547	809	1356	198	430	628	193	340	533	10	13	12
T15	491	783	1274	148	407	555	176	404	580	7	12	10
T16	484	788	1272	142	411	554	169	412	581	7	12	10
T17	541	851	1392	193	467	660	170	347	517	10	15	12
T18	545	825	1370	196	444	640	184	343	527	10	14	12

Con la ecuación de Blaney-Criddle la evapotranspiración calculada es mucho mayor a la obtenida a partir de los otros métodos. La FAO establece que la ecuación puede sobrestimar en un 40% el valor en zonas con baja velocidad del viento, húmedas y con una nubosidad importante (*FAO Irrigation and Drainage Paper* No. 24), esta descripción es aplicable al área de estudio.

Por el contrario, las variables climatológicas si son consideras 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. Este método también obtiene los resultados más parecidos a la evapotranspiración potencial calculada a partir de la evaporación de tanque multiplicada por un coeficiente de bandeja de 0,70 en las estaciones donde se tiene medidas simultaneas de evaporación de tanque y temperatura. Los resultados de esta comparación se muestran en la Tabla 4-20.

Tabla 4-20: Comparación de evapotranspiración anual media calculada a partir de la temperatura y a partir de la evaporación de tanque (mm).

	B&C			B&C D y P			Thornthwaite			E. Tanque*0,7		
No.	**IN**	**VE**	**AN**	**IN**	**VE**	**AN**	**IN**	**VE**	**AN**	**IN**	**VE**	**AN**
T4	541	875	1416	192	488	680	160	347	507	160	495	654
T5	561	924	1484	210	531	740	150	329	480	192	691	885
T6	557	909	1465	206	518	724	154	333	487	157	628	784
T8	535	864	1399	187	478	665	162	352	514	115	541	659
T10	547	859	1406	198	474	671	163	398	561	159	448	611
T11	466	764	1231	127	391	517	168	438	607	143	454	596
T14	547	809	1356	198	430	628	193	340	533	168	389	557
T17	541	851	1392	193	467	660	170	347	517	134	347	482

4.5.5 Conclusiones de evapotranspiración a partir de la temperatura media en las cuencas

El análisis de la evapotranspiración realizado a partir de la temperatura permite concluir lo siguiente:

1. Existe una red lo suficientemente extensa y bien distribuida para caracterizar la temperatura en toda la región a partir de mediciones directas. La red tiene 27 estaciones, de las cuales se consideraron 18 por tener más de 84 meses con registros. De estas 18, 10 tienen más de 20 años de registro y 3 tienen más de 30 años. Esta red permite caracterizar la temperatura local en un radio cercano a las estaciones consideradas.
2. Los promedios de la temperatura anual varían entre 8,6 y 14,0 °C. Por otro lado, los coeficientes de variación tienen un promedio de 0,05 y están en el rango entre 0,03 y 0,09. También se observa que los coeficientes de asimetría son cercanos a 0 y varían entre -0,74 y 0,55.
3. Los coeficientes de variación de la temperatura anual, al ser menores a 0,09 indican que el valor de la temperatura anual varía poco en relación a su promedio, y por consiguiente la probabilidad de tener evaporaciones comprendidas entre 0,7 y 1,3 veces el promedio es alta.
4. Las temperaturas mensuales, estacionales y anuales están bien representados por un modelo de distribución Normal.
5. La distribución y número de estaciones de temperatura cubre adecuadamente el área de estudio, lo que permite estimar la evapotranspiración. Este componente del balance hídrico que no se pudo estimar a partir del análisis de la evaporación de tanque realizado en la sección 4.4.
6. La correlación espacial de la temperatura es fuerte entre las estaciones que se encuentran en el área de estudio. Las estaciones Ercilla (Vida Nueva) (T4), Angol (La Mona) (T5) y Maquehue, Temuco Ad. (T13), tienen coeficientes de correlación espacial altos con el resto de las estaciones, por lo que son buenas representantes de las variaciones de la temperatura que ocurren en el área de estudio. La estación que presenta menor coeficiente de correlación con el resto es Teodoro Schmidt (T18) con un promedio de 0,89. Pese a ser el menor de los valores, este es considerablemente alto.

5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica es una herramienta que contribuye en la comprensión del sistema hidrológico superficial de la región, y aporta en la definición del modelo conceptual del sistema.

Con el objetivo de estimar y caracterizar las componentes del sistema hidrológico superficial se desarrolló un modelo de simulación continuo en el programa ExtendSim, de manera de cuantificar la respuesta hidrológica del sistema.

El área de estudio se ha dividido en tres sistemas hidrológicos para su modelación: cuenca del río Imperial, cuenca del río Toltén y cuencas costeras.

A continuación se presenta la sectorización del área de estudio, y la descripción y uso del modelo hidrológico.

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Además de los tres sistemas hidrológicos, el área de estudio se dividió en zonas de riego las que constituyen las unidades desagregadas de modelación.

Para realizar la sectorización se agruparon los distritos agrocensales presentados en el Censo Agropecuario (2007) a fin de representar y formar las subcuencas y subsubcuencas que conforman las cuencas estudiadas. De estos distritos se tiene información del uso agrícola de ellas, que permiten estimar las demandas hídricas de cada uno y de la unidad que los agrupa. La delimitación de los distritos agrocensales no necesariamente coincide con los límites de las cuencas hidrográficas, pero para ser consistentes con la información recopilada, se mantuvieron las superficies reportadas en el censo. Así, al agruparlos en zonas de riego quedan algunas con superficie en más de una cuenca y por eso, la superficie modelada presenta algunas diferencias con la superficie de las cuencas estudiadas.

Cada zona de riego contiene información de área y tipo de cultivo, área de secano y eficiencia, lo que permite estimar la evapotranspiración de las zonas de riego y de la vegetación natural. La eficiencia del riego se determina de acuerdo a las tecnologías utilizadas para realizar el transporte del agua de riego (tendido, surco, aspersión, etc.). Así, una eficiencia alta implica que las pérdidas en transportar el agua hacia los cultivos son bajas. Se ponderaron las eficiencias de acuerdo a la superficie regada con las distintas tecnologías a modo de obtener una eficiencia equivalente y representativa de cada zona de riego.

5.1.1 Cuenca del río Imperial

La cuenca del río Imperial fue dividida en 20 zonas 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. La Tabla 5-1 presenta la información. Las distribución espacial se muestran en la Figura 5-1.

Tabla 5-1: Datos de zonas de riego en cuenca del río Imperial.

Zona	ARIEGO has	ASECANO has	EFICIENCIA %	CULTIVO 1 % AREA forrajeras	CULTIVO 2 % AREA bosques	CULTIVO 3 % AREA cereales	CULTIVO 4 % AREA Cult. Ind.	DERECHOS PERM. l/s
ZI1	1.104,0	80.708,2	0,63	3,13	91,31	4,73	0,25	326,2
ZI2	45,7	37.580,7	0,66	0,90	95,36	2,95	0,44	235,7
ZI3	221,8	37.479,7	0,74	5,50	71,47	18,20	1,39	8,0
ZI4	544,5	36.850,6	0,60	8,88	33,47	50,62	6,62	2.832,7
ZI5	310,6	46.284,9	0,71	10,98	51,31	31,09	5,77	3848
ZI6	413,0	23.297,4	0,85	5,54	11,03	69,28	13,44	275,2
ZI7	597,8	30.585,1	0,58	15,33	9,41	65,42	9,00	995,1
ZI8	735,0	125.663,9	0,58	12,93	66,12	17,92	2,56	549,7
ZI9	231,8	53.022,6	0,73	6,72	60,93	26,94	4,97	191,1
ZI10	402,5	40.195,1	0,63	13,06	50,01	33,44	2,76	180,6
ZI11	1.223,2	95.013,9	0,55	23,85	55,40	20,27	0,10	480,9
ZI12	12,2	43.303,5	0,65	27,90	45,19	26,50	0,00	305,9
ZI13	4.845,0	69.596,5	0,59	27,36	24,16	42,74	3,79	1.647,1
ZI14	4.044,2	71.104,1	0,57	17,90	35,41	31,50	11,36	2.000,1
ZI15	2.088,4	27.291,5	0,61	23,33	19,13	37,41	16,99	1.667,2
ZI16	3.525,3	74.495,3	0,55	7,30	47,75	36,19	8,04	957,5
ZI17	93,6	67.967,5	0,65	3,52	88,54	6,24	1,03	343,4
ZI18	210,8	91.729,1	0,78	0,87	95,17	3,40	0,35	3.453,7
ZI19	436,7	66.544,5	0,76	3,08	77,50	13,41	4,53	5.257,3
ZI20	237,5	135.151,1	0,72	9,46	71,06	14,93	3,57	7.272,5

5.1.2 Cuenca del río Toltén

La cuenca del río Toltén fue dividida en 11 zonas de riego. La división se realizó considerando los mismos criterios mencionados en la sección 5.1.1. La Tabla 5-2 presenta la información. Las zonas de riego se muestran en la Figura 5-2.

Tabla 5-2: Datos de zonas de riego en cuenca del río Toltén.

Zona	ARIEGO has	ASECANO has	EFICIENCIA %	CULTIVO 1 % AREA forrajeras	CULTIVO 2 % AREA bosques	CULTIVO 3 %AREA cereales	DERECHOS PERM. l/s
ZT1	1143,4	109722,5	0,59	14,3	81,7	3,0	1756,8
ZT2	248	67373,3	0,60	16,7	73,3	9,6	1830,8
ZT3	48,5	65333,6	0,60	12,8	59,4	26,6	823,3
ZT4	1237,3	273668,8	0,69	32,5	53,6	9,3	4967,6
ZT5	1094,8	63926,5	0,73	47,1	31,8	15,8	624,4
ZT6	2964,1	32326,4	0,60	21,4	34,1	37,0	1096,7
ZT7	571,3	76429,2	0,89	30,9	34,4	29,8	1066,1
ZT8	4063	36000,0	0,59	34,3	42,2	16,4	8575,6
ZT9	471,2	75918,2	0,76	9,6	84,9	4,5	524,2
ZT10	758,3	63876,9	0,66	28,1	38,9	30,0	10455,2
ZT11	319,7	30279,5	0,82	26,0	58,5	14,7	1175,1

5.1.1 Cuencas costeras

Las cuencas costeras de la región son pequeñas si se comparan con las cuencas del río Toltén y del Imperial. Se utilizó la definición de cuencas de la DGA para realizar la definición. La cuenca del río Budi (ZC1), la costera entre río Budi y río Toltén (ZC2) y la cuenca del río Queule (ZC3) se modelaron como una única zona de riego. La Tabla 5-3 muestra la distribución espacial.

Tabla 5-3: Datos de zonas de riego en cuencas costeras.

Zona	ARIEGO has	ASECANO has	EFICIENCIA %	CULTIVO 1 % AREA forrajeras	CULTIVO 2 % AREA bosques	CULTIVO 3 %AREA cereales	CULTIVO 4 % AREA Cult. Industrial	DERECHOS PERM. l/s
ZC1	82,4	49.438	0,60	16,7	54,0	28,0	1,0	670,0
ZC2	162,5	15.975	0,60	24,0	20,0	38,0	18,0	1.830,8
ZC3	126,2	65.557	0,60	5,2	87,8	4,2	2,7	1.960,0
ZC1	82,4	49.438	0,60	16,7	54,0	28,0	1,0	670,0

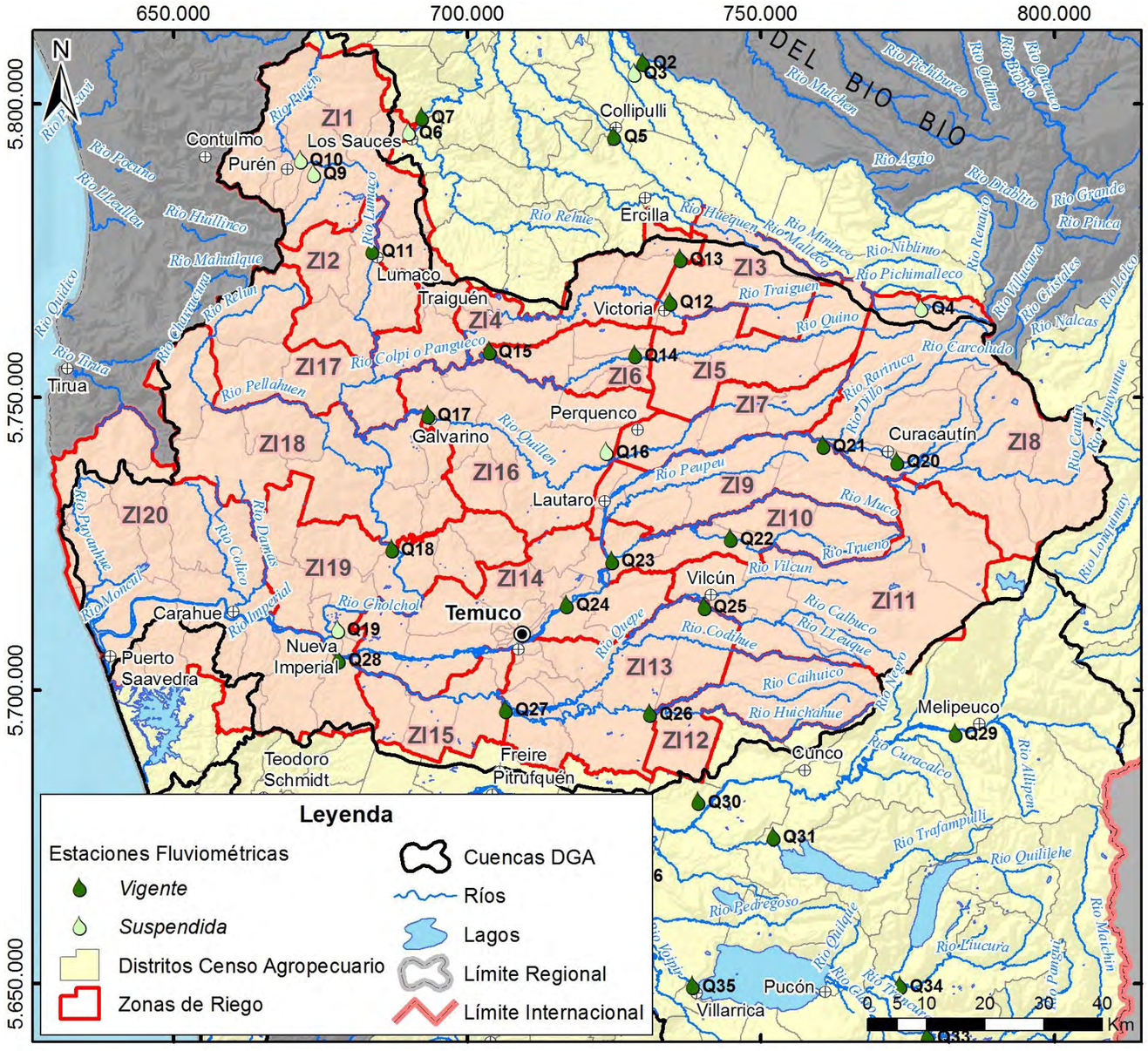


Figura 5-1. Distribución de zonas de riego en cuenca del río Imperial

Figura 5-2. Distribución de zonas de riego en cuenca del río Toltén

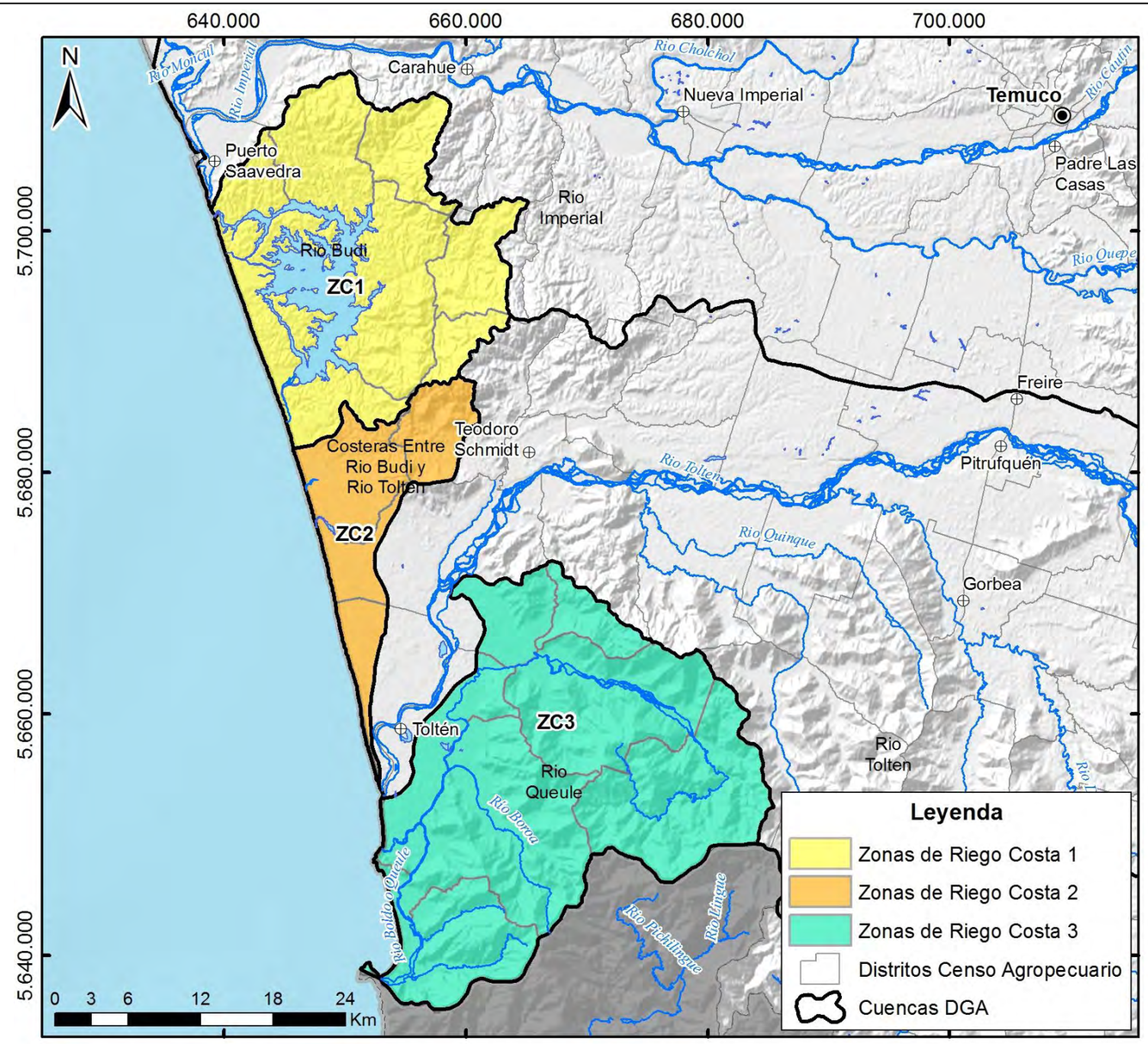


Figura 5-3. Distribución de zonas de riego en cuencas costeras

5.2 HIDROLOGÍA APLICADA A LA MODELACIÓN

Si bien en el capítulo 4 de este estudio se presenta una caracterización hidrológica de la región de La Araucanía, las necesidades de la modelación de la hidrología de superficie requieren de un mayor tratamiento de la información generada. Estas necesidades están orientadas 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 incluye:

- Relleno de información faltante.
- Separación del flujo base
- Transposición de caudales

5.2.1 Relleno de información faltante

Dada la cantidad y calidad de la información recopilada, se decidió realizar la modelación hidrológica para el período comprendido entre abril de 1980 y febrero de 2013. La información permite tener una serie de información suficiente (~34 años) para representar la hidrología y estimar sus componentes en el largo plazo.

Ya que los objetivos del relleno de información faltante presentado en el capítulo 4 están orientados a extender y completar las series hidrometeorológicas para una mejor comprensión del sistema, algunos meses no pudieron ser rellenados porque la mejor opción de rellenado tampoco tenía información para esos meses en particular. Pero la aplicación del modelo hidrológico requiere que todos los meses las variables de entrada al modelo tengan información; si no las considera como ingreso nulo.

Es por esta razón que para el relleno de precipitaciones y caudales en aquellos meses sin información, se utilizó la segunda mejor opción de rellenado, siguiendo la misma metodología descrita en el capítulo 4. Para el caso de la temperatura, al ser una variable menos determinante y a la vez con menos registros, se optó por rellenar utilizando las medias mensuales estimadas en la serie. De esta manera se cuenta con series con información completa.

5.2.2 Separación del flujo base

Dada la magnitud de los caudales registrados en la Región, se consideró que la separación del flujo base del flujo total favorece la comprensión de la hidrología de superficie. Entendiendo por flujo base a aquel conformado por el agua que fluye desde el almacenamiento subsuperficial del agua subterránea hacia los cauces, su comprensión permite evaluar las condiciones de escorrentía superficial en períodos no influenciados por precipitaciones, y en aquellos períodos de precipitaciones no considerar la escorrentía directa provocada por éstas, que además, es la que tiene mayores errores en su medición sobre todo en crecidas importantes.

Además, la separación del flujo base de la escorrentía directa permitirá agregar a la modelación hidrológica y modelación hidrogeológica otra variable de calibración, fortaleciendo las estimaciones obtenidas de cada una.

Si bien la separación del flujo base es incierta debido a la compleja interacción entre el sistema superficial y el subsuperficial, existen variados métodos para su estimación: gráficos, basado en algoritmos o hidroquímicos en base a trazadores.

Para este estudio se optó por una separación de flujo base a partir de un algoritmo que utiliza los registros históricos mensuales para este cálculo. El algoritmo utilizado es el presentado por Chapman y Maxwell (1996)[5], en que el flujo base para el mes t ($Q_{b(t)}$) está dado por,

$$Q_{b(t)} = K \cdot Q_{b(t-1)} + (1 - K) \cdot Q_{d(t)}$$

donde *K* es el parámetro de separación único para toda la serie, $Q_{d(t)}$ es el flujo directo para el tiempo *t*. Considerando que la escorrentía total en el tiempo *t* ($Q_{(t)}$) es la suma del flujo base más la escorrentía directa, de la ecuación anterior se obtiene que

$$Q_{b(t)} = \frac{K}{2 - K} \cdot Q_{b(t-1)} + \frac{(1 - K)}{2 - K} \cdot Q_{d(t)}$$

El parámetro *K* se ajustó minimizando la diferencia entre la escorrentía total y el flujo base para los meses de estiaje (diciembre a marzo), por considerarse que, en el largo plazo, en estos períodos la escorrentía total es mayoritariamente proveniente del vaciamiento del volumen subsuperficial.

Este ajuste se realizó en las estaciones fluviométricas de la cuenca del río Imperial con el objetivo de buscar un parámetro *K* que defina la separación del flujo base para toda la cuenca. En la Tabla 5-4 se presenta el valor de *K* ajustado para cada estación. Para las estaciones Q16 y Q19 se obtuvo que el parámetro que mejor ajusta la separación de caudales es igual a 0, es decir, 50% es flujo base y 50% es escorrentía directa, pero ambas son estaciones que tienen más de un 90% de la serie rellenada por lo que no se consideró para el ajuste del parámetro *K*. En las otras estaciones, se estimaron parámetros entre 0,81 y 0,95 con un promedio de 0,9. Se asume que ese último valor es una buena estimación del parámetro de separación de caudales y se considera válido para la modelación hidrológica. En la Figura 5-4 se presenta un hidrograma representativo de la cuenca (Q24) para toda la serie y para un período acotado (enero de 1990 a diciembre de 2004) para mejor visualización de la separación del flujo base. De la Figura 5-4b) se observa que con el *K* estimado se obtiene un desfase de un mes entre los máximos de la escorrentía total y el máximo del flujo base, razonable debido a la respuesta más lenta del volumen subsuperficial en generar la escorrentía.

[5] Chapman y Maxwell (1996). Baseflow Separation - Comparison of Numerical Methods with Tracer Experiments. Hydrology and Water Resources Symposium (23rd : 1996 : Hobart, Tas.). Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of Papers. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, 1996: 539-545.

Tabla 5-4: Ajuste del parámetro de separación de flujo base (*K*)

Estación	*K*	Estación	*K*	Estación	*K*
Q9	0,91	Q16	-	Q23	0,89
Q10	0,81	Q17	0,95	Q24	0,88
Q11	0,92	Q18	0,92	Q25	0,92
Q12	0,91	Q19	-	Q26	0,84
Q13	0,85	Q20	0,88	Q27	0,89
Q14	0,91	Q21	0,91	Q28	0,88
Q15	0,93	Q22	0,89		

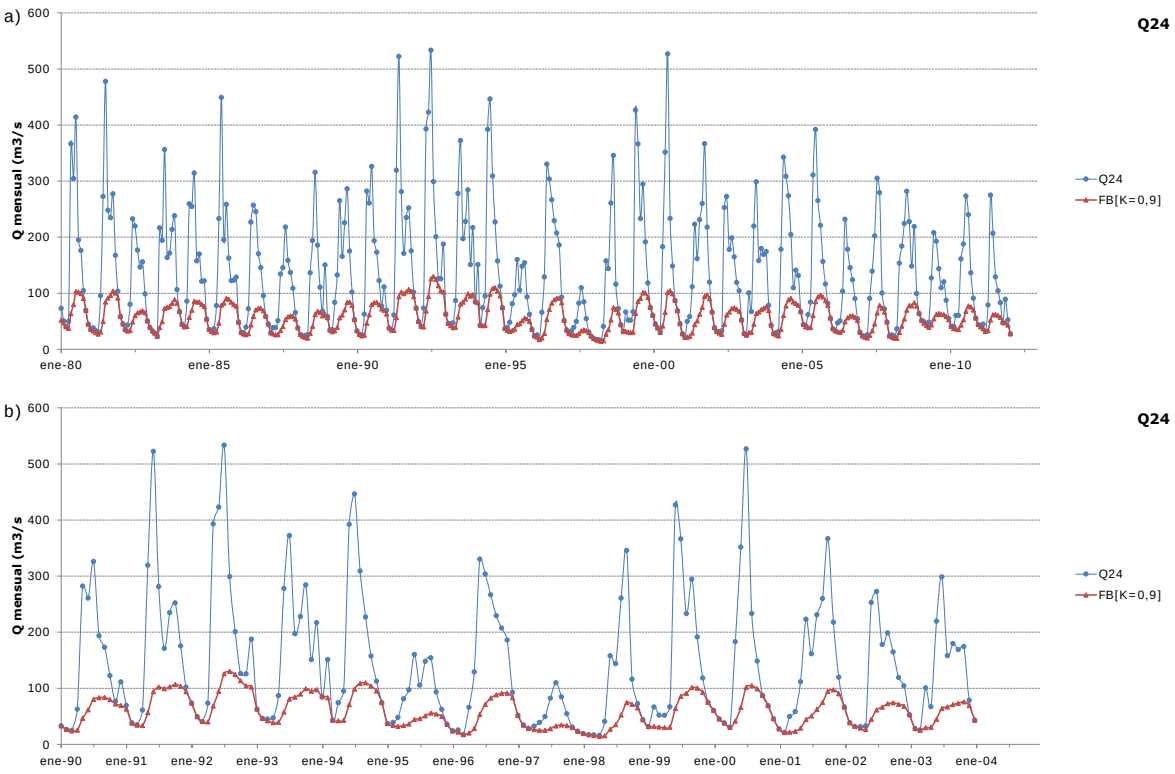


Figura 5-4: Separación del flujo base (FB) de la escorrentía total en la estación Q24 para el período ene-80 a feb-2013 (a) y ene-90 a dic-04 (b)

5.2.3 Transposición de caudales

Dada la configuración y necesidades del modelo hidrológico es que a partir de las estaciones fluviométricas se han generado caudales en puntos sin control fluviométrico y que se consideran como entradas a los respectivos modelos.

Esta transposición se realizó a partir de las áreas que drenan a cada punto de interés y la precipitación media estimada para cuenca de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_1}{P_{p_1} \cdot A_1} = \frac{Q_2}{P_{p_2} \cdot A_2}$$

$$Q_1 = f \cdot Q_2$$

donde Q_i es el caudal de salida de la cuenca *i*; Pp_i la precipitación media anual de la cuenca *i*, estimada a partir del mapa de isoyetas presentado en el capítulo 4; A_i es el área de la cuenca *i*; y *f* un factor de transposición.

Aunque es un método sencillo, considerando que gran parte de los puntos transpuestos está en la misma cuenca que el control fluviométrico, si no en subcuencas cercanas con un comportamiento hidrológico similar, es que resulta válida esta aproximación para los caudales de ingreso a cada modelo. Pero al depender de la estimación de la precipitación media para cada cuenca tiene un rango de variabilidad que debe ser análizada y corroborada durante la calibración de cada modelo.

Los puntos donde se estimó un caudal y la estación fluviométrica utilizada para ello se presentan en la Tabla 5-5. En la Figura 5-5 se encuentran las estaciones fluviométricas y el punto hacia el cual se transpuso el caudal, las áreas y precipitaciones determinadas para cada cuenca de drenaje y el factor de transposición.

Además de los caudales transpuestos, el modelo hidrológico utiliza las estaciones Q10, Q22, Q32, Q33, Q34, Q35, Q38 y Q39 como ingreso directo por encontrarse cercanas a las cabeceras y en los aportes principales de cada zona de riego.

Tabla 5-5: Información de cuencas para transposición de caudales.

Caudal	**Área (km^2)**	**Pp (mm/año)**	**f**
Q12	100,1	1.800	0,88
Qzi3	71,9	2.200	
Q14	300,8	1.800	0,48
Qzi5	123,1	2.100	
Q16	148,7	1.500	0,54
Qzi7	69,2	1.740	
Q21	1.306,40	2.100	0,31
Qzi8	387,7	2.200	
Q25	378,9	2.200	0,73
Qzi11	277	2.200	
Q26	346,5	1.900	0,46
Qzi12	156,9	1.950	
Q29	849,3	2.100	0,68
Qzt1_1+Qzt1_2	588	2.050	

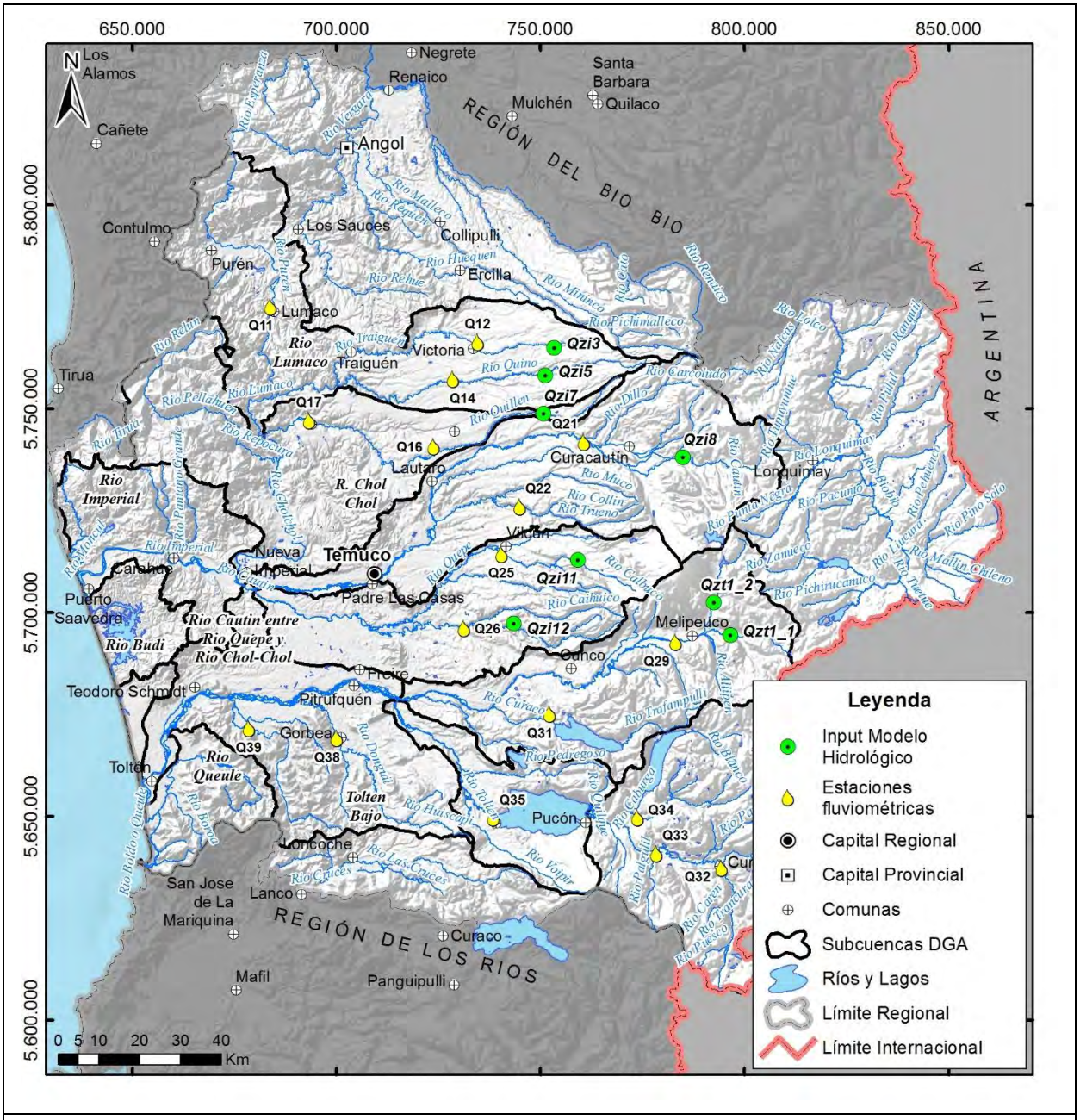


Figura 5-5: Caudales transpuesto utilizados como datos de entradas para el modelo hidrológico

5.3 MODELO HIDROLÓGICO EXTEND

Para la modelación hidrológica se desarrolló un modelo de simulación continua a nivel mensual que mediante relaciones de balance hídrico de masa y propagación de caudales transforma estadística de precipitaciones y caudales en una representación del sistema hidrológico en el largo plazo.

Se utilizó el programa ExtendSim que se caracteriza por una programación orientada a objetos de manera que cada uno representa un algoritmo que lleva a cabo un

determinado proceso. La conexión entre los módulos se realiza mediante trazos que unen los conectores de entrada y salida según corresponda para representar el movimiento del agua.

Su aplicación 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 Pp 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 del salida de la zona de riego; R, recarga por precipitaciones al almacenamiento subterráneo; η, las pérdidas o ganancias del sistema no consideradas, como discrepancia del modelo; y ΔS las variaciones en el almacenamiento.

Cada unidad de modelación o zona de riego se representó mediante tres módulos que agrupan y representan todas las componentes descritas en un solo evento. El primer modelo es Tramo de río que considera todos los escurrimientos generados en la zona; módulo Bocatoma que agrupa todas las extracciones al sistema; y módulo ZonaR que representa la componente pluviométrica y su comportamiento en la zona de riego.

En esta sección se describe el diseño del modelo, y la calibración, validación y aplicación de ésta en la estimación de las componentes del sistema hidrológico estudiado.

5.3.1 Módulos de modelación y parámetros

5.3.1.1 Módulo Tramo de río

Este módulo representa los cauces de la zona de riego en un tramo de río y puede agregar o restar al caudal las pérdidas o ganancias que tiene en su recorrido.

Las pérdidas o ganancias se calculan como una proporción del flujo entrante al módulo (+/-%/Km), o bien como un valor constante por unidad de longitud (m^3/s/Km). Los datos de entrada para este módulo son la longitud del tramo, la pérdida o ganancia por unidad de longitud y el porcentaje de pérdida o ganancia. El resultado es el caudal que pasa al tramo de aguas abajo en el río.

En este módulo interviene el parámetro η que agrupa las ganancias o pérdidas del río.

5.3.1.2 Módulo Bocatomas

El módulo Bocatomas permite representar el conjunto de las extracciones de caudales superficiales realizadas en la zona de riego, que van a suplir la demanda hídrica por medio de un canal de riego. El módulo considera dejar pasar en la sección el caudal ecológico y calcula una extracción limitada por los derechos de aguas superficiales asignados a la zona de riego.

5.3.1.3 Módulo ZonaR

El módulo ZonaR representa los procesos del ciclo hidrológico que se producen en cada zona de riego definida dentro de las cuencas de estudio.

El modulo está representado por una zona de riego directo y una zona de riego indirecto.

La zona de riego directo corresponde al área con plantaciones de cualquier tipo de cultivos que son regadas directamente por el ser humano.

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. Este tipo de zonas se han agrupado considerando los alcances y escala del estudio y los supuestos para la construcción del modelo, ya que una desagregación detallada a partir de las condiciones del suelo, no necesariamente entrega una mayor precisión en los resultados del modelo.

También se considera un almacenamiento que recibe la infiltración de ambas zonas de riego. En cada una de estas zonas se plantea una ecuación de balance de agua. La Figura 5-6 representa esquemáticamente los procesos que ocurren dentro de una zona de riego.

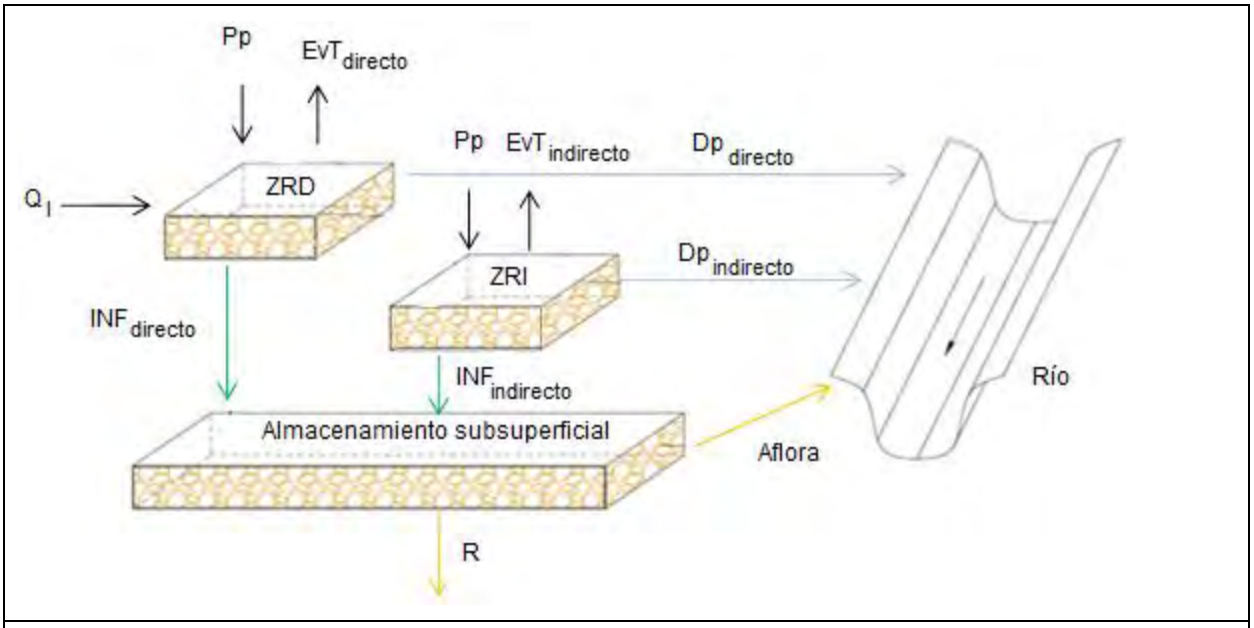


Figura 5-6: Vista esquemática de los procesos que ocurren en una zona de riego

Ambas zonas de riego tiene un algoritmo similar con algunas diferencias en las entradas y uso hídrico en cada una. Ambas reciben una precipitación Pp en donde a través de un coeficiente de escorrentía (Ce, parámetro del modelo) determina el agua que escurre directamente ($Dp=Pp \cdot Ce$). Luego el agua que no escurre está disponible para evapotranspirar (EvT) estimada a través del método de Blaney-Criddel (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° de latitud sur para la zona de estudio), T_m es la temperatura media mensual (°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.

5.3.2 Unidad de procesos hidrológicos

El funcionamiento de las cuencas hidrográficas es modelado con la interacción entre los módulos ZonaR, Tramo de río y Bocatomas. Estas interacciones son representadas a través de una unidad de procesos hidrológicos (UPH).

La combinación del módulo Bocatoma, que extrae un caudal de riego hacia el módulo ZonaR y permite conducir el resto de caudal por un módulo Tramo de río, compone una unidad de procesos hidrológicos. Los caudales de salida de este conjunto representan los caudales superficiales que escurren por el río, considerando los aportes de afloramientos o pérdidas, más las descargas de aguas superficiales de las zonas de riego.

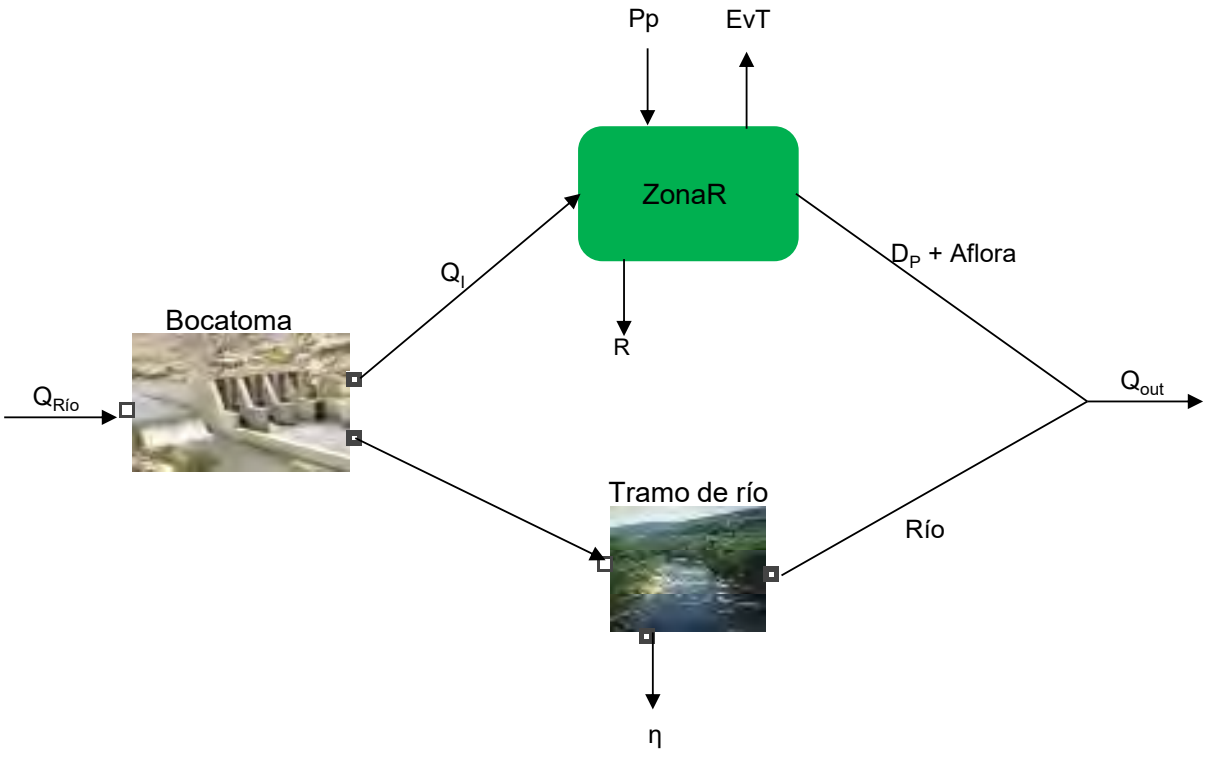


Figura 5-7: Unidad de procesos hidrológicos

5.3.3 Datos de entrada del modelo

Los datos de entrada para el modelo se obtuvieron a partir de estadísticas oficiales de la DGA analizados estadísticamente, catastros y antecedentes (ver capítulos 3 y 4)

- Para la precipitación se utilizaron los registros de la estación pluviométrica Freire Sendos (P28) ubicada a 100 msnm, entre los años 1980 y 2013. Esta estación se eligió ya que se encuentra ubicada en la parte central de la región, tiene su registro completo (falta 1 dato mensual en 40 años) y presenta una alta correlación espacial con las otras estaciones. Se determinó un factor de lluvia para estimar la precipitación mensual aportante a cada zona de riego. Este factor se calculó como la proporción de precipitación de cada zona de riego según las curvas de isoyetas anuales respecto de la precipitación media anual en la estación base (Sección 4.2).
- La evapotranspiración se estimó de manera indirecta a partir de la temperatura utilizando la ecuación de Blaney-Criddle presentada en la sección 4. Las estaciones meteorológicas utilizadas fueron T9, T10, T13, T14 y T18. A cada zona de riego se le asignó una de estas estaciones dependiendo de su cercanía.
- Se ingresaron los caudales en las cabeceras de las zonas de riego estimado mediante la transposición de caudales y las estaciones Q10, Q22, Q32, Q33, Q34, Q35, Q28 y Q39 como ingresos directos. Para la cuenca del río Toltén, la subcuenca de cabecera que drena hacia el lago Villarrica se modeló con el ingreso de las estaciones Q32, Q33 y Q34 para estimar las componentes hidrológicas de la zona de riego ZT4. Luego, dado que se cuenta con una estación fluviométrica a la salida del lago (Q35), se consideró su caudal como ingreso a la zona de riego ZT5. De esta manera, se

eliminan los errores debido a la modelación del comportamiento del lago Villarrica y se considera el vaciamiento real registrado en la estación.

- Los caudales medios anuales en las estaciones fluviométricas, para determinar los caudales ecológicos en la red de drenaje superficial.
- La longitud de los tramos de río.
- Los derechos de aguas superficiales para determinar el aporte de los ríos a las zonas de riego directo.
- Las áreas de la zona de riego directo por tipo de cultivo y sus coeficientes de cultivos, esto permitió determinar el uso consumo de los cultivos que son directamente regados.
- Las áreas asociadas a la zona de riego indirecto y sus coeficientes de cultivos, esto permite determinar el uso consumo de los cultivos de secano y de la vegetación en zonas naturales.
- Las proporciones utilizadas de la tecnología de riego, según sea por tendido, surcos, aspersión, microaspersión, carrete o goteo. Con esta información se determinó la eficiencia del riego

5.3.4 Variables de salida del modelo

La siguiente lista presenta las variables del proceso de modelación, a nivel mensual:

- Caudales en la toda la red topológica.
- Escorrentía superficial y descargas de los canales desde las zonas de riego directo e indirecto hacia los ríos.
- Demandas evapotranspirativas a nivel de zonas de riego directo (cultivos regados) e indirecto (cultivos de secano y vegetación natural).
- Aportes de aguas superficiales al riego de los cultivos.
- Déficit hídrico superficial.
- Recarga por las precipitaciones hacia los acuíferos.

5.3.5 Topología de red hídrica

La red hídrica del río Imperial se modeló representando las subcuencas de los ríos Lumaco, Cholchol, Cautín, y Quepe. La Figura 5-8 muestra la topología del modelo de la cuenca del río Imperial.

El modelo del río Lumaco está compuesto por 7 unidades de procesos hidrológicos (UPH) que se agrupan en tres ríos principales. El río Lumaco se forma en la zona norte de la cuenca del río Imperial (ZI1, ZI2 y ZI17) y recibe los aportes de la confluencia del río Traiguén (ZI3 y ZI4) con el Río Quino (ZI5 y ZI6).

El modelo del río Cholchol es la continuación del sistema del río Lumaco y está compuesto por 4 UPH, que se agrupan en el río Cholchol (ZI18 y ZI19) y el río Quillén (ZI7 y ZI16).

El modelo del río Cautín se compone 4 UPH. Parte en la zona alta de la cuenca (ZI8 y ZI9), en su curso medio recibe los aportes del río Muco (ZI10) y continúa su curso (ZI14) para luego confluir con los sistemas del río Quepe y el río Cholchol.

El modelo del río Quepe se compone de 4 UPH. Parte en la zona alta de la cuenca (ZI11). El río recibe en su curso medio (ZI13) los aportes del río Huichahue (ZI12). En su parte baja (ZI15) confluye con el río Cautín.

La red hídrica del río Toltén se modeló representando las subcuencas de los ríos Allipén, Pucón, Lago Villarrica y Toltén Alto y Toltén Bajo. La Figura 5-9 muestra la topología del modelo de la cuenca del río Toltén.

El modelo del río Pucón (ZT4) se compone de una UPH. Se ubica en la zona cordillerana de la región y descarga en el sistema del Lago Villarrica y Toltén Alto (ZT5).

El modelo del río Allipén se compone de 4 UPH. Parte en la zona alta de la cuenca (ZT1). En su curso medio (ZT2) recibe los aportes del río Curaco (ZT3) y después de un recorrido de 15 Km (ZT6) confluye con el sistema del Lago Villarica y Toltén Alto.

El modelo del río Toltén bajo se compone de 5 UPH. En su curso medio (ZT8) recibe los aportes del río Donguil (ZT7). Antes de su desembocadura (ZT10 y ZT11) recibe los aportes del río Quinque (ZT9).

Es importante destacar que en la cuenca del río Toltén existen cuatro lagos (Villarrica, Caburga, Colico y Huilipilun). En el modelo fueron simplificados, considerando que el sistema parte desde su desembocadura hacia aguas abajo. Este supuesto se respalda en que la escala del modelo es regional y que el efecto atenuador de los lagos en los caudales no es relevante en el largo plazo.

5.3.6 Supuestos para la construcción del modelo

- La zona de riego que contiene a la ciudad de Temuco (ZI14), se considera con un coeficiente mayor que el del resto de las zonas, para representar la mayor urbanización de la zona.
- Para simular las zonas de riego donde existen lagos, se consideró como una superficie con una evapotranspiración igual a la estimada a partir del método de Blaney-Criddel presentado en la sección sección 4. Además se agrega un parámetro Infiltración directa, con el cual existe un porcentaje de agua que una vez que infiltra desde la superficie, se transforma inmediatamente en recarga al acuífero.

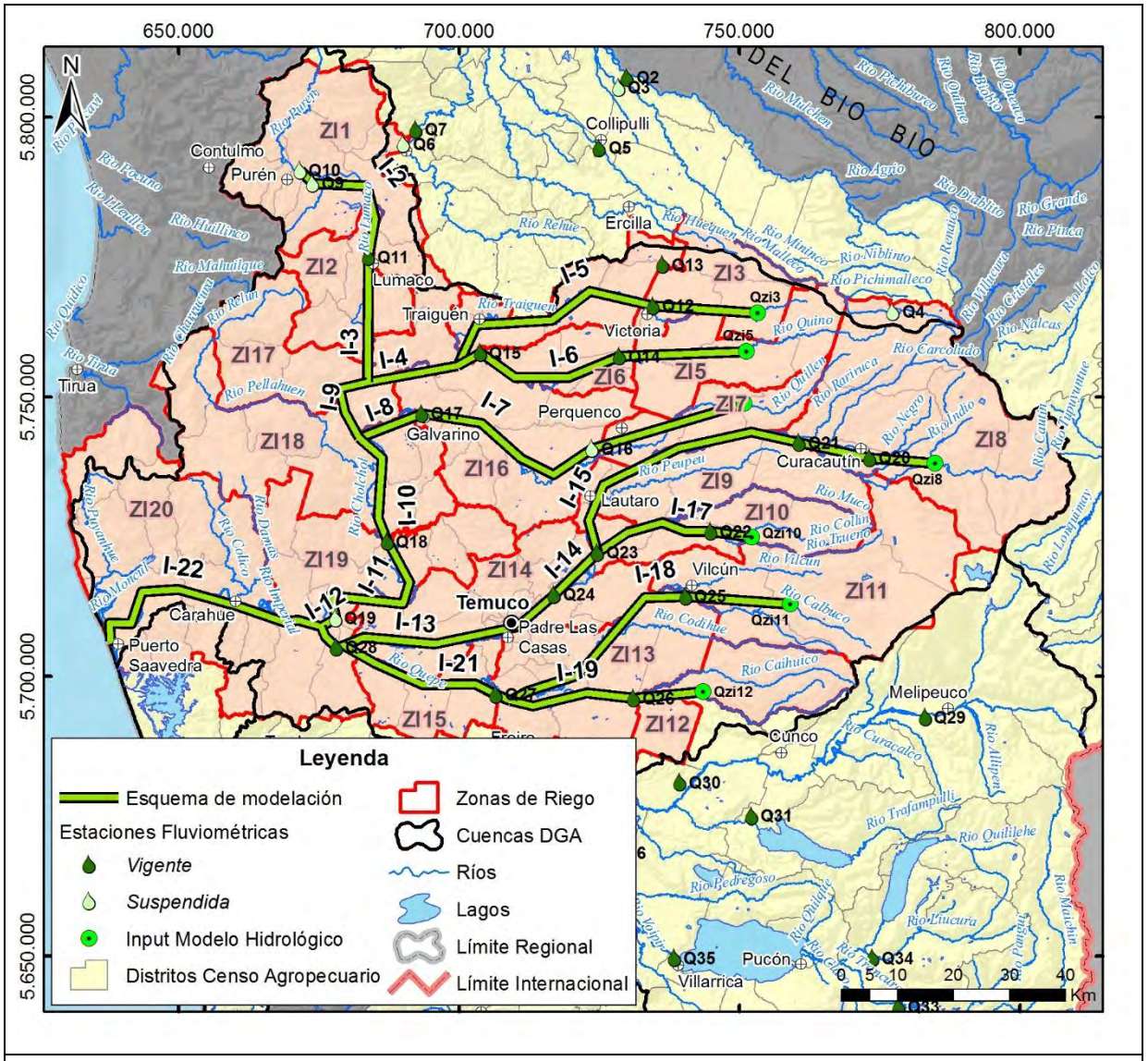


Figura 5-8. Topología del modelo de la cuenca del río Imperial

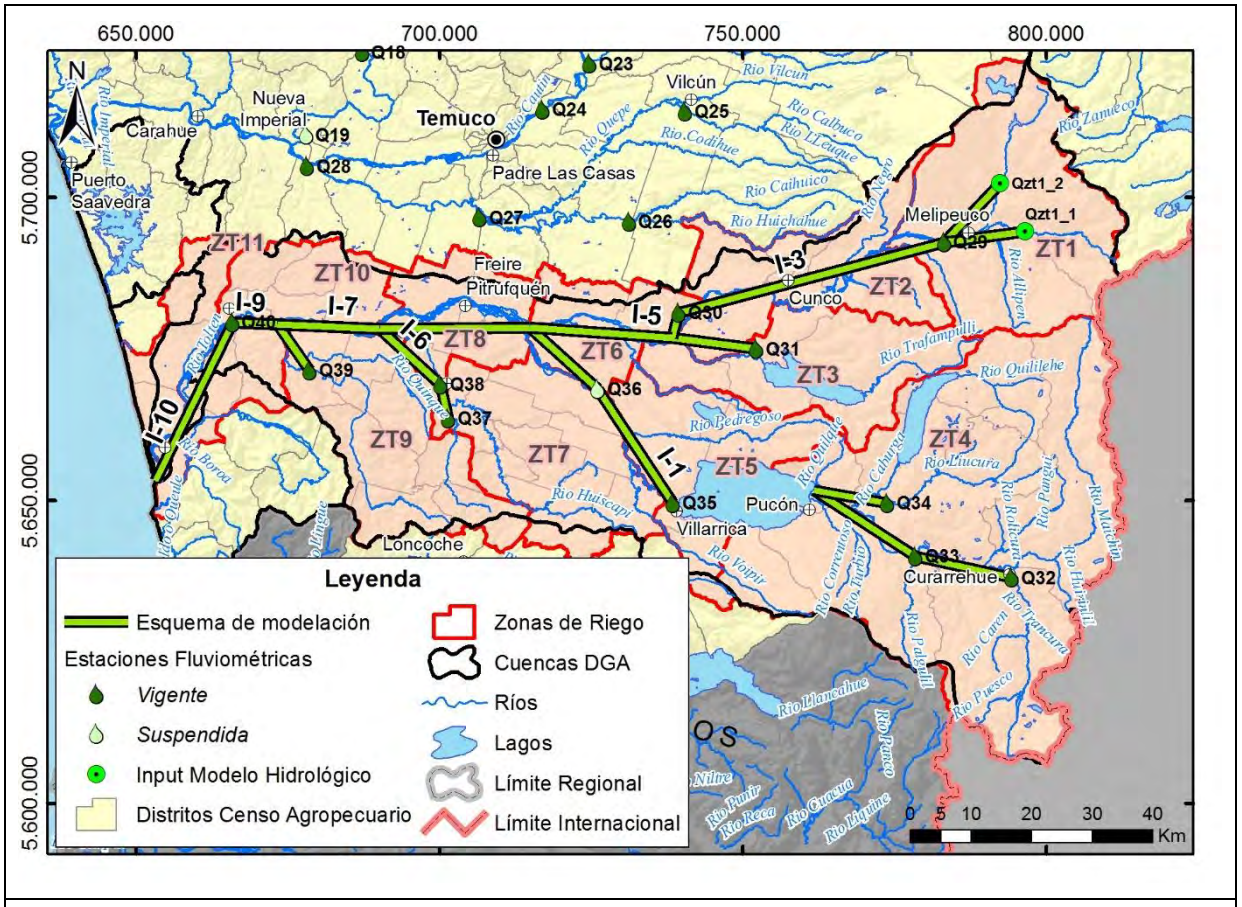


Figura 5-9. Topología del modelo de la cuenca del río Toltén

5.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo es un proceso por el cual, mediante el ajuste de parámetros, se busca representar las variables medidas en la zona de estudio.

Para el caso del modelo hidrológico en la región de La Araucanía, se han calibrado los parámetros en la cuenca del río Imperial para representar los caudales totales registrados en las estaciones fluviométricas y los flujos bases estimados a partir de éstos. La decisión de incluir esta segunda variable, radica en que por las magnitudes de los caudales en la región, calibrar parámetros que, por ejemplo, determinan componentes como la recarga, de un orden de magnitud inferior, resulta despreciable y poco eficiente considerando los alcances del estudio. El flujo base para todas las estaciones es menor al 50% del caudal total, favoreciendo la precisión de la calibración.

Los parámetros se ajustaron minimizando el error cuadrático medio (ECM) para cada serie de calibración, de acuerdo a la siguiente ecuación,

$$ECM^{0,5} = \frac{\sum_{t=1}^{n} \sqrt{(Q_o^t - Q_m^t)^2}}{n}$$

donde Q_o^t es el caudal observado en el tiempo t; Q_m^t es el caudal modelado para el tiempo t; y *n el* número de meses considerados en al modelación

La bondad de la simulación se verificó a través del cálculo del coeficiente de Nash y Sutcliffe (1970), el cual mide la eficiencia de la modelación en comparación con el valor medio de la serie registrada. El coeficiente de Nash-Sutcliffe (E) se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación,

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_o^t - \bar{Q}_o)^2}$$

donde Q_o^t es el caudal observado en el tiempo t; Q_m^t es el caudal modelado para el tiempo t; y $\bar{Q}_o$ es el caudal medio observado para toda la serie. Este coeficiente puede estar entre -∞ y 1. Un coeficiente $E=1$ indica una simulación perfecta de los caudales; $E=0$, indica que el modelo predice los valores observados con la misma precisión que la media de los caudales observados; y si $E<0$, indica que la media de los caudales observados es una mejor representación que los valores simulados.

Considerando que el estudio estima componentes hidrológicas a una escala regional, es que se ha optado por mantener para cada zona de riego el mismo set de parámetros, salvo los supuestos mencionados en la sección 4 (zona de riego para la ciudad de Temuco, y zonas de riego con presencia de lagos).

Considerando que la red hídrica está representa por una componente fluvial y una pluvial (precipitación en zonas de riego, en que un porcentaje pasa a ser fluvial), es que la primera componente se torna cada vez más importante hacia aguas abajo. Por esto, los parámetros que intervienen en la transformación de precipitaciones pierden categoría en el resultado de la modelación.

Esto obliga a ajustar los parámetros, y sobre todo los que determinan la recarga al sistema subterráneo, en las cabeceras del modelo, para luego finalizar el ajuste con los parámetros que aguas abajo influyen en mayor proporción (coeficiente de escorrentía).

Los parámetros ajustados se presentan en la Tabla 5-6, todos pertenecientes al módulo Zona de riego. El otro parámetro que interviene en el modelo, Ganancia-Pérdida del río (η), se ajusta para cada unidad de modelación por lo que no tienen un valor fijo.

Tabla 5-6: Ajuste de parámetros durante la calibración.

Parámetro		Valor
Ce (%)	Coeficiente de escorrentía	0,65
CC (%)	Capacidad de campo	0,8
ID (%)	Infiltración directa	0
Ka (mes)	Factor de reacción para afloramiento	3,5
Kr (mes)	Factor de reacción para recarga	9

En la Figura 5-7 se presentan las estaciones utilizadas en la calibración, el caudal medio mensual observado (Obs) y simulado (Sim), el flujo base medio mensual observado (Obs) y simulado (Sim), la raíz de error cuadrático medio ($ECM^{0,5}$) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (E). Entre las Figura 5-10 y Figura 5-14 se presentan las calibraciones con respecto al flujo base para cada estación. Además para las estaciones Q11 (Figura 5-10),

Q15 (Figura 5-11) y Q28 (Figura 5-12) se presenta también la calibración con respecto al flujo total a modo de ejemplo. En el Anexo digital C.22 se respaldan los resultados de esta sección.

Del total de estaciones, en cinco el modelo simulado no resulta una buena representación del sistema. Esto puede ser explicado por la calidad en los registros fluviométricos y/o por los supuestos considerados para la construcción del modelo. Cuatro de las estaciones que no son una buena representación (Q12, Q16, Q25 y Q26) se encuentran en la parte inicial del modelo, previo paso por una zona de riego. A diferencia de éstas, Q11, Q14, Q21 y Q23, también se encuentran previo paso por sólo una zona de riego pero sí son una buena representación de la hidrología del sistema. Por esto se presume que el error en su modelación está influenciado por simplificaciones asumidas más que por una deficiencia del modelo. Por ejemplo, para la zona ZI03 se asume como única salida el caudal Q12 pero a partir de la red de drenaje tiene más salidas; Q16 para el período de calibración cuenta con poca información registrada y en su mayoría es una serie rellenada por lo que aunque es una buena estimación de la serie, no es una buena representación de eventos; para Q25 y Q26 (Figura 5-14) el error estaría influenciado por asumir que en todos las zonas de riego se usa el mismo set de parámetros, ya que al menos representa la tendencia en los escurrimientos. Pese a que los estadígrafos permiten asumir una buena representatividad en la estación Q19, se observa que el flujo base no predice de manera correctamente los caudales observados. Esto se debería al igual que en la estación Q16, a que gran parte de la información provienen del relleno de información.

Con la raíz del ECM de las estaciones que permiten una buena representación de la hidrología superficial del sistema, se determina 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.

En la simulación de caudales durante el invierno del año 2000, ocurre una crecida importante que no se reflejan en los caudales observados. Al revisar la serie de la estación pluviométrica P28 se observa que efectivamente es un período de muchas precipitaciones (2.380 mm versus 1.480 mm de un año hidrológico medio), comportamiento que se registra también en el resto de las estaciones. Por esto, las diferencias en la representación de este evento en particular, requieren una evaluación mayor de la calidad de los registros de caudales.

Dentro de la calibración el parámetro Ganancia-Pérdida (η), aunque no influye mayoritariamente en la estimación de las componentes hidrológicas provenientes de la precipitación, tiene importancia en la generación del hidrograma (en magnitud y no en su forma) ya que permite disponer o eliminar recurso hídrico, el cual se contabiliza dentro de las pérdidas o ganancias en el balance hídrico del sistema.

Tabla 5-7: Calibración del modelo hidrológico en la cuenca del río Imperial

	Flujo Total				Flujo Base			
	Obs (m^3/s)	Sim (m^3/s)	E	$ECM^{0,5}$ (m^3/s)	Obs (m^3/s)	Sim (m^3/s)	E	$ECM^{0,5}$ (m^3/s)
Q11	15,95	18,39	0,67	6,47	6,03	6,33	0,82	1,17
Q12	4,11	15,04	-10,96	10,94	1,32	4,22	-11,83	2,92
Q14	12,56	18,82	0,38	6,99	4,21	5,78	0,36	1,73
Q15	21,41	21,84	0,71	9,02	6,94	8,80	0,60	2,55

	Flujo Total				Flujo Base			
	Obs (m^3/s)	Sim (m^3/s)	E	$ECM^{0,5}$ (m^3/s)	Obs (m^3/s)	Sim (m^3/s)	E	$ECM^{0,5}$ (m^3/s)
Q16	4,92	9,25	-1,97	4,81	2,21	2,69	-1,92	1,17
Q17	19,26	23,72	0,45	7,64	8,64	9,71	0,36	1,77
Q18	120,51	122,37	0,69	45,38	45,26	49,43	0,76	9,94
Q19	157,67	136,47	0,58	80,54	53,19	52,10	0,49	24,33
Q21	87,88	109,81	0,30	27,61	42,99	43,64	0,37	7,52
Q23	24,04	26,76	0,86	5,44	9,20	9,17	0,88	1,26
Q24	132,79	143,19	0,77	33,24	56,09	57,95	0,84	7,26
Q25	30,34	56,45	-3,31	27,78	14,71	19,83	-3,12	7,56
Q26	12,14	20,84	-0,43	9,08	4,35	6,65	-0,67	2,42
Q27	83,72	98,92	0,53	29,42	33,88	37,19	0,66	6,68
Q28	252,34	257,98	0,73	73,41	100,24	102,86	0,75	18,24

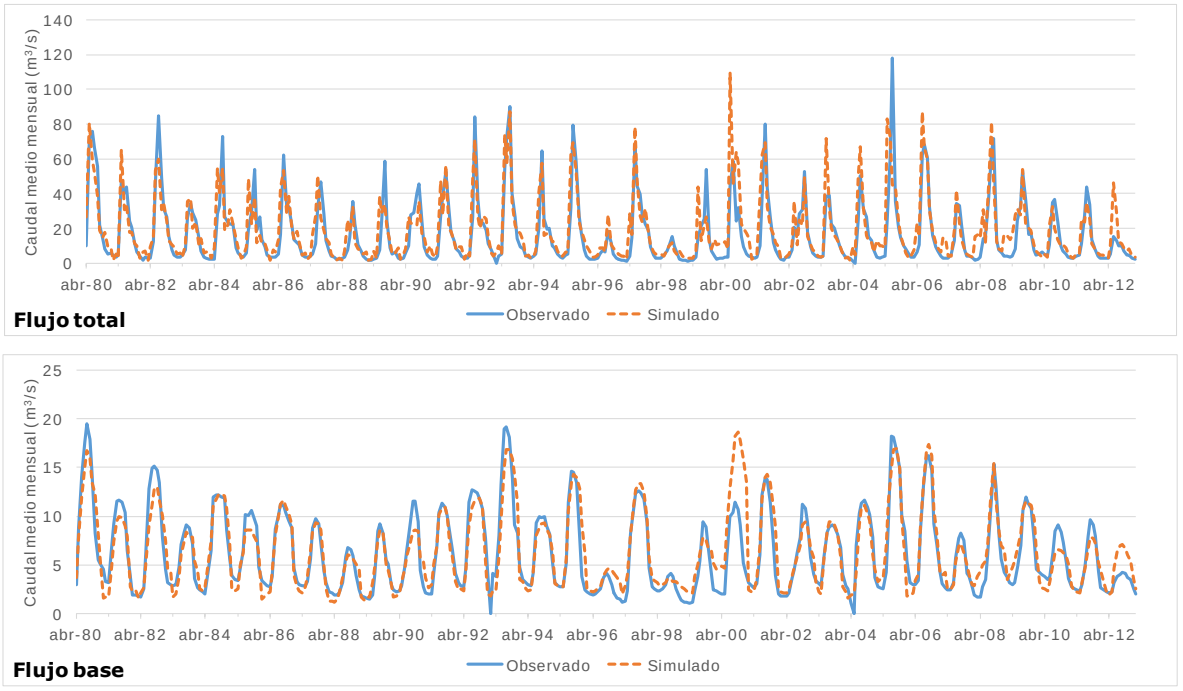
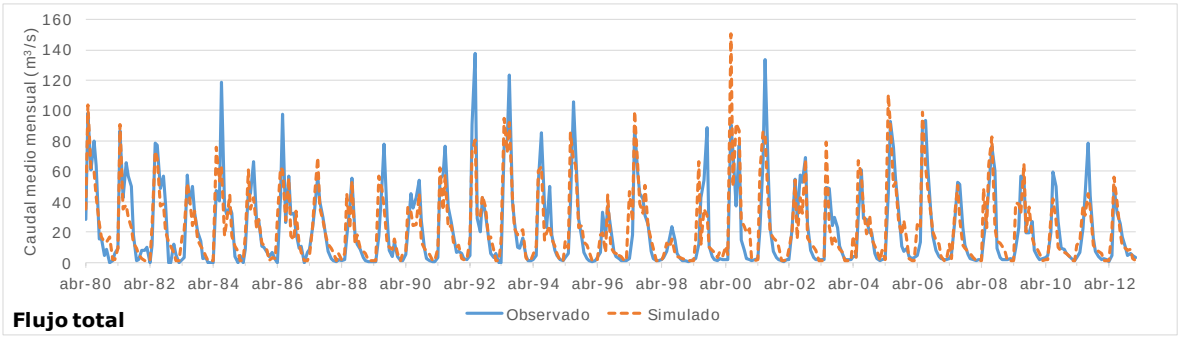


Figura 5-10: Calibración estación Q11



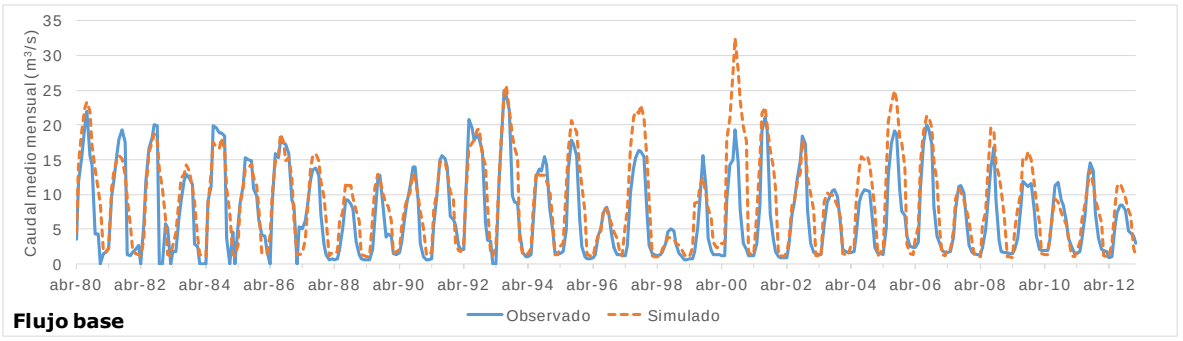
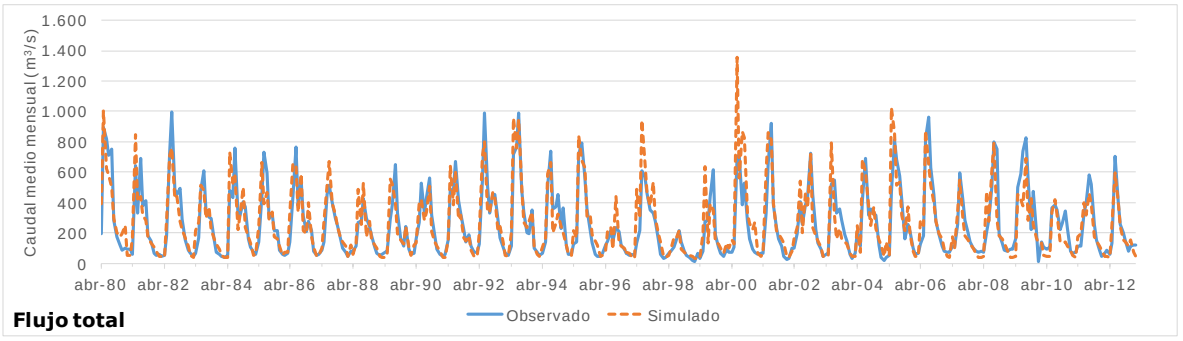


Figura 5-11: Calibración estación Q15



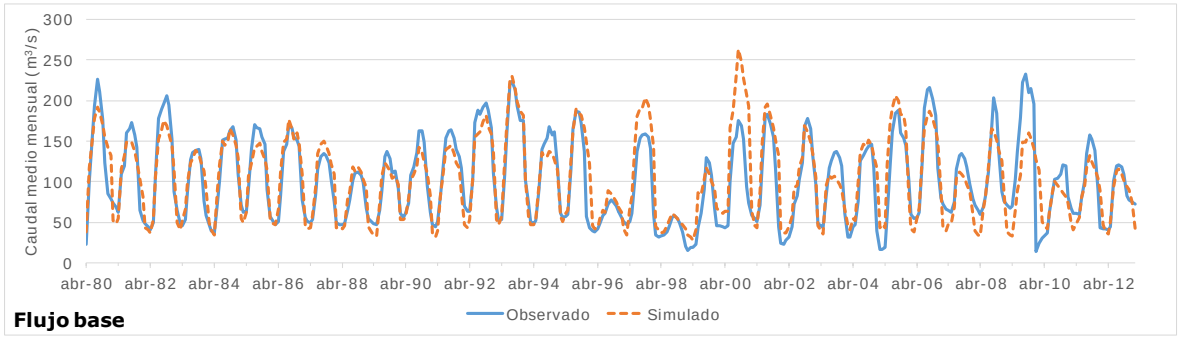
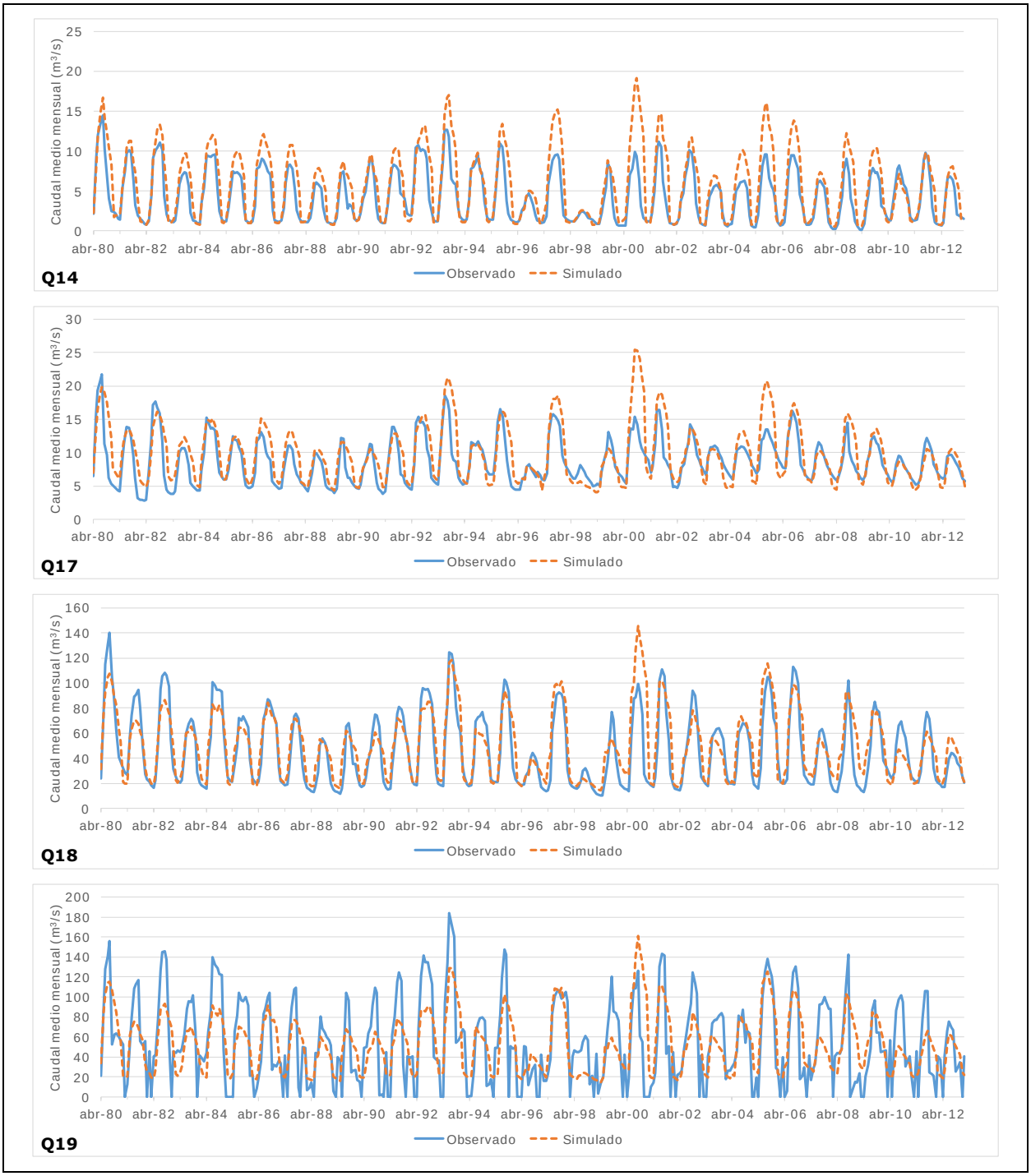


Figura 5-12: Calibración estación Q28


Caudal medio mensual (m³/s)
25
20
15
10
5
0
abr-80 abr-82 abr-84 abr-86 abr-88 abr-90 abr-92 abr-94 abr-96 abr-98 abr-00 abr-02 abr-04 abr-06 abr-08 abr-10 abr-12
Observado
Simulado
Q14
Caudal medio mensual (m³/s)
30
25
20
15
10
5
0
abr-80 abr-82 abr-84 abr-86 abr-88 abr-90 abr-92 abr-94 abr-96 abr-98 abr-00 abr-02 abr-04 abr-06 abr-08 abr-10 abr-12
Observado
Simulado
Q17
Caudal medio mensual (m³/s)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
abr-80 abr-82 abr-84 abr-86 abr-88 abr-90 abr-92 abr-94 abr-96 abr-98 abr-00 abr-02 abr-04 abr-06 abr-08 abr-10 abr-12
Observado
Simulado
Q18
Caudal medio mensual (m³/s)
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
abr-80 abr-82 abr-84 abr-86 abr-88 abr-90 abr-92 abr-94 abr-96 abr-98 abr-00 abr-02 abr-04 abr-06 abr-08 abr-10 abr-12
Observado
Simulado
Q19

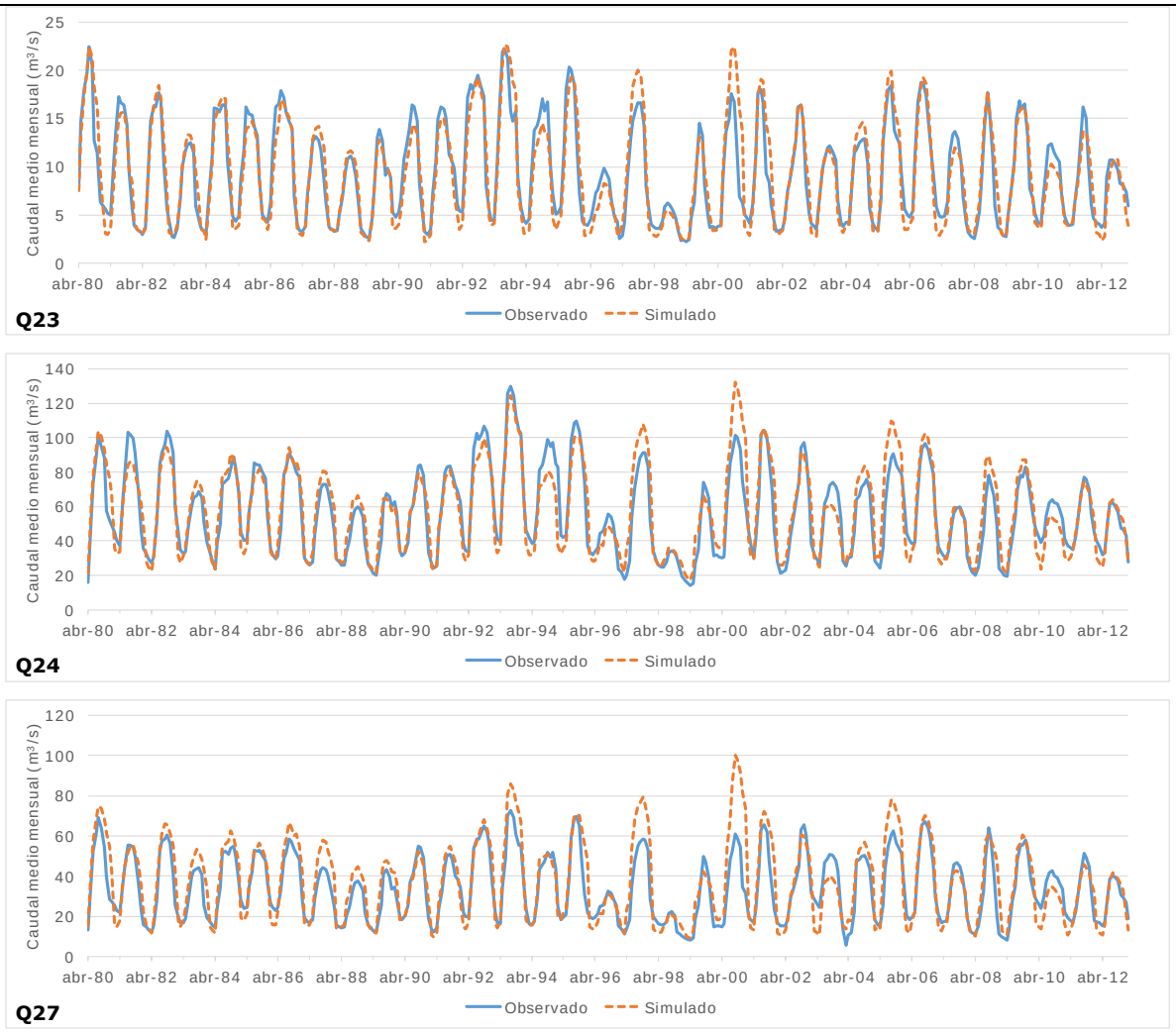
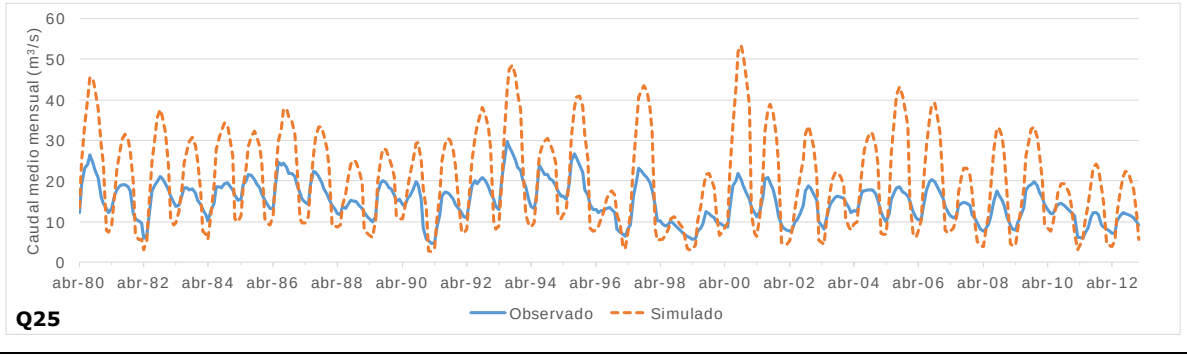


Figura 5-13: Calibración flujo base estación a) Q14, b) Q17, c) Q18, d) Q19, e) Q23, f) Q24 y g) Q27



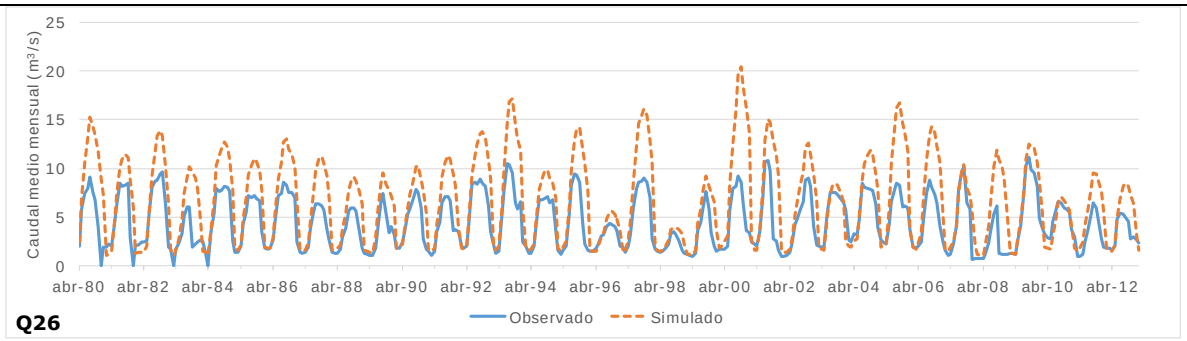


Figura 5-14: Calibración flujo base estación a) Q25, b) Q26

5.5 VALIDACIÓN DEL MODELO

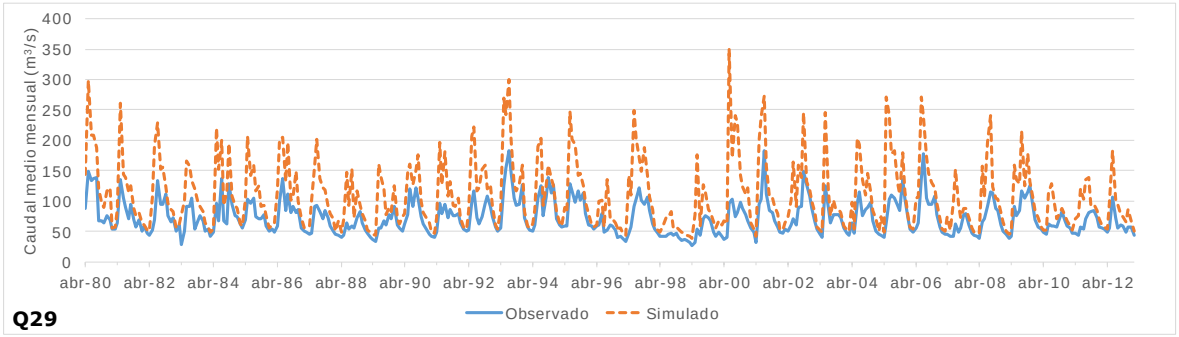
La validación del modelo hidrológico se realizó en la cuenca del río Toltén ya que está formado por una red hídrica más sencilla y con una disponibilidad hídrica fluvial mayor por lo que la calibración de parámetros que influyen en el balance hídrico a partir de las precipitaciones, es minoritaria y por ende menos precisa.

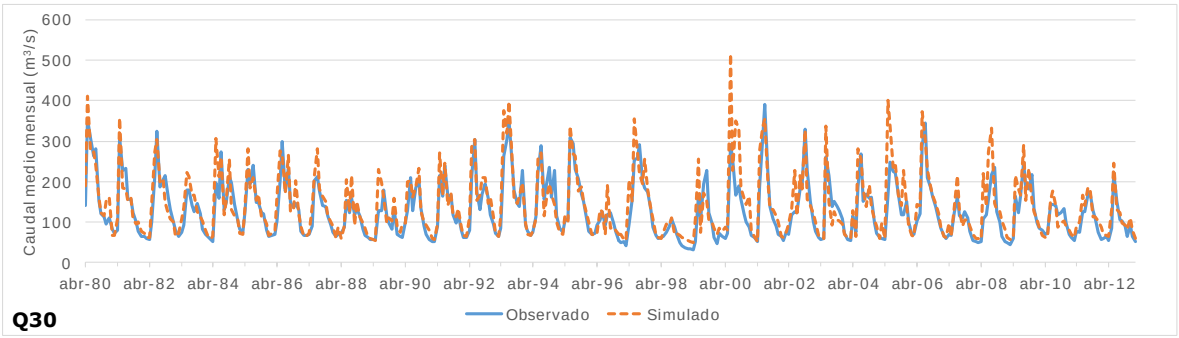
De esta manera se cuenta con cuatro estaciones para validar la generación de caudales históricas a partir de la modelación.

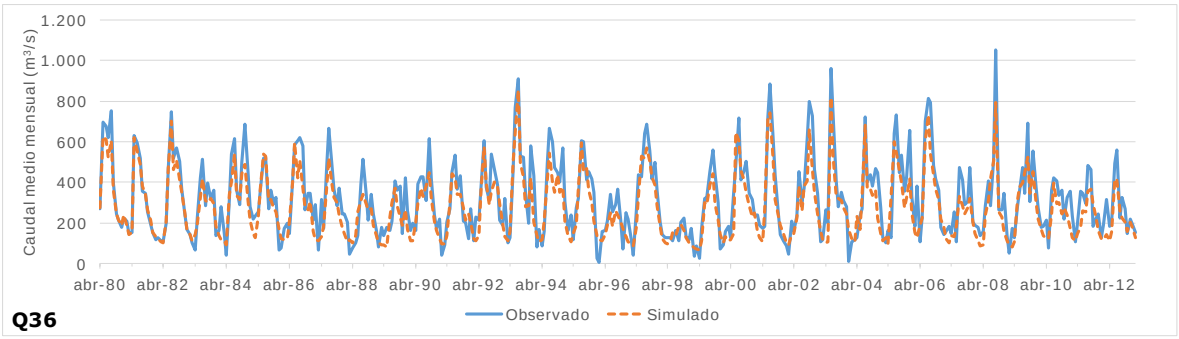
En la Tabla 5-8 se presentan las estaciones utilizadas en la calibración, el caudal medio mensual (*Q*), el flujo base mensual (*FB*), la raíz de error cuadrático medio ($ECM^{0,5}$) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (*E).* De acuerdo a los estadígrafos presentados, el modelo es una buena representación del sistema hidrológico, salvo en la estimación del flujo total para la estación Q29. De acuerdo a la raíz del ECM, el error medio mensual del modelo es de 21% para el flujo total (sin contar Q29) y para el flujo base se tiene un error mensual de 11%. En las Figura 5-15 y Figura 5-16 se grafican los caudales observados y simulados para cada una de la estaciones. 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.

Tabla 5-8: Validación del modelo hidrológico en la cuenca del río Toltén.

	Flujo Total				Flujo Base			
	Obs (m^3/s)	**Sim (m^3/s)**	**E**	**$ECM^{0,5}$ (m^3/s)**	**Obs (m^3/s)**	**Sim (m^3/s)**	**E**	**$ECM^{0,5}$ (m^3/s)**
Q29	72,20	107,76	-2,40	35,57	36,19	34,50	0,86	2,16
Q30	126,73	139,77	0,68	24,90	63,62	64,93	0,80	5,10
Q36	313,80	267,41	0,77	73,47	133,38	126,61	0,69	23,32
Q40	540,66	592,37	0,74	109,15	250,09	257,35	0,69	31,52







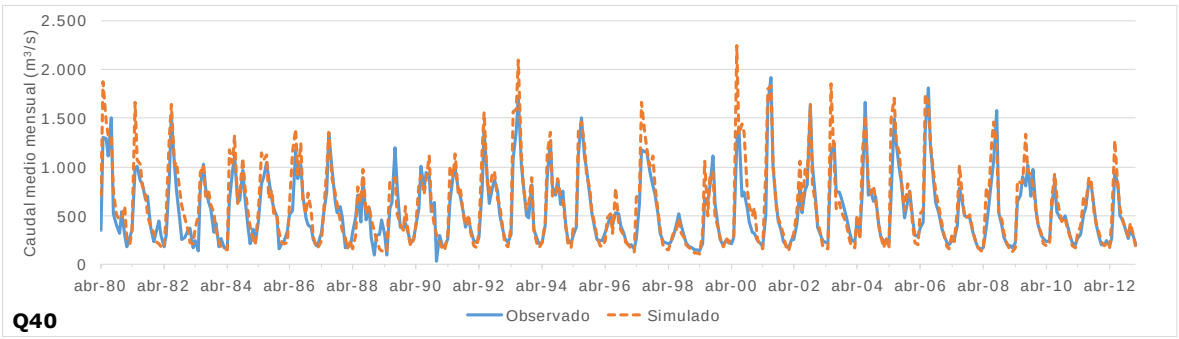


Figura 5-15: Validación del flujo total

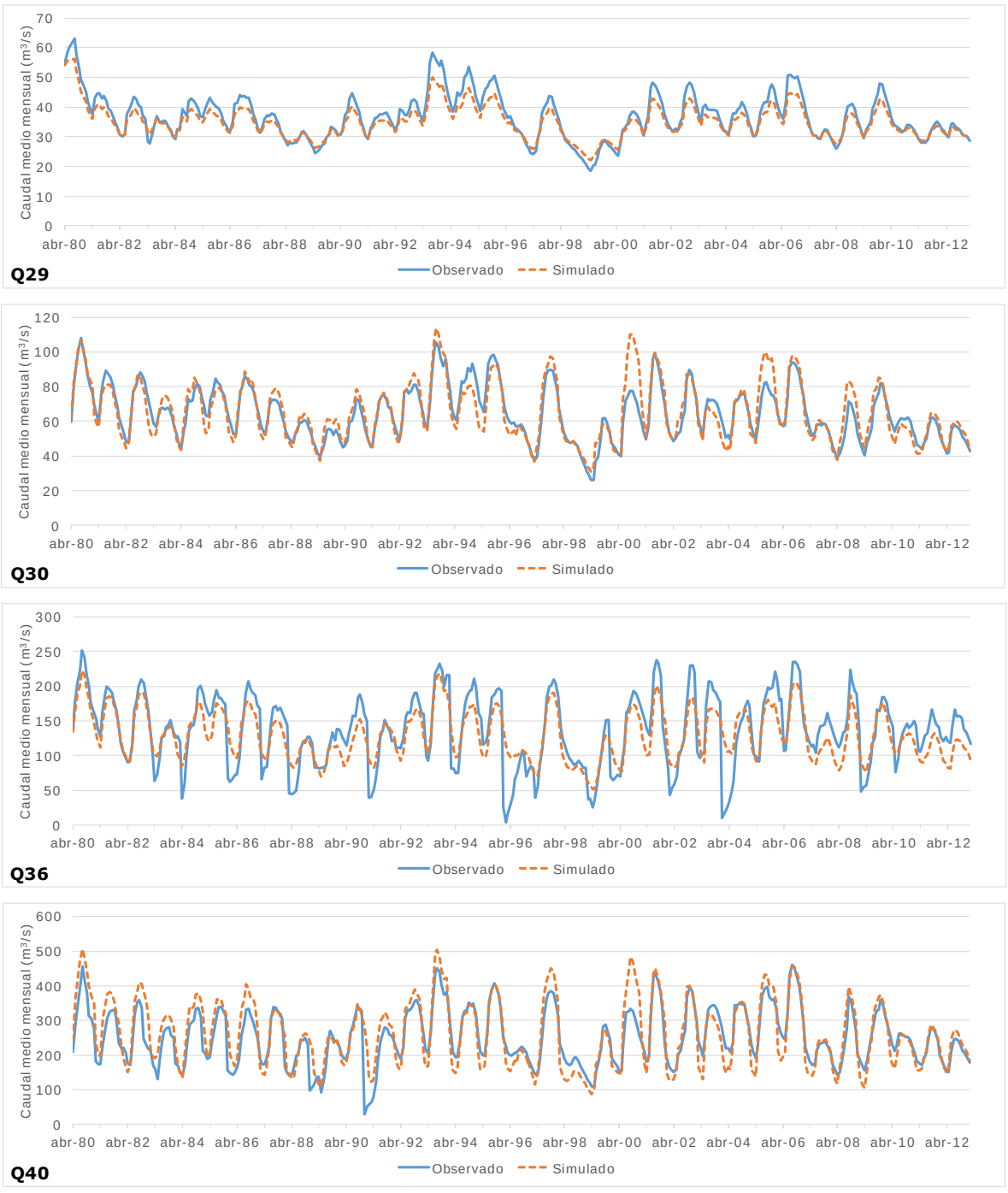


Figura 5-16: Validación del flujo base

5.6 APLICACIÓN DEL MODELO

Con el modelo calibrado y validado, se aplicó para estimar el balance hídrico por zona de riego, para la cuenca del río Imperial, del río Toltén y las cuencas costeras.

Si bien la modelación no ha podido ser validada para las cuencas costeras debido a que no existe información que permita comparar los caudales generados, el buen funcionamiento en las otras dos cuencas permite asumir una correcta estimación en ellas. Pese a esto, la estimación presentada debe ser utilizada considerando los objetivos y diseños del modelo, el cual es una herramienta para la comprensión y estimación del ciclo hidrológico superficial a escala regional y en largo plazo, y no una herramienta de gestión hídrica. Es importante señalar que todos resultados de la modelación hidrológica mediante el modelo ExtendSim se encuentran en el Anexo C.22.

5.6.1 Río Imperial

La estimación del balance hídrico por zona de riego se presenta en la Tabla 5-9 donde se incluye el caudal de ingreso (Q_i), las precipitaciones (*Pp*), la evapotranspiración (*EvT*), la descarga (*Dp*) compuesta por los escurrimiento y exceso de agua de riego generados en la zona de riego, el afloramiento (*aflora*) que es el caudal que aflora al río desde el volumen subsuperficial, *río* que es el agua que no ingresa a la zona de riego y continua por el módulo Tramo de río, la recarga (*R*) al acuífero por precipitaciones, y las ganancias o pérdidas del sistema (η) que no han sido consideradas, en las que se cuenta la interacción río-acuífero. El caudal de salida desde cada unidad está formado por la suma de *descarga, aflora* y *río.* Con la aplicación del modelo se estimó un déficit hídrico superficial (*DefH)* que si bien en la serie mensual de largo plazo este déficit es compensado, sí es frecuente observar déficits del orden de las centenas de litros por segundo en gran parte de las zonas de riego o cercanas al metro cúbico como en la zona ZI16 durante los períodos de estiaje. Además se presenta el porcentaje de recarga con respecto a la precipitación, estimado en un rango entre 0,6% y 4,3%, con un valor medio de 3,1%, equivalente a 20,6 m^3/s que si bien pareciera ser un valor bajo para zonas con clima templado lluvioso, se explica por la saturación de los sistemas subterráneo que favorecen la escorrentía superficial. El valor de η en su mayoría es cero o negativo. Este valor negativo indica que existe un ingreso a la zona de riego que no ha sido considerada.

Tabla 5-9: Balance hídrico por zona de riego para la cuenca del río Imperial.

Zona riego	Área km²	Q_i m³/s	Pp m³/s	EvT m³/s	Dp m³/s	Aflora m³/s	Río m³/s	R m³/s	η m³/s	DefH m³/s	R/Pp %
ZI01	818,1	10,1	27,2	19,3	6,4	2,4	10,0	0,6	-1,5	0,0	2,3
ZI02	376,3	18,9	13,8	9,2	4,7	1,3	17,1	0,3	0,0	0,0	2,4
ZI03	377,0	3,8	23,8	11,3	9,1	3,5	2,8	0,9	0,0	0,0	3,7
ZI04	374,0	15,5	16,2	9,8	5,5	1,8	15,0	0,5	-1,0	0,0	2,9
ZI05	466,0	5,9	27,6	13,6	10,0	3,9	5,4	1,0	-0,5	0,0	3,5
ZI06	237,1	19,4	9,7	6,0	3,8	1,0	18,0	0,3	0,0	0,0	2,7
ZI07	311,8	2,8	15,3	8,0	5,7	2,1	1,7	0,5	0,0	0,0	3,5
ZI08	1.264,0	42,1	96,7	37,8	40,0	16,5	55,4	4,2	-15,0	0,0	4,3
ZI09	532,5	111,9	26,6	13,8	10,1	3,6	105,0	0,9	5,0	0,0	3,4
ZI10	406,0	14,3	22,8	11,0	9,3	3,4	14,7	0,8	-2,0	0,0	3,7
ZI11	962,4	21,7	66,7	27,9	26,8	10,8	20,2	2,7	0,0	0,0	4,1

Tabla 5-9: Balance hídrico por zona de riego para la cuenca del río Imperial.

Zona riego	Área km²	Q_i m³/s	Pp m³/s	EvT m³/s	Dp m³/s	Aflora m³/s	Río m³/s	R m³/s	η m³/s	DefH m³/s	R/Pp %
ZI12	433,2	5,7	27,9	12,2	11,4	4,4	5,6	1,1	-1,0	0,0	4,0
ZI13	744,4	57,8	38,3	19,9	13,5	5,3	61,0	1,4	-5,0	0,4	3,5
ZI14	751,5	146,1	30,7	18,6	9,9	3,2	144,3	0,8	0,0	0,2	2,7
ZI15	293,8	101,1	13,0	7,5	5,1	1,7	99,3	0,5	0,0	0,0	3,4
ZI16	780,2	9,5	28,1	18,8	7,2	2,8	14,2	0,7	-6,0	0,5	2,6
ZI17	680,6	68,3	26,8	17,2	7,9	2,7	66,7	0,7	0,0	0,0	2,5
ZI18	919,4	101,5	37,6	22,9	11,3	4,1	109,6	1,0	-10,0	0,0	2,7
ZI19	669,8	125,1	37,6	22,9	11,3	1,0	127,9	0,2	-0,6	0,0	0,6
ZI20	1.557,1	403,1	55,4	34,6	15,3	5,9	401,3	1,5	0,0	0,0	2,6
Total	**12.955**	**1.284,6**	**641,8**	**342,3**	**224,3**	**81,4**	**1295,2**	**20,6**	**-37,6**	**1,2**	**3,2**

A partir del balance hídrico por zonas de riego, se estimó el balance para las subcuencas que conforman el río Imperial el cual se presenta en la Tabla 5-10 donde se incluye las precipitaciones (*Pp*), evapotranspiración (*EvT*), recarga al acuífero por precipitaciones (*R*), caudal de ingreso y salida (Q_i *y* Q_o), porcentaje de las precipitaciones que recargan al acuífero (*R/Pp*) y las ganancias o pérdidas del sistema (η). La ubicación de las subcuencas en la Figura 5-17; la subcuenca del río Quepe también incluye la subcuenca del río Cautín entre río Quepe y Cholchol. Considerando que las zonas de riego no corresponden a una unidad hidrológica si no que administrativa, algunas de ellas pertenecen a dos subcuencas; para efectos del balance a mayor escala se supuso que para estos casos, la zona de riego pertenece sólo a una de ellas. De la componente η, se observa que en cada subcuenca y por ende en la cuenca, existe un ingreso de agua de 37,6 m³/s al sistema. Esto podría venir de la interacción río-acuífero pero debe ser evaluado a partir del modelo hidrogeológico para una mejor comprensión de esta variable.

Tabla 5-10: Estimación de recarga en la cuenca del río Imperial divido por subcuencas.

Cuenca	Pp m³/s	EvT m³/s	R m³/s	R mm/a	Q_i m³/s	Q_o m³/s	η m³/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

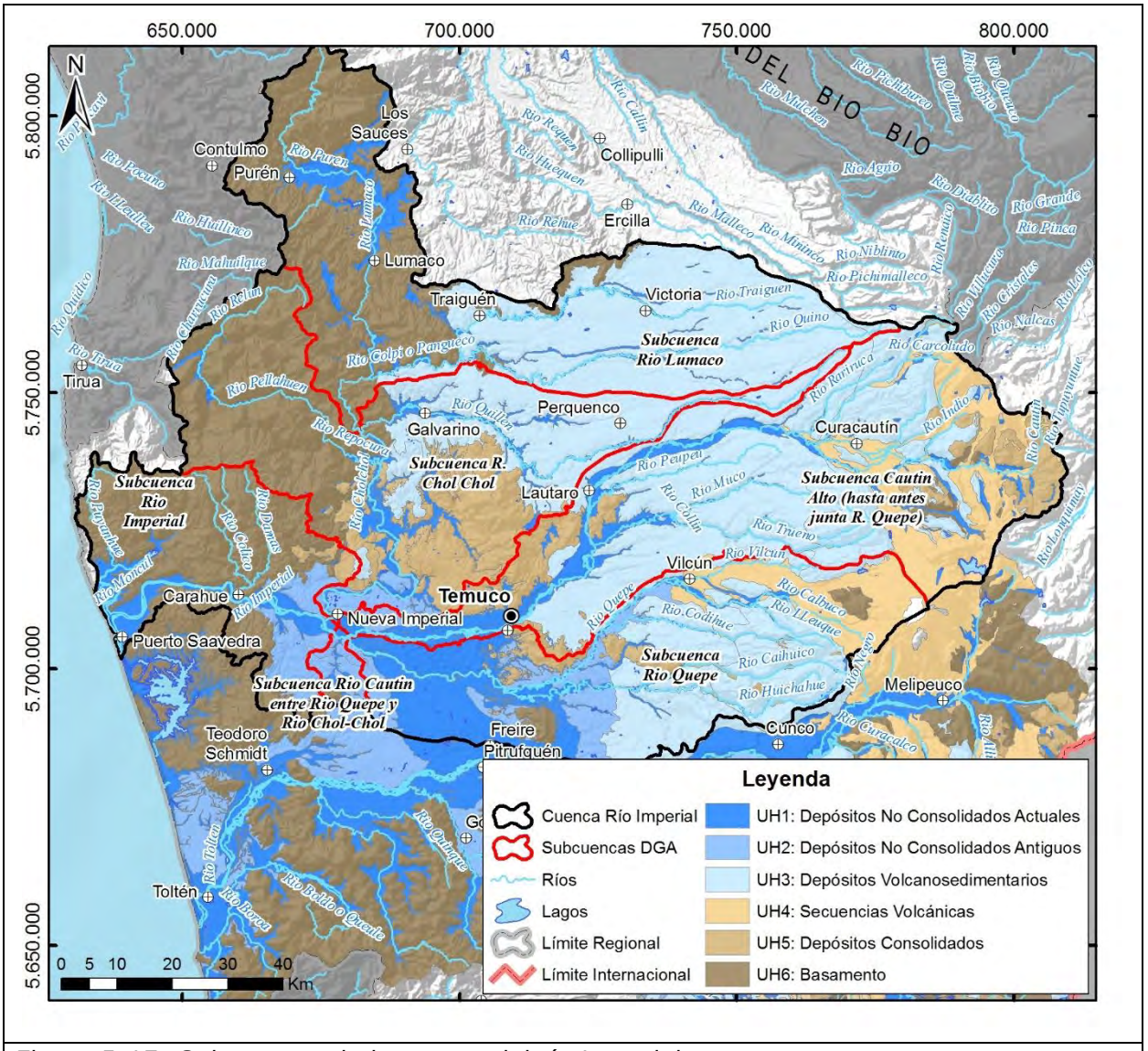


Figura 5-17: Subcuencas de la cuenca del río Imperial

5.6.2 Río Toltén

La estimación del balance hídrico por zona de riego se presenta en la Tabla 5-11 donde se incluye el caudal de ingreso (Q_i), las precipitaciones (*Pp*), la evapotranspiración (*EvT*), la descarga (*Dp*) compuesta por los escurrimiento y exceso de agua de riego generados en la zona de riego, el afloramiento (*aflora*) que es el caudal que aflora al río desde el volumen subsuperficial, *río* que es el agua que no ingresa a la zona de riego y continua por el módulo Tramo de río, la recarga (*R*) al acuífero por precipitaciones, y las ganancias o pérdidas del sistema (η) que no han sido consideradas, en las que se cuenta la interacción río-acuífero. El caudal de salida desde cada unidad está formado por la suma de *descarga, aflora* y *río.* De la estimación del déficit hídrico superficial (*DefH)* se observa que para esta cuenca existen zonas con déficit constantes durante su serie histórica,

donde los derechos de agua superficial otorgada no son suficientes para satisfacer la demanda hídrica.

El porcentaje de recarga con respecto a la precipitación, es similar a los estimados en la cuenca del río Imperial con un valor medio de 4,3%, equivalente a 30,7 m^3/s. El valor de η en su mayoría es cero con valores considerables de ganancia y pérdidas en algunas zonas (decenas de m^3/s).

Tabla 5-11: Balance hídrico por zona de riego para la cuenca del río Toltén.

Zona riego	Área km^2	Qi m^3/s	Pp m^3/s	EvT m^3/s	Dp m^3/s	Aflora m^3/s	Río m^3/s	R m^3/s	η m^3/s	DefH m^3/s	R/Pp %
ZT01	1.108,7	51,2	74,5	33,4	28,3	11,6	69,4	3,0	-20,0	0,0	4,0
ZT02	676,2	109,4	43,8	20,1	17,2	6,7	118,0	1,7	-10,5	0,0	3,8
ZT03	653,8	46,8	51,2	21,0	19,9	8,3	46,2	2,6	0,0	2,0	5,2
ZT04	2.749,1	101,0	252,1	93,9	105,3	43,9	96,1	14,0	0,0	2,8	4,0
ZT05	650,2	248,6	47,5	20,4	18,0	7,3	248,0	2,3	0,0	4,0	5,5
ZT06	352,9	273,4	21,7	10,0	8,6	3,4	272,3	0,9	0,0	0,3	5,5
ZT07	770,0	31,3	53,6	23,0	20,8	8,5	30,4	2,2	0,0	0,0	4,9
ZT08	400,6	59,8	21,9	11,1	13,6	3,3	52,8	0,9	0,0	0,2	4,0
ZT09	763,9	18,5	50,3	22,9	18,2	7,7	18,0	1,9	0,0	0,0	3,9
ZT10	646,4	614,1	27,1	14,3	18,7	3,7	583,7	0,9	20,0	0,0	3,8
ZT11	306,0	606,0	11,5	6,0	4,7	1,5	604,8	0,4	0,0	0,0	3,4
Total	**9.077,7**	**2.160,1**	**655,2**	**276,1**	**273,4**	**105,9**	**2.139,8**	**30,7**	**-10,5**	**9,3**	**4,3**

A partir del balance hídrico por zonas de riego, se estimó el balance para las subcuencas que conforman el río Toltén el cual se presenta en la Tabla 5-12 donde se incluye las precipitaciones (*Pp*), evapotranspiración (*EvT*), recarga al acuífero por precipitaciones (*R*), caudal de ingreso y salida (Q_i *y* Q_o), porcentaje de las precipitaciones que recargan al acuífero (*R/Pp*) y las ganancias o pérdidas del sistema (η). La ubicación de las subcuencas en la Figura 5-18. Al igual que en la cuenca del Imperial, aquellas zonas de riego con superficie en dos subcuencas, se asumió su pertenencia sólo a una de ellas para efectos de la evaluación a esta escala.

Tabla 5-12: Estimación de recarga en la cuenca del río Toltén divido por subcuencas.

Cuenca	Pp m^3/s	EvT m^3/s	R m^3/s	R mm/a	Q_i m^3/s	Q_o m^3/s	η m^3/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

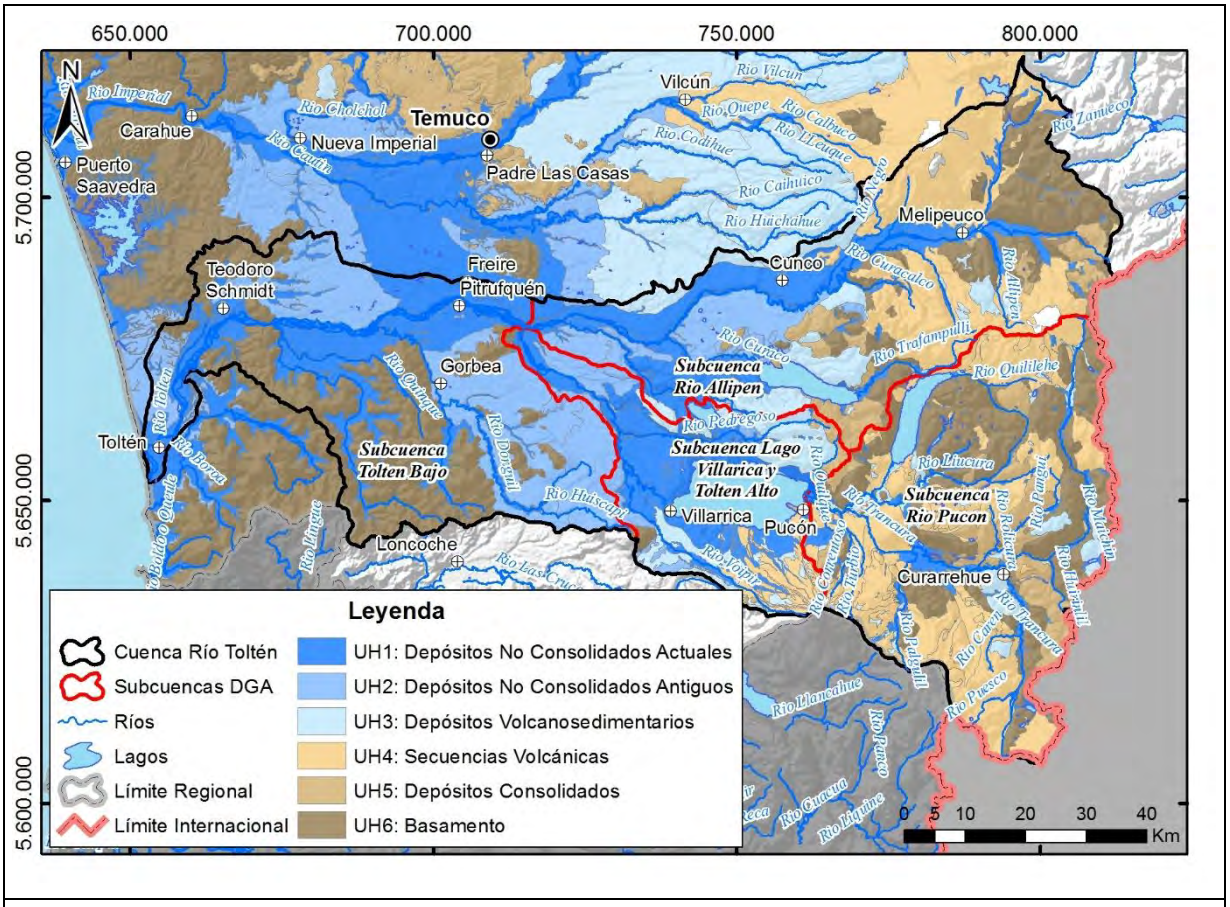


Figura 5-18: Subcuencas de la cuenca del río Toltén.

5.6.3 Cuencas costeras

La calibración y validación de los parámetros del modelo en las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, permiten utilizarlo para comprender y estimar las componentes del sistema hidrológico de tres cuencas costeras de la región de La Araucanía (Figura 5-19): río Budi, costeras entre río Budi y Toltén (B-T), y río Queule.

En la Tabla 5-13 se presenta el balance hídrico para cada subcuenca que incluye las precipitaciones (*Pp*), evapotranspiración (*EvT*), caudal de salida de la cuenca (Q_s) y recarga por precipitaciones al acuífero (*R*). Para el caso de estas cuencas, no se consideraron pérdidas ni ganancias adicionales.

Tabla 5-13: Balance hídrico para las cuencas costeras de la región de La Araucanía.

Cuenca	Pp m^3/s	EvT m^3/s	Q_s m^3/s	R m^3/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

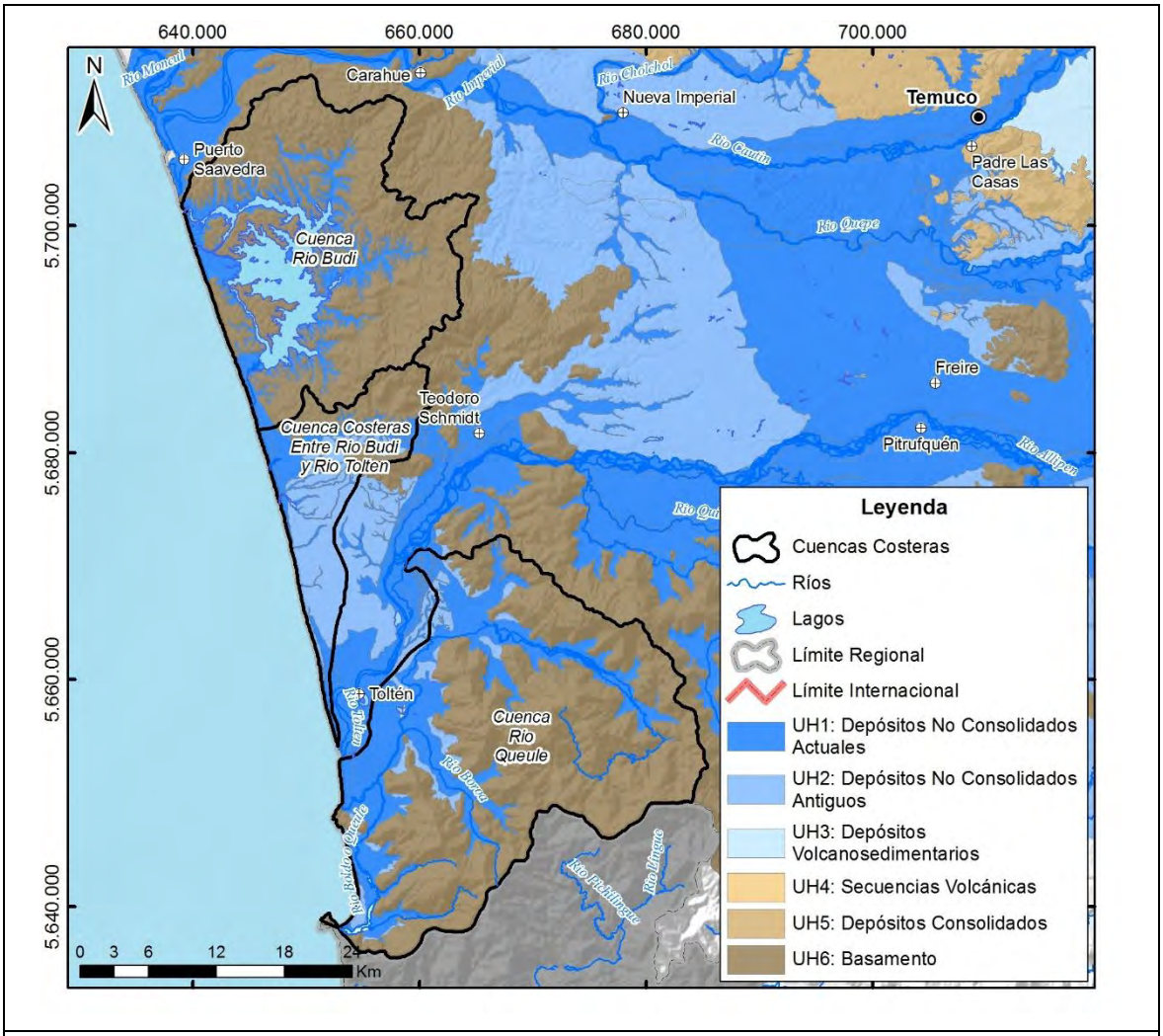


Figura 5-19: Cuencas costeras de la región de La Araucanía

5.6.4 Recarga regional

Como parte de la aplicación del modelo hidrológico superficial, se compararon las estimaciones de recarga al acuífero por precipitaciones con las obtenidas a partir del estudio de DGA (2014), el cual es la última estimación en la región, y pese a que utiliza una escala espacial menos desagregada que el presente estudio.

La sectorización de la Región de La Araucanía utilizada por DGA (2014)[6] se presenta en la Figura 5-20, y en la Tabla 5-14 la comparación de los resultados obtenidos por ambos estudios.

[6] DARH (2014). Estimación preliminar de las Recargas de agua subterránea y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. DARH-MOP SDT N°359. Santiago, Chile

Del estudio de la DGA se estima una recarga regional 30% mayor que la estimada en este estudio (70 m^3/s versus 54 m^3/s), y una precipitación media un 9% mayor (1.491 m^3/s versus 1.373 m^3/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.

[Fuente: DGA (2014)]

Figura 5-20: Sectorización acuífera, Región de La Araucanía

Tabla 5-14: Comparación de estimación de recarga con estudio DGA (2014)

	Arcadis (2015)				DGA (2014)			
	Cuenca	**Área km²**	**Pp m³/s**	**R m³/s**	**Cuenca**	**Área km²**	**Pp m³/s**	**R m³/s**
Imperial	Lumaco	2.985	130,2	3,8	Purén	1.329	49	1,0
	Cholchol	2.703	113,8	2,6	Ríos Colpi y Quillén	2.517	108	5,4
					Cholchol	1.913	66	3,3
	Cautín Alto	3.315	210	8,1	Cautín	5.608	405	20,3
	Quepe	2.302	119,2	4,6				
	Imperial	1.349	68,5	1,5	Imperial Bajo	1.409	43	0,9
Toltén	Allipén	2.585	191,2	8,1	Toltén Alto	6.098	642	32,1
	Pucón	2.384	216,8	12				
	Lago Villarrica y Toltén Alto	1.135	82,8	4,3				
	Toltén Bajo	2.343	164,3	6,3	Toltén Medio	2.066	114	5,7
Costera	Río Budi	494	19,1	0,56	Lago Budi	649	20	0,4
	Costeras entre río Budi y río Toltén	161	8,4	0,28				
	Río Queule	694	48,3	1,94	Toltén Bajo	964	43	0,9
	Total	**22.449**	**1.373**	**54,1**		**22.554**	**1.491**	**69,8**

5.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Dada las incertidumbres en la estimación de las componentes del ciclo hidrológico, es necesario realizar un análisis de sensibilidad que permita identificar las incertidumbres del modelo, para mejorar la compresión del sistema.

Considerando que la recarga al acuífero por precipitaciones dentro del balance hídrico es la variable con mayores incertidumbres en su estimación (De Vries & Simmers, 2002), el análisis de sensibilidad se realizó evaluando las variaciones en esta componente.

La estimación de la recarga por precipitaciones al acuífero es mayormente sensible a la variación del coeficiente de escorrentía (*Ce*) y los coeficientes de vaciamiento del embalse subsuperficial (*Ka* y *Kr)*. Aunque el parámetro ganancia o pérdida del río (η) es muy influyente en la generación de los hidrogramas, no se consideró para el análisis de sensibilidad ya que no tiene mayor influencia en la recarga por precipitaciones al acuífero. También se evaluó la variación del factor de transposición de caudales (sección 5.2.3) en la hidrología de superficie modelada y aunque tiene inferencia leve en la generación de hidrogramas, tienen nula influencia en la recarga por lo que tampoco se consideró. En el Anexo digital C.22 se respaldan los resultados de esta sección.

Para definir el rango de variabilidad de los parámetros a analizar, se utilizó la estación de calibración Q11. De la calibración del flujo base se obtiene que esta estación tiene un error medio mensual de 1,17 m^3/s, equivalente a un 19% de error con respecto al flujo base observado estimado por separación del flujo base (sección 5.2.2). Para determinar el rango en el cual varían los parámetros para realizar el análisis de sensibilidad, se exigió

que este error medio mensual no aumentase en más de un 25%, es decir, que el error no fuese mayor a 1,45 m^3/s. La elección de este rango tiene por objetivo evaluar la sensibilidad de la estimación de recarga a determinados parámetros, en una calidad aceptable de calibración; de esta manera, por ejemplo para la estación Q11, el coeficiente de Nash se mantiene por sobre los 0,7 (con un valor de 0,82 de la calibración original). El rango de variabilidad de los parámetros de presenta en la Tabla 5-15.

Tabla 5-15: Variabilidad de parámetros para el análisis de sensibilidad.

Parámetro	**Recarga Mínima**	**Recarga media**	**Recarga máxima**
Ce	0,75	0,65	0,55
Ka (mes)	2,6	3,5	4,4
Kr (mes)	12	9	6

Variando estos parámetros en la cuenca de calibración del río Imperial, se obtienen tres rango de recarga. De la Tabla 5-16 se observa que la estimación de recarga por precipitaciones es mayormente sensible al *Kr* (vaciamiento del volumen subsuperficial hacia el acuífero), pese a que esta variación es menor en la simulación del hidrograma.

Tabla 5-16: Análisis de sensibilidad con respecto a la estimación de recarga.

Parámetro	**Recarga mínima (m^3/s)**	**Recarga media (m^3/s)**	**Recarga máxima (m^3/s)**
Ce	14,7	20,6	26,6
Ka	14,1		27,3
Kr	13,7		34,3

Para la cuantificación del efecto de la sensibilidad de los parámetros en el resto del área de estudio, se decidió variar el parámetro *Ce* para la estimación del balance hídrico. Se escogió este parámetro ya que la recarga es menos sensible a él y conceptualmente permite mejorar la representación del sistema en las cuencas costeras. Intuitivamente, estas cuencas se encontrarían en condiciones de saturación mayor que las otras, por su cercanía al mar y su menor capacidad de almacenamiento, lo que aumentaría la escorrentía superficial al no permitir la infiltración de agua.

En la Tabla 5-17 se presentan los valores de recarga por precipitaciones estimados. Se obtiene aproximadamente una variabilidad de ±30%.

Tabla 5-17: Estimación de recarga con el parámetro *Ce* variable.

Parámetro	**Recarga mínima (m^3/s)**	**Recarga media (m^3/s)**	**Recarga máxima (m^3/s)**
Imperial	14,7	20,6	26,6
Toltén	23,1	30,7	41,0
Budi	0,40	0,56	0,73
Costeras B-T	0,20	0,28	0,37
Queule	1,39	1,94	2,49

5.8 COMENTARIOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica desarrollada en la región de La Araucanía cumple con los objetivos propuestos, de representar escurrimientos superficiales en puntos sin control, y estimar y cuantificar las distintas componentes del ciclo hidrológico superficial.

La calibración y validación, además permite aplicar este modelo en zonas de similares características y sin control hidrometeorológico.

Estos resultados son por lo tanto un reflejo del diseño del modelo, que es a escala regional, agregado y orientado a la comprensión y cuantificación de la magnitud de las componentes estimadas, principalmente la recarga por precipitaciones, orientada a ser utilizada como dato de entrada en la modelación hidrogeológica, más que una estimación para la generación de políticas de gestión del recurso hídrico.

La sensibilidad e imprecisión propia de este tipo de modelos, requiere de un complemento de técnicas que permitan comprender de mejor manera las variables más imprecisas de estimar como la recarga a los acuíferos. Dentro de este complemento de técnicas, el uso de técnicas hidroquímicas e hidrogeológicas, permiten validar rangos u órdenes de magnitud en la estimación de la recarga por precipitaciones, y de esta forma mejorar la comprensión del sistema hidrológico superficial.

6 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y GEOLÓGICA

En este capítulo se presenta la descripción geomorfológica y geológica de las cuencas en estudio. En cuanto a la geomorfología, se clasifican y describen las principales unidades morfoestructurales que dominan la región. En cuanto a la geología, se detalla la geología superficial, estructuras principales y la geología de subsuperficie, en base a los antecedentes disponibles. En la geología de superficie, se describe primero el marco geológico regional y, posteriormente, se caracteriza cada unidad geológica que conforma el área de estudio y las principales estructuras que afectan a la región. En cuanto a la geología de subsuperficie, se realiza una caracterización tanto a escala regional como local.

Las principales fuentes de información para la realización de este capítulo corresponden a las cartas geológicas del Sernageomin que están comprendidas dentro del área de estudio.

6.1 MARCO GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

La región de La Araucanía muestra, 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 y en un perfil latitudinal en la Figura 6-2.

A continuación se describe cada unidad morfoestructural presentes en la región de La Araucanía.

6.1.1 Cordillera de Los Andes

La Cordillera de Los Andes se emplaza en el sector oriental del área y constituye relieves abruptos, formada por centros volcánicos activos que representan los puntos de mayor elevación topográfica, tales como el volcán Lanin (3.747 msnm), el volcán Llaima (3.124 msnm), el volcán Villarrica (2.847 msnm) y el Volcán Lonquimay (2.822 msnm). Otras cumbres importantes corresponden a Sierra Nevada (2.580 msnm) y el volcán Quetrupillán (2.382 msnm).

En general, la morfología de esta unidad morfoestructural en el área de estudio es el resultado de factores climáticos, junto con el alzamiento tectónico y acción volcánica. Los cordones montañosos se caracterizan por presentar filos, circos y cumbres desmanteladas por la acción del hielo.

Desde la Cordillera de Los Andes nacen algunos importantes tributarios que alimentan a los ríos Imperial y Toltén.

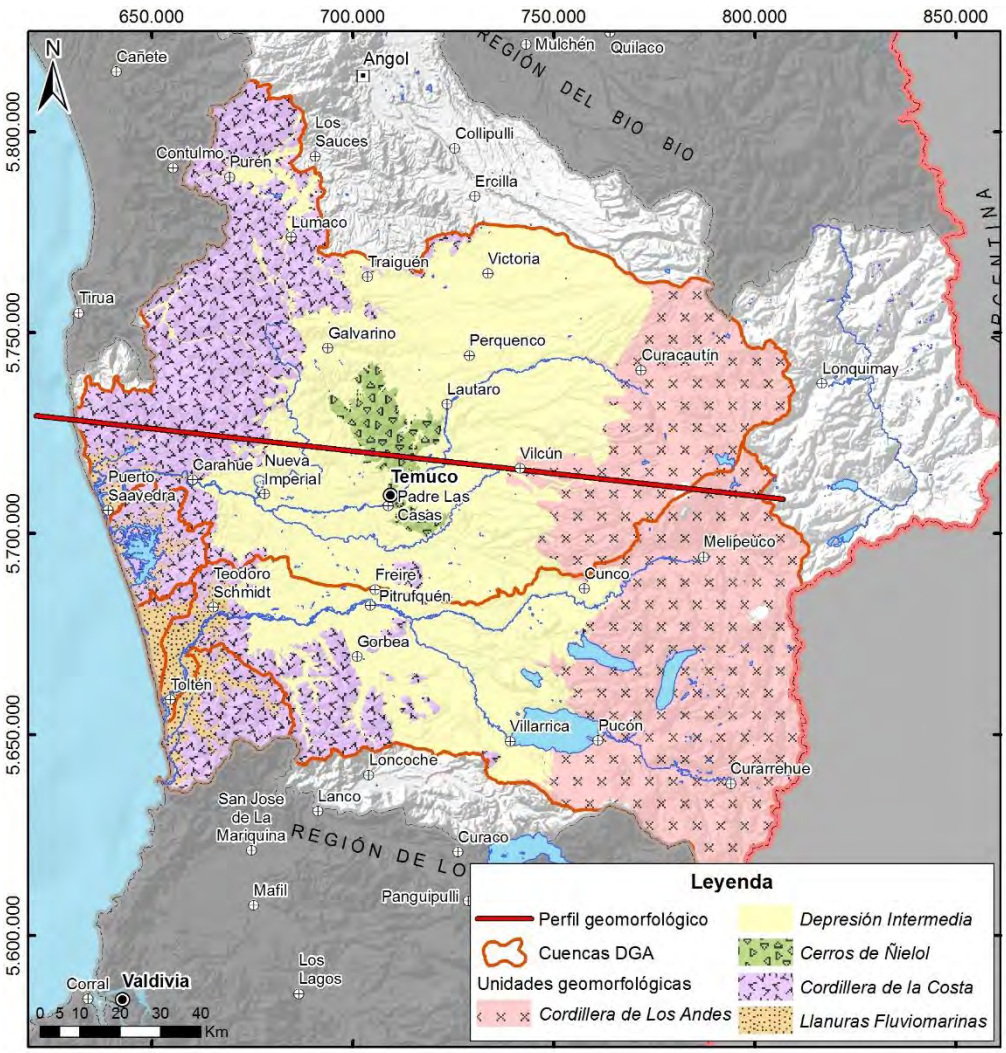


Figura 6-1: Unidades Morfoestructurales de la zona de estudio

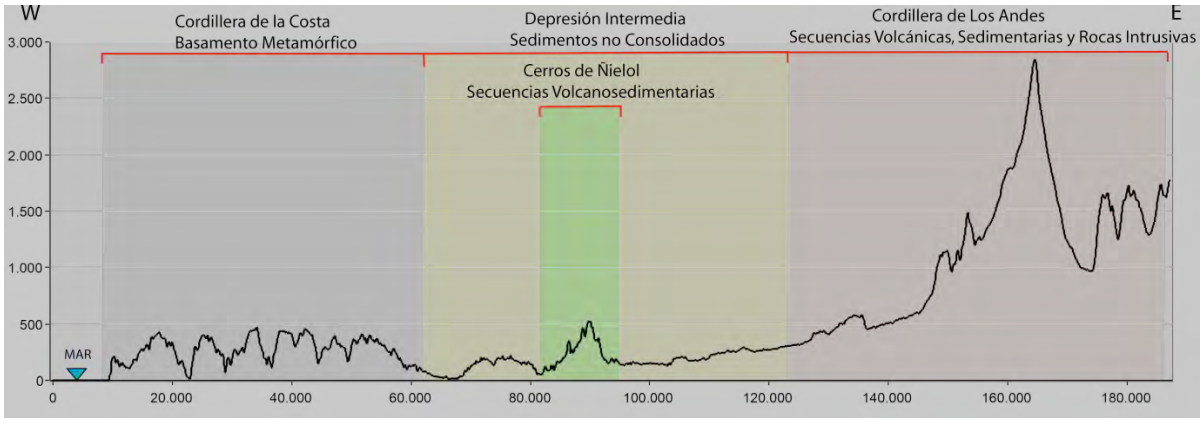


Figura 6-2: Perfil Geomorfológico Latitudinal de la zona de estudio

6.1.2 Depresión Intermedia

Este rasgo morfológico consiste en planicies y lomajes cuya cota no supera los 400 msnm. Se ubica entre las Cordilleras de Los Andes y de La Costa y constituye la cuenca con sedimentos terciarios y cuaternarios, provenientes mayormente de la denudación de la Cordillera de Los Andes, por acción glacial y fluvial. Así, esta unidad , se encuentra conformada principalmente, por depósitos de abanicos aluviales y volcanoclásticos. La roca base de esta cuenca sedimentaria corresponde, al basamento Paleozoico. Se estrecha hacia el norte y sur del área de estudio. Se incluye como parte de esta unidad morfoestructural las cuencas intramontanas formadas en la Cordillera de La Costa (e.g. Lumaco)

6.1.3 Cerros de Ñielol

Corresponde a una unidad topográficamente elevada, de dirección aprox. N-S, que interrumpe la Depresión Intermedia y que se extiende hacia el norte y sur de Temuco. Está conformado principalmente por afloramientos de rocas volcánicas y volcanoclásticas (Oligoceno-Mioceno) que evidencia un arco volcánico secundario al occidente del arco volcánico actual.

6.1.4 Cordillera de La Costa

Esta unidad morfoestructural presenta una orientación norte-sur, sin embargo, hacia el norte y sur del área de estudio, la Cordillera de La Costa avanza hacia la Depresión Intermedia, angostándola. Se expresa con alturas promedio de 300-400 msnm e incluso con menor altitud en el centro de la región, mimetizándose entre la depresión Intermedia y las Planicies Litorales. Sin embargo, en la Cordillera de Nahuelbuta que nace al sur del río Bio Bio y se extiende hasta el río Imperial, alcanza en la región alturas de más de 1.000 msnm. La Cordillera de La Costa está constituida por rocas metamórficas de tipo pizarras micáceas del Paleozoico y en la Cordillera de Nahuelbuta por un batolito granodiorítico.

Hacia el sur, en la localidad de Lastarria, se produce una angostura de la Depresión Intermedia dada por el avance de la Cordillera de la Costa hacia la Cordillera de Los Andes. En este punto se caracterizan las cordilleras de Polcura, Mahuidanche y Mitropulli que subdividen las cuencas de los río Toltén y Valdivia.

6.1.5 Llanuras Fluviomarinas

Corresponde principalmente a los valles de los ríos que desembocan al mar, de los ríos Queule, Toltén e Imperial en donde existe una importante interacción fluviomarina. También se incluye la depresión conformada por el lago Budi que corresponde a una depresión litoral vinculada a movimientos tectónicos, y que corresponde al nivel base de aguas superficiales y subterráneas, provenientes de la Cordillera de La Costa. La cota de esta unidad morfoestructural es en general, menor a 20 msnm.

6.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La información base de la geología superficial se obtuvo a partir de las cartas geológicas del Sernageomin, tal como se dispuso en las referencias utilizadas en la recopilación de antecedentes:

- REF 10-P. Geología del Área Temuco-Nueva Imperial, Región de La Araucanía. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2010.
- REF 11-P. Geología del Área Pucón-Curarrehue, Regiones de La Araucanía y De Los Rios. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2008.
- REF 12-P. Geología del Área Queule-Toltén: Regiones de La Araucanía y de Los Ríos, Escala 1:100.000. Sernageomin, 2008.
- REF 13-P. Geología del área de Villarrica - Huiscapi, Regiones de La Araucanía y de Los Ríos. Escala 1:100.000. Sernageomin, 2011.
- REF 14-P. Geología del área Lanco-Loncoche, Región de La Araucanía y de Los Ríos, Escala 1:100.000. Sernageomin, 2007.
- REF 16-P. Hoja Curacautín. Escala 1:250.000. Sernageomin, 1997. Incluye mapa geológico, realizado por C. Emparan, M. Suárez y J. Muñoz, 1992)

En la Figura 6-3 se muestra la distribución espacial de las cartas presentadas anteriormente. Tal como se observa en esta figura, los antecedentes geológicos disponibles no cubren la totalidad del área de las cuencas, habiendo información en un 65% de su superficie. La información geológica faltante, se completó utilizando como guía el mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000, realizado por Sernageomin (2003) y una posterior validación de la geología en terreno.

Al comparar la información geológica en las cartas disponibles con el mapa 1:1.000.000 es posible observar que gran parte del área que no cuenta con información geológica de detalle está dominada por la cordillera de Nahuelbuta formada por el basamento metamórfico Paleozoico y pequeños cuerpos intrusivos hacia el norte del área de estudio. Dentro de la misma cordillera ocurren pequeñas cuencas sedimentarias (por ejemplo valle de Lumaco-Purén) las cuales fueron delimitadas mediante fotointerpretación. Por otra parte, en la depresión Central se reconocen las mismas unidades descritas más al este (ej. abanico Muco). En base a estas unidades se realizó un refinamiento de los contactos litológicos mediante fotointerpretación de imágenes satelitales (fuente: Google earth), donde además se han identificado los fotolineamientos principales, lo cual fue complementado con otros trabajos referentes a la geología estructural del área (Melnick et al. 2006, 2009).

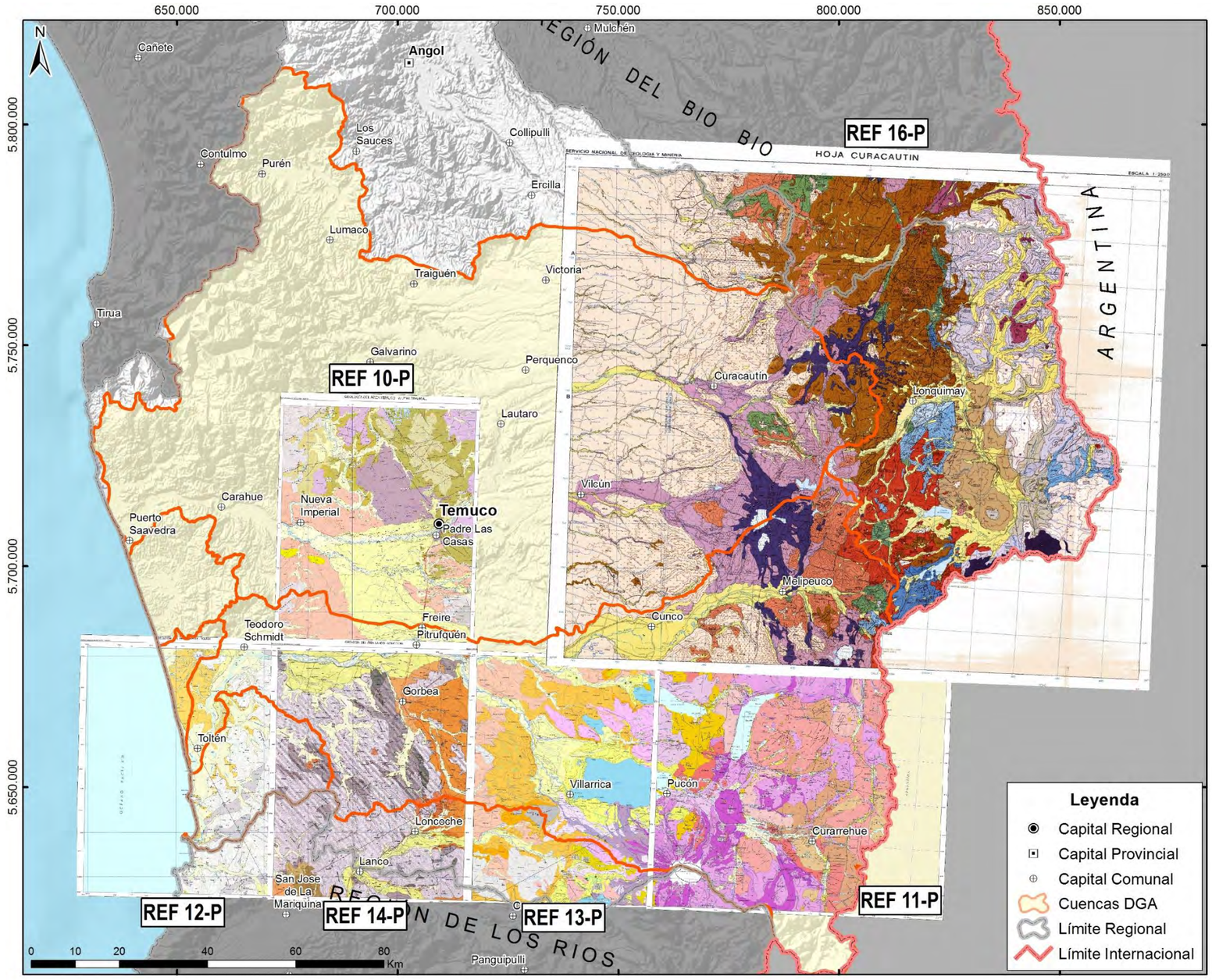


Figura 6-3: Distribución de las cartas geológicas en la región de La Araucanía

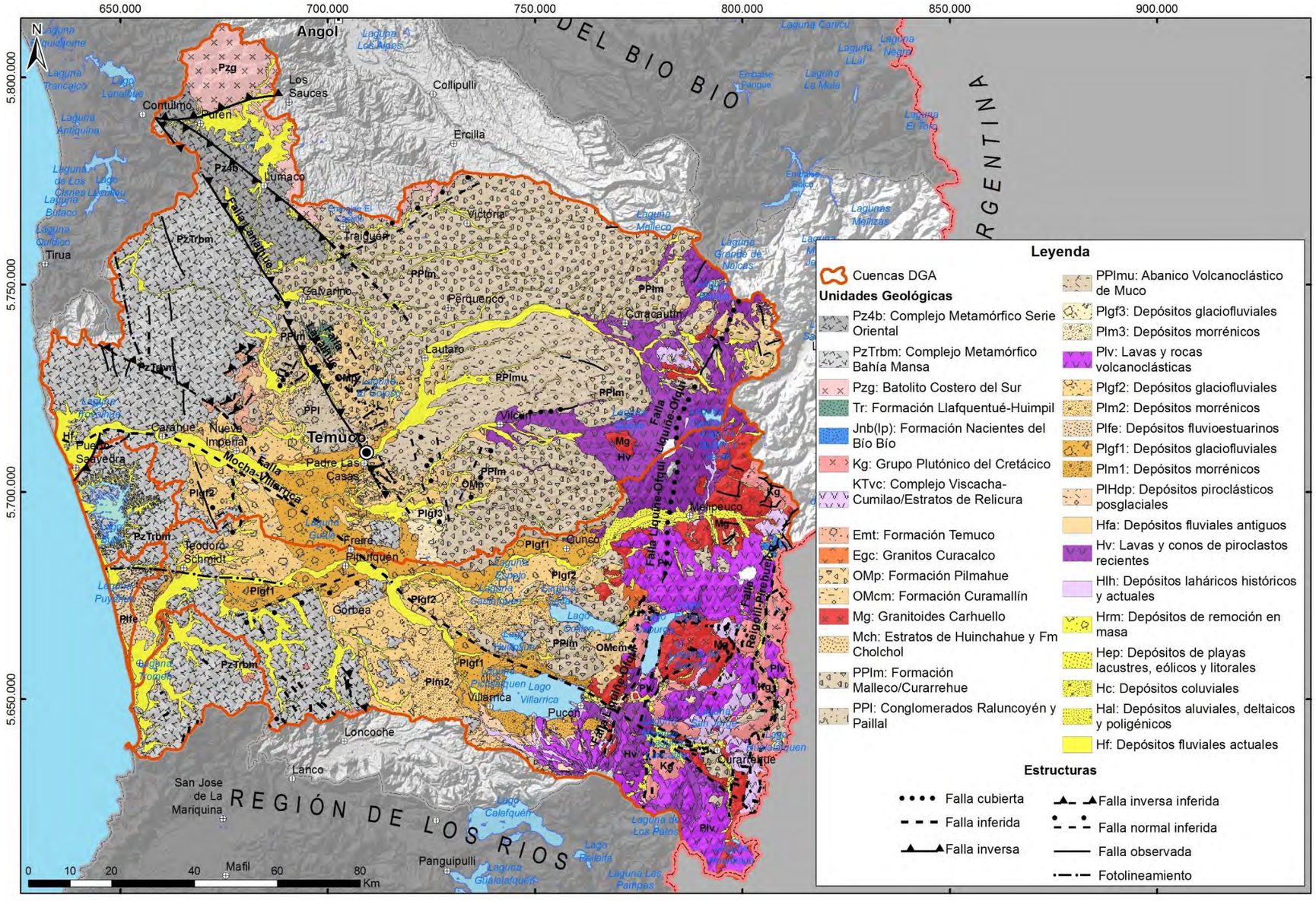


Figura 6-4: Mapa Geológico de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

6.2.1 Geología de Superficie

A continuación se describen las unidades geológicas reconocidas en las cuencas de los ríos Toltén, Imperial y las cuencas costeras de la región de La Araucanía, además de un contexto geológico regional en que éstas se encuentran. Este trabajo se realizó en base a la información geológica disponible (principalmente, mapas geológicos del Sernageomin) (ver Figura 6-3).

En la Figura 6-4 se presenta el mapa geológico con la distribución de las unidades reconocidas, mientras que en el Anexo D.1 se presenta el plano de este mapa, a escala 1:400.000.

6.2.1.1 Basamento Paleozoico

Complejo Metamórfico Serie Oriental, Pz4b (Silúrico-Carbonífero)

Está constituida fundamentalmente por metasedimentitas de baja presión y relativamente alta temperatura. Está compuesto por metapelitas y metagrauwackas que varía desde la facies esquistos verdes (zona de clorita) hasta granulita. Esto se acompaña de una transformación progresiva de los esquistos en gneisses, hornfels y migmatitas. Se encuentra intruido por cuerpos plutónicos del batolito de Paleozoico Superior (Batolito Costero del Sur, Pzg) y la Serie Occidental o Complejo Metamórfico Bahía Mansa (PzTrbm). El metamorfismo y deformación de estas rocas ocurrieron entre el Carbonífero y Pérmico.

Dentro del área de estudio, esta unidad geológica conforma la porción norte de la Cordillera de la Costa.

Batolito Costero del Sur, Pzg (Carbonífero superior-Pérmico)

Esta unidad intrusiva está constituida por tonalitas, granodioritas y granitos de grano grueso a medio. Se incluyen, además, algunos escasos cuerpos dioríticos y graníticos de textura porfídica con zonas de migmatitas y gneises. En los bordes de este batolito afloran facies marginales de diorita cuarcífera.

Aflora al noroeste del área de estudio, conformando la Cordillera de Nahuelbuta e intruye al basamento metamórfico.

Complejo Metamórfico Bahía Mansa, PzTrbm (Devónico-Triásico)

Denominación dada a un conjunto heterogéneo de rocas metamórficas fuertemente foliadas. Presenta tres litologías dominantes: 1) esquistos pelíticos, filitas, metagrauvacas, metaareniscas, metacherts, de color gris oscuro y aspecto lustroso, con muscovita, cuarzo, albita y grafito, en algunos casos con granate, además de esquistos cuarcíferos y cuarcitas de grano fino con biotita y opacos; 2) esquistos máficos, color verde azulado y de grano fino, con asociación mineral de epidota-plagioclasa-actinolita y epidota-albita, y bandas nematoblásticas de epidota, actinolita y porfiroblastos de plagioclasa; 3) Cuerpos ultramáficos serpentinizados.

Junto con el Complejo Metamórfico Serie Este, este grupo de rocas conforma actualmente la Cordillera de la Costa, ubicándose en una franja norte-sur al oeste del área de estudio. Este complejo se habría formado, evolucionado y deformado durante el lapso Devónico-Triásico en el borde suroccidental de Gondwana por acreción basal.

Las rocas de esta unidad no tienen su base expuesta y serían cubiertas, por rocas sedimentarias continentales del Triásico Superior, por rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y del Plioceno-Pleistoceno y por depósitos sedimentarios no consolidados de origen glacial y fluvial del Pleistoceno-Holoceno.

6.2.1.2 Rocas Estratificadas

Formación Llafquentué-Huimpil, Tr (Triásico Superior)

Esta formación se describe en la carta Temuco-Nueva Imperial (Sernageomin, 2010) como un conjunto de rocas sedimentarias clásticas formadas por conglomerados, areniscas cuarcíferas, limolitas carbonosas finamente estratificadas y lutitas bituminosas muy fracturadas con niveles de carbón y contenidos de flora fósil. El conjunto presentaría un espesor mínimo estimado de 1.600 m y una disposición homoclinal con eje NO y manteo al sur (30°).

Los afloramientos de esta unidad son muy discontinuos y se restringen a los lechos de las quebradas. Aflora en la cuenca del río Imperial al norte del cerro Ñielol.

Esta unidad se habría depositado durante la generación de cuencas de orientación NO-SE, localizadas en el margen oeste de Gondwana, en un ambiente de abanicos aluviales de alta energía y próximos a la fuente de los materiales (conglomerados y areniscas); y en un ambiente de acumulaciones aluviales de baja energía en cuencas continentales subacuáticas de poca profundidad (lutitas carbonosas).

Sobreyace con probable discordancia angular y de erosión a rocas del basamento metamórfico y subyace en discordancia angular y de erosión a rocas de la Formación Pilmahue (OlMp) y a las secuencias volcanosedimentarias del Plioceno-Pleistoceno (PPl).

Formación Nacientes del Bio Bio, Jnb (lp) (Jurásico Inferior a Medio)

En esta formación se distinguen tres miembros que, en parte, engranan lateralmente: Miembro Icalma (basaltos submarinos y turbiditas); Miembro Lolén-Pacunto (turbiditas volcanoclásticasmarinas); y Miembro Lonquimay (sedimentitas volcanoclásticas y rocas calcáreas marinas, y rocas volcánicas aparentemente subaéreas en su mayoría, con niveles aparentemente marinos en la base). En el área de estudio, se reconoce sólo el Miembro Lolén-Pacunto, de espesor mínimo 600 m y comprende una sucesión sedimentaria clástica compuesta por rocas pelíticas gris oscuras, areniscas, brechas, tufitas y tobas, con fósiles marinos. Esta unidad se observa en un afloramiento al norte de Nevados de Sollipulli, en la cuenca del río Imperial.

Las secuencias de esta unidad se interpretan como depósitos de corrientes de turbidez que representarían la progradación de un abanico submarino, depósitos de un abanico submarino y depósitos de fondo marino. Esta formación se habría acumulado en la parte occidental de la cuenca Neuquina, una cuenca marina relativamente profunda, desarrollada por rifting.

La Formación Nacientes del Bio Bio no presenta base expuesta. En el área de estudio está intruida, por granitoides del Grupo Plutónico Gualletué (Kg), de edad jurásica superior-cretácica superior. Subyace con discordancia angular y de erosión a la Formación Curamallín, OMcm, de edad miocena, y al Complejo Vizcacha-Cumilao, KTvc (del Cretácico Superior-Paleógeno).

Complejo Viscacha-Cumilao, Estratos de Relicura KTvc (Cretácico-Paleogeno?)

Corresponde a secuencias principalmente volcánicas, compuestas por lavas andesíticas macizas, y subordinadamente basálticas (que en ocasiones podrían ser cuerpos intrusivos) y rocas piroclásticas, generalmente alteradas y tectonizadas, con intercalaciones sedimentarias clásticas subordinadas. Las andesitas macizas alcanzan espesores de hasta 350 m y se presentan por lo general en cuerpos potentes. Las rocas piroclásticas incluyen tobas de lapilli, brechas volcánicas andesíticas y tufitas de espesor mínimo 300 m. Las rocas sedimentarias comprenden lutitas negras, macizas y laminadas, areniscas de grano fino a grueso y brechas sinsedimentarias. Esta unidad incluye diques, filones manto, andesitas macizas y pórfidos andesíticos y dacíticos, interpretados como cuerpos subvolcánicos. Localmente, presenta rocas metamórficas de contacto.

Esta formación aflora en el flanco norte de Nevados de Sollipulli, y al noroeste de Sierra Nevada por el norte, en donde en la Hoja de Curacautín se denomina como Complejo Viscacha-Cumilao. Hacia el sur se reconoce al este, y el área característica corresponde al sector de Relicura, al norte del río Pucón o Minetué, donde alcanza un espesor de hasta 1.000 m.

El Complejo Vizcacha-Cumilao/Estratos de de Relicura representaría los productos de un volcanismo intermedio, aparentemente subaéreo, y de la acumulación de sedimentos en lagos. Su base hacia el norte no ha sido observada, mientras que hacia el sur descansa en discordancia de erosión, sobre el complejo intrusivo Maichín y granito de Caburga (Kg). En algunas localidades, se ha reconocido que rocas asignadas a esta unidad infrayacen discordantemente a la Formación Curamallín (OMcm), a lavas basálticas columnares asignadas a la Formación Malleco (PPlm), en discordancia angular por secuencias volcanosedimentarias pliocenas de la Formación Curarrehue (Pc) y por rocas volcánicas pleistocenas y holocenas.

Formación Temuco, EMt (¿Eoceno superior?-Mioceno inferior)

Corresponde a una secuencia de espesor variable (400 a 1.400 m), compuesta por sedimentos terrigenoclásticos continentales finos, con ocurrencia de carbón y aumento del aporte volcánico hacia el techo. El aporte mayoritario de los depósitos volcanoclásticos corresponde a conglomerados con cuarzo metamórfico y clastos de esquistos con niveles de areniscas cuarcíferas intercalados; limolitas y arcillolitas cuarzo-micáceas con guías carbonosas.

Esta formación aflora principalmente en la ladera este del cerro Ancapulli, disponiéndose como cuerpos discontinuos adosados a la cordillera de La Costa, en cortes y zanjas de drenaje. Estas rocas sedimentarias representan facies de abanicos aluviales proximales, fluviales de ríos trenzados y meandriformes con proveniencia mayoritaria del basamento metamórfico. Esta formación se habría depositado en el comienzo de la apertura de la cuenca terciaria de Labraza.

La Formación Temuco sobreyace en inconformidad al basamento metamórfico. Esta formación se habría depositado sincrónicamente con la formación Pilmahue, con la cual engrana lateralmente.

Formación Pilmahue, OMp (Oligoceno inferior bajo-Mioceno inferior)

Corresponde a una secuencia de origen volcánico y sedimentario continental, compuesta por brechas, conglomerados, areniscas, lavas andesíticas y tobas con

abundante flora fósil de más de 800 m de espesor. Se reconocen dos miembros mayores en esta formación: Miembro sedimentario y volcánico (inferior) y miembro volcánico de los Cerros de Ñielol (superior). El miembro inferior está conformado por unidades volcanoclásticas y volcanosedimentarias ácidas (sedimentaria), mientras que el miembro superior corresponde a unidades volcánicas y subvolcánicas andesíticas. La Formación Pilmahue aflora principalmente al norte y sur de la ciudad de Temuco, en los Cerros de Ñielol.

Esta formación sobreyace, en discordancia angular, a la Formación Llafquentué-Huimpil y, en inconformidad, al Complejo Metamórfico de Bahía Mansa. Engrana con la Formación Temuco, y subyace, en disconformidad y paraconformidad a la Formación Cholchol, a los conglomerados Raluncoyán y Paillal, y a depósitos asignados a las glaciaciones pleistocenas, así como a depósitos no consolidados del Pleistoceno-Holoceno y Holoceno.

Esta formación representaría la interacción de un ambiente volcánico subaéreo y explosivo con un ambiente sedimentario de alta energía, en los flancos de los Cerros de Ñielol y, de baja energía, en el interior de la cuenca extensional, tipo rift, de Labranza.

Formación Curamallín, OMcm (Oligoceno-Mioceno)

Corresponde a una secuencia integrada por capas de 3 a 5 m de espesor de lavas, areniscas tobáceas, brechas volcánicas, tobas brechosas y de lapilli, de composición principalmente andesítica, que incluye numerosos cuerpos subvolcánicos asociados (diques y filones) de la misma composición. Localmente presenta intercalaciones de 1 a 2 m de lutitas y limonitas. Generalmente, las rocas volcanoclásticas están alteradas a clorita y epidota y, en algunos sectores, están afectadas por metamorfismo de contacto.

Esta sucesión aflora al este del área de estudio, donde sus principales afloramientos se encuentran al sur del volcán Lonquimay y al norte y sur del lago Colico, alcanzando en este sector cerca de 1000 m de espesor. Esta unidad se encuentra plegada y los estratos correspondientes a los afloramientos del lago Colico están dispuestos según rumbos generales norte-sur a noroeste, alcanzando manteos de hasta 30° al SO.

La Formación Curamallín representaría una actividad volcánica, explosiva y efusiva, con participación de facies volcanosedimentarias, desarrollada en un marco geodinámico de cuenca extensional, la que evolucionó durante el Oligoceno superior a Mioceno, seguida por una inversión tectónica en el Mioceno superior.

Esta unidad sobreyace a cuerpos intrusivos del Cretácico y el Eoceno y subyace, en discordancia angular, a rocas de la Formación Malleco y a rocas volcánicas pleistocenas y holocenas. Asimismo, la Formación Curamallín está intruida por los granitoides del Mioceno.

Formación Cholchol y Estratos de Huinchahue, Mch (Mioceno Inferior a Medio)

Corresponde a una secuencia de sedimentos clásticos fosilíferos de origen marino compuesta por arcillolitas, limolitas y areniscas de grano fino a limosas de color gris, pardo verdoso a pardo amarillo, areniscas de grano medio a grueso que gradan a conglomerados de grano fino. En general, en todos los afloramientos, tanto las areniscas como los fósiles son deleznables. Se han descrito foraminíferos, corales, gastrópodos, bivalvos, teredolitos y troncos fósiles en esta formación, e incluso

improntas de hojas en limos de la porción superior, lo que se asignan al Mioceno. La Formación Cholchol presenta un espesor máximo estimado en 680 m.

Los principales afloramientos se ubican en las riberas del río Cholchol, en los alrededores del poblado homónimo.

La Formación Cholchol representaría en su base un ambiente marino cercano a la costa, que posteriormente cambia abruptamente a uno marino profundo. Las improntas de hojas observadas en la porción superior de la Formación Cholchol representan un ambiente continental litoral de baja energía y una regresión marina.

A partir de información de datos de subsuperficie, se establece que la Formación Cholchol sobreyace en discordancia de erosión a las formaciones Pilmahue y Temuco, y subyace en paraconcordancia a conglomerados del Plioceno-Pleistoceno, así como a depósitos no consolidados del Plioceno-Holoceno.

Formación Malleco/Curarrehue, PPlm (Plioceno-Pleistoceno Inferior)

La Formación Malleco corresponde a una secuencia volcánica continental de edad pliocena-pleistocena inferior. La secuencia está constituida, principalmente, por una alternancia de brechas volcánicas gruesas, conglomerados volcánicos, tobas ignimbríticas y lavas de composición basáltica, andesítica a dacíticas. Los estratos presentan espesores de 3 a 15 m y cercano al lago Colico, la Formación Malleco presenta una suave inclinación primaria hacia el SO, con espesores de más de 1000 m. En la confluencia de los ríos Trancura y Maichín esta unidad se denomina en la carta Pucón-Curarrehue como Formación Curarrehue. Aflora principalmente, a lo largo de todo el flanco occidental de la Cordillera Principal del área de estudio y en parte de la depresión Central, en donde aflora cercano al poblado de Cholchol.

La Formación Malleco se habría acumulado en un ambiente subaéreo, a partir de centros volcánicos ubicados a lo largo de la parte oriental de la franja de afloramientos de esta unidad. La alternancia de conglomerados de origen lahárico, lavas y tobas con intercalaciones de areniscas, representaría un ambiente esencialmente volcánico de tipo explosivo con presencia de glaciares e importantes volúmenes de agua.

La Formación Malleco sobreyace en discordancia angular a las unidades estratificadas del Complejo Vizcacha-Cumilao (Cretácico-Paleógeno?), a la Formación Curamallín (Oligoceno-Mioceno) y en discordancia de erosión a los Estratos de Relicura, a la Formación Cholchol, a los granitoides miocenos del Grupo Plutónico Melipeuco, Granito Curacalco, Diorita Tres Horquetas y los Granitoides Carhuello y, a su vez, están parcialmente cubiertas por los productos del Conjunto de Volcanes de la Cordillera Principal y por depósitos morrénicos de la última Glaciación Llanquihue (Plm1).

Conglomerados Ralucoyén-Paillal, PPl (Plioceno-Pleistoceno)

Los Conglomerados Ralucoyén son conglomerados clasto y matriz soportados, inmaduros, con bolones de hasta 2 m de diámetro, redondeados a subredondeados y, subordinadamente, angulosos, con mala selección. Localmente, presentan imbricación y los clastos que componen el conglomerado están fuertemente meteorizados. La matriz es una mezcla de grava, arena, limo y arcilla. En ocasiones se observan intercalaciones menores de lentes de arena y grava, granodecrecientes y paleocanales. Estos conglomerados están expuestos a lo largo del piedemonte occidental de los Cerros de Ñielol, al norte de Temuco. Esta unidad es interpretada como depósitos de ambientes aluviales, fluviales y de remoción en masa asociados a la denudación de los

Cerros de Ñielol, producto, presumiblemente, del alzamiento de la Zona de Falla Lanalhue (ZFL) hace 4 Ma (Melnick et al., 2006; Melnick et al., 2009). Este alzamiento continuaría, se presume, hasta el presente.
Un afloramiento de conglomerados de poca consolidación compuestos por cuarzo metamórfico y areniscas deleznables, matriz tamaño arena gruesa a media, mayoritariamente, de cuarzo metamórfico y mica, se denominan Conglomerados Paillal. Se interpreta que estos conglomerados serían producto de retrabajo fluvial y aluvial de conglomerados y areniscas provenientes de la Formación Llafquentué-Huimpil y Pilmahue. El origen del Conglomerado Paillal estaría ligado a la activación de la Zona de Falla Lanalhue.
Sobreyacen a rocas de la Formación Pilmahue, Formación Llafquentué-Huimpil y en su prolongación hacia el oeste, en discordancia erosiva, a areniscas fosilíferas de la Formación Cholchol.

Abanico Volcanoclástico de Muco, PPlmu (Plioceno-Pleistoceno)

Esta unidad está compuesta por depósitos fluviales, de alta y baja energía, y por flujos piroclásticos y lahares. Los depósitos fluviales corresponden a gravas, con intercalaciones de lentes de arena y limos. Las gravas se presentan con espesores variables de 1 a 3 m moderadamente consolidadas, clastosoportadas, localmente imbricadas, con intensa meteorización. Los clastos son, mayoritariamente, volcánicos y de granitoides, redondeados a subredondeados, con esfericidad regular, en una matriz de arena.

Esta unidad ocupa gran parte de la depresión central desde el río Cautín al río Quepe, presentando una morfología plana y elevada.

Esta unidad sobreyace, en discordancia de erosión, a la Formación Pilmahue y se interdigita con niveles superiores del Abanico Volcanoclástico de Malleco. El techo de esta unidad corresponde al relieve actual y la base no está expuesta.

Lavas y rocas volcanoclásticas, Plv (Pleistoceno Inferior - Holoceno)

En este grupo de rocas y depósitos se integran un conjunto de rocas volcánicas y volcanoclásticas, de composición dacítica a basáltica, abarcando edades desde el Pleistoceno Inferior a Holoceno. Esta unidad aflora en torno a los principales volcanes que se ubican hacia el sureste del área de estudio: Villarrica, Nevados de Sollipulli, Quetrupillán.

Se incluye dentro de este conjunto de rocas, estratovolcanes Antiguos del Pleistoceno Inferior a Medio (ca. 1,0-0,3 Ma; definidos en la carta geológica de Pucón-Curarrehue, 2008), la cual comprende secuencias estratificadas, intensamente erosionadas y remanentes de antiguos estratovolcanes. Está constituida por secuencias de lavas de composiciones basálticas a dacíticas, aunque predominan ampliamente las andesitas-basálticas, con intercalaciones de tobas, brechas y conglomerados volcánicos, además de diques, filones mantos y lacolitos. Estos estratovolcanes antiguos afloran principalmente en el volcán Villarrica, en su pie oriental, en la cadena de los Nevados de Sollipulli (1.000 m de espesor) y el flanco NNO del volcán Quinquilil (1.300 m de espesor). En general, se disponen en discordancia de erosión sobre los granitoides de la zona o, en discordancia angular, sobre las formaciones Curamallín (OMcm) y Curarrehue (PPlm).

En esta unidad geológica se incluyen además lavas y rocas volcanoclásticas del Pleistoceno Medio a Superior (ca. 300-14 ka; definidos en la carta geológica de Pucón-

Curarrehue, 2008). Está constituida por un conjunto de coladas de lava de composiciones dacíticas, andesíticas, andesíticas-basálticas y basálticas con intercalaciones esporádicas de tobas, conglomerados y brechas volcánicas. Esta unidad forma la secuencia basal erosionada de los estratovolcanes modernos como el Villarrica, Quetrupillán y Sollipulli, como también los desgastados volcanes Cordillera El Mocho y La Barda. Aflora en la parte media a baja de los edificios volcánicos como sucesiones subhorizontales seccionadas por los valles glaciales y cubiertas, en discordancia, por las secuencias de lavas y depósitos piroclásticos que forman los conos volcánicos actuales. Esta unidad está cubierta por los depósitos glaciales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) que la erosionó, por lavas y depósitos piroclásticos del Pleistoceno superior tardío y Holoceno y por los depósitos sedimentarios holocenos.

Finalmente, esta unidad además incluye lavas tardiglaciares del Pleistoceno Superior alto − Holoceno (ca. 14,0-3,5 ka, definidos en la carta geológica de Pucón-Curarrehue, 2008). Está constituida, principalmente, por lavas de morfología superficial bien preservada o con evidencias incipientes de erosión glacial en los sectores elevados. Las lavas son de tipo 'pahoehoe', 'aa' y de bloques, de 1 a 50 m de espesor, según su composición (principalmente andesitas basálticas, andesitas silíceas y dacitas), con intercalaciones piroclásticas, forman sucesiones de fuerte inclinación primaria y constituyen gran parte de los estratovolcanes actuales (Villarrica, Quetrupillán, Sollipulli) o bien, afloran como coladas aisladas en diversos sectores del área, como al oeste del lago Caburgua. Cubren en discordancia de erosión las unidades volcánicas precedentes del Pleistoceno, los depósitos de la Glaciación Llanquihue (Plm1) o rellenan valles labrados en las unidades volcánicas antiguas o en las unidades geológicas que integran el basamento de los volcanes modernos.

Depósitos piroclásticos posglaciales, PlHdp (Pleistoceno Superior alto-Holoceno)

Unidad conformada por una sucesión de depósitos piroclásticos posglaciales, de flujo y caída, con escasas intercalaciones de lavas basálticas a dacíticas, en los sectores proximales a los centros de emisión. Estos depósitos fueron generados por los estratovolcanes modernos como el Villarrica, Quetrupillán y Sollipulli (ca. 14,0-0,5 ka). En los faldeos del volcán Villarrica, esta unidad está conformada por las ignimbritas Cudico y Licán en la base, y en los niveles superiores por la ignimbrita Pucón.

Lavas y conos de piroclastos recientes, Hv (Holoceno)

Esta unidad está integrada principalmente por coladas de lava basálticas a dacíticas recientes e históricas (ca. <11 ka) emitidas por los estratovolcanes modernos y conos de piroclastos monogénicos holocenos. Los estratovolcanes con lavas holocenas, corresponden a los mayores del área de estudio (Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica, Quetrupillán y Sollipulli). La unidad es predominantemente lávica, aunque presenta intercalaciones de depósitos piroclásticos tanto de caída como de flujo.
Las lavas basálticas son del tipo 'pahoehoe' o 'aa', las andesítico-basálticas son 'aa', con espesores de 1 a 5 m, mientras que las andesíticas silíceas y dacíticas son del tipo bloques, con espesores de 20 a 70 m, respectivamente.

Los conos de piroclastos monogénicos y lavas basálticas asociadas son numerosos en el área y se presentan en grupos o en forma aislada.

6.2.1.3 Rocas Intrusivas

Grupo Plutónico del Cretácico, Kg (Jurásico Superior – Cretácico)

Se agrupan en esta unidad a todos los cuerpos intrusivos que comprenden edades entre el Jurásico Superior y el Cretácico.

- Grupo Plutónico Gualletué: su composición varía entre monzogranitos y dioritas cuarcíferas, con predominio de tonalitas y granodioritas. Subordinadamente, se presentan monzogranitos y dioritas cuarcíferas. Se ubican hacia el límite este de la cuenca del río Imperial, en el flanco este del volcán Sollipulli.
- Complejo Intrusivo Maichín: son predominantemente tonalitas, granitos, granodioritas, dioritas cuarcíferas y dioritas de hornblenda y biotita. Además, aparecen en forma subordinada, monzonitas, gabros, gneisses y milonitas. Tiene continuidad hacia el norte con el Grupo Plutónico Gualletué. Sus afloramientos ocurren en el límite este de la cuenca del río Toltén.
- Granitoides Palguín: corresponden a dos cuerpos intrusivos de composición tonalita y granodiorita, ubicados en el flanco norte del volcán Quetrupillán, y expuestos al este de la traza de la falla Liquiñe-Ofqui.
- Granitoides Reigolil: corresponde a un cuerpo intrusivo que comprende principalmente, granitos, dioritas y granodioritas subordinadas, y que aflora en una franja de orientación norte-sur, en el flanco sureste del volcán Sollipulli. Esta unidad, tiene continuidad hacia el sur con parte del Grupo Plutónico Gualletué. Por otra parte, los Granitoides Reigolil están separados del Complejo Intrusivo Maichín (Cretácico Inferior) por la Falla Reigolil-Pirehueico.
- Granito Caburgua: cuerpo intrusivo que comprende principalmente granitos, además de granodioritas y dioritas, el cual aflora al oeste y sureste del lago Caburgua.
- Granodiorita Los Boldos: corresponde a dos cuerpos intrusivos emplazados en el basamento metamórfico paleozóico, ubicados en el extremo este de la cuenca del río Queule.

Granitos Curacalco, Egc (Eoceno)

Cuerpo intrusivo plutónico tipo 'stock', formado principalmente por granitos de biotita y granodioritas de hornblenda y escasa biotita. Sus afloramientos son restringidos, está localizado al NE del lago Colico.

Grupo Plutónico del Mioceno, Mg (Mioceno)

Se agrupan en esta unidad a todos los cuerpos intrusivos que ocurren durante el Mioceno, y que se describen a continuación:

- Granitoides Carhuello: cuerpo intrusivo plutónico, formado principalmente por dioritas, granitos y granodioritas, cuyos afloramientos están localizados al norte y noreste de Pucón, localizado al oeste de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui.
- Granitoides Trancura: rocas intrusivas miocenas que se concentran en el dominio interno de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (al sur del lago Caburgua) y en una franja transversal ONO-ESE a lo largo del valle del río Pucón o Minetué y en los alrededores de Curarrehue. Comprenden, principalmente, granitos, granodioritas, aplitas y dioritas.

- Diorita Tres Horquetas: cuerpo intrusivo plutónico, cuyos afloramientos están localizados al norte del lago Colico, y está conformado principalmente por dioritas de hornblenda y biotita, además de pórfidos andesíticos subordinados.
- Granitos y granodioritas Las Peinetas: cuerpo intrusivo plutónico, cuyos afloramientos se extienden al este del río Trancura. Predominan las litologías granitos y granodioritas de hornblenda y escasa biotita.
- Complejo Intrusivo Huerquehue: cuerpo plutónico que conforma los llamados Nevados de Caburgua. Está formado predominantemente por granitos, granodioritas y dioritas y está localizado al este de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui.
- Grupo Plutónico Melipeuco: se agrupan afloramientos de rocas graníticas, ampliamente distribuidas entre los volcanes Sollipulli y Lonquimay. Las rocas son de tipo granodioritas, dioritas cuarcíferas y tonalitas subordinadas. Localmente presenta cataclasis.

6.2.1.4 Sedimentos No Consolidados

Depósitos Morrénicos de la Glaciación Río Llico, Plm3 (Pleistoceno Medio)

Corresponden a depósitos de origen glacial, compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas. La meteorización prolongada ha alterado más del 80% de la mineralogía de los clastos a minerales de arcillas de colores intensos, con predominio del rojo, amarillo, naranjo y gris azulado, lo que le da un aspecto multicolor al depósito cuando está recién expuesto.

Los depósitos son polimícticos, matriz soportados, mal seleccionados y sin estratificación. Los clastos corresponden a fragmentos de granitoides y diferentes tipos de rocas volcánicas, de formas subredondeadas. La mayoría de estos clastos miden entre 5 y 20 cm, pero algunos sobrepasan los 70 cm de largo máximo, en una matriz compuesta de arenas, limos y arcillas. Algunos clastos volcánicos poseen cáscaras concéntricas de meteorización de 3-10 mm, con escasos núcleos remanentes y los fragmentos de granitoides se disgregan fácilmente a maicillo. Además, es notable la presencia de abundantes óxidos de Fe y Mn, los cuales se encuentran como pátinas en clastos y lentes en la matriz.

Los depósitos presentan espesores observados de hasta 6 m, que se distribuyen restringidamente en el sureste de la zona de estudio (al oeste del lago Colico y norte del lago Villarrica.), donde subyacen a depósitos fluviales holocenos (Hf) y a diamictos morrénicos de la Glaciación Santa María (Plm2). Estos sedimentos morrénicos han sido asignados a la Glaciación Río Llico (con edades probables entre 480.000 y 338.000 AP).

Depósitos Glaciofluviales de la Glaciación Río Llico, Plgf3 (Pleistoceno Medio)

Corresponden a gravas arenosas y arenas que subyacen a los depósitos glaciofluviales de las glaciaciones Llanquihue (Plgf1) y Santa María (Plgf2). Medianamente consolidadas, contienen fragmentos de composición volcánica y en menor proporción granitoide, moderada a fuertemente meteorizados, con formas redondeadas y alargadas, y presentan estratificación horizontal tanto grano decreciente como creciente, cruzada y localmente, con clastos imbricados.

Los afloramientos tienen morfología plana de terrazas, topográficamente más elevadas que las correspondientes a los depósitos glaciofluviales de la primera y segunda

glaciaciones (Plgf1 y Plgf2), aunque, localmente, conforman lomajes suaves producto de la erosión.

Se observan escasos afloramientos en el centro de la cuenca del río Imperial, específicamente en las comunas de Freire y Nueva Imperial.

Depósitos Morrénicos de la Glaciación Santa María, Plm2 (Pleistoceno Medio)

Corresponden a gravas, arenas, limos y arcillas. Los depósitos de grava presentan mala selección, son matriz soportados, y localmente, compactos y semicementados. La gran mayoría de los clastos presentan formas subredondeadas y corresponden a fragmentos de rocas volcánicas de composición andesítica basáltica y de rocas graníticas. La matriz, por lo general, se encuentra oxidada en la parte superior (hasta 2 m). Los clastos, meteorizados en su mayoría, tienen cáscaras concéntricas de meteorización de 1-2 mm. Algunos clastos tienen estrías y facetas de erosión glacial.

Sobreyacen a depósitos correspondientes a la Glaciación Río Llico (Plm3) y depósitos volcanoclásticos de la formación Malleco/Curarrehue y subyacen a depósitos de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y fluviales del Holoceno (Hf). Estos depósitos morrénicos, se atribuyen a la glaciación Santa María (con edades probables entre 260.000 y 132.000 AP) se encuentran generalmente cubiertos por depósitos de flujos piroclásticos, con un promedio variable entre 3 y 12 m de espesor.

Se distribuyen en el centro de la cuenca del río Toltén, específicamente, en la ribera sur del río Allipén y ribera sur y oeste del río Toltén. En este último sector, una de las zonas con mayor extensión de estos depósitos, producto de la erosión fluvial, se ha formado un escarpe de unos 100 m de altura.

Los depósitos forman una morfología ondulada, de topografía alineada (noroeste y suroeste del río Toltén), de cordones morrénicos (lago Huilipilún) y de cadenas y canales de amplitud de 10 a 15 m (oeste y al norte del río Toltén).

Depósitos Glaciofluviales de la Glaciación Santa María, Plgf2 (Pleistoceno Medio)

Corresponden a gravas y arenas gruesas, con intercalaciones locales de limos y arcillas. Sobreyacen a depósitos volcanoclásticos del Pleistoceno y su techo corresponde a sedimentos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1).

Son moderadamente consolidados, clasto y matriz soportados, con una selección regular a mala y de color gris anaranjado, presentan estratificación cruzada, horizontal, y grano-decreciente. Los clastos son bien redondeados y moderadamente frescos con fragmentos de rocas graníticas, andesitas, andesitas basálticas, cuarzo y magnetita. La matriz es arenosa y con escaso contenido de arcillas, en la que se observan, además, óxidos de hierro y, en menor proporción, óxidos de manganeso. Presentan un bajo grado de meteorización y en general, estos depósitos están cubiertos por un espesor de 1 a 5 m de suelos rojizos, caracterizados por alteración de lahares y flujos piroclásticos de características andesíticas.

Se observan en las riberas de los ríos Toltén, Allipén, Quepe y Cautín, donde conforman un relieve suave y ondulado caracterizado por planicies y llanuras anchas con una red de drenaje moderada en una posición elevada con respecto a los depósitos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1).

La unidad en su conjunto se interpreta como depósitos de cauces distales de ríos trenzados, en un sistema proglaciar activo, asociados al desagüe proveniente de los

lóbulos glaciarios localizados al este, con intercalaciones de flujos piroclásticos y lahares vinculados a erupciones de los volcanes de la Cordillera Principal.

Depósitos fluvioestuarinos, Plfe (Pleistoceno Medio - Superior)

Depósitos sedimentarios de ambiente fluvial, estuarino y marino, moderada a débilmente consolidados, de disposición horizontal a subhorizontal, que morfológicamente se caracterizan como amplias terrazas y planicies suavemente onduladas. En el área de estudio, se encuentran distribuidas en la desembocadura del río Toltén.
Estos depósitos se localizan estratigráficamente, entre los depósitos asociados a las glaciaciones Llanquihue y Santa María. Parte de estos depósitos sobreyace en forma discordante a los esquistos del Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM). En la mayor parte del área, la base de los depósitos no aflora y el techo está cubierto por depósitos fluviales del Holoceno (Hf).
Se han descrito dos facies para estos depósitos, que engranan lateralmente. La facies autóctona, está compuesta por sedimentos cuya fuente corresponde al CMBM y a restos vegetales, se interestratifican grava aluvial de grano grueso y fino, arena, limo y turba, esta última se presenta en tres niveles, uno a nivel del mar a 34 y 40 msnm. Esta facies tiene un desarrollo areal que se restringe a la desembocadura de antiguos ríos y estuarios, los que, en la mayoría de los casos, se encuentran activos.
La segunda facies, denominada alóctona, se compone de sedimentos arenosos de grano medio y fino, de origen volcánico, generalmente con ceniza en su matriz. Contiene intercalaciones de limos y arcillas, así como fragmentos de cristales de origen volcánico y, localmente, delgadas capas de pómez. La facies alóctona es de distribución más extendida, con afloramientos en la costa, a lo largo de los estuarios y ríos más importantes. La mayoría de los depósitos fluvioestuarinos expuestos, dentro del área del mapa, muestran ambas facies interestratificadas, con predominio local de la facies alóctona.

Estos depósitos están bien representados al norte de Queule, y al norte y este de Toltén. Se estima una potencia expuesta de, al menos, 40 m para estos depósitos.

Depósitos Morrénicos de la Glaciación Llanquihue, Plm1 (Pleistoceno Superior)

Depósitos compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas. Los depósitos de gravas se observan mal seleccionados, matriz soportados, y con moderada compactación. La gran mayoría de los clastos presentan formas subredondeadas y corresponden a fragmentos de rocas volcánicas de composición andesítica basáltica y de rocas intrusivas graníticas, en matriz compuesta de arenas y limos. Los fragmentos se presentan frescos y moderados a bien redondeados, con algunos clastos estriados y facetados.

Se distribuyen como arcos morrénicos alrededor de las riberas de los lagos Villarrica y Colico y que sobreyacen a rocas volcánicas de la Formación Malleco y depósitos asignados a la Glaciación Santa María (Plm2). Localmente, se interdigitan con gravas y arenas glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1). Las partes centrales de los complejos morrénicos alrededor de los lagos Colico y Villarrica alcanzan más de 100 m sobre el nivel del agua. Las cadenas de morrenas individuales situadas en los flancos y cimas de estas acumulaciones macizas varían entre 3 y 20 m de altura. Es problable que este arreglo topográfico se originara por repetidos avances de lóbulos de hielo hacia límites similares durante las etapas más frías del último ciclo glacial.

Parte del subsuelo de la ciudad de Villarrica corresponden a depósitos de varves de limos y arcillas glaciolacustres que contienen abundantes 'dropstones', depósitos que suelen formarse debido al desarrollo de lagos en la morrena terminal al retroceder el hielo. Estos materiales fueron posteriormente empujados y disturbados por el último avance del hielo, permanecieron muy compactados y las estructuras glacitectonizadas resultantes son visibles localmente a lo largo de la costa. Estos materiales son los que, en rigor, mantienen el nivel del agua en los lagos actuales ('waterline till').

Depósitos Glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue, Plgf1 (Pleistoceno Superior)

Corresponden a gravas y arenas, con menor proporción de limos y arcillas, que sobreyacen a los depósitos glaciofluviales de la Glaciación Santa María (Plgf2), Río Llico (Plgf3) y a los depósitos volcanoclásticos del Plioceno-Pleistoceno (PPlm, PPlmu) y subyacen a depósitos fluviales actuales.

Las gravas son moderadamente a mal seleccionadas, con clastos subredondeados a redondeados, compuestos en su mayoría por andesitas y dacitas, provenientes de la Cordillera Principal. Se observan, también, clastos de basaltos, limolitas y de rocas plutónicas. Los clastos, en general, no presentan cáscaras de meteorización. En algunos fragmentos, es posible observar estrías y facetas glaciares.
Las gravas, clastosoportadas, con matriz de arena gruesa, presentan estratificación planar horizontal y, localmente, imbricación de clastos e intercalaciones de niveles de arena, de formas lenticulares a tabulares. Las arenas, de grano fino a grueso, con estratificación planar horizontal y cruzada, aparecen intercaladas con niveles de gravas matriz soportadas que, en algunos sectores, presentan gradación normal. La presencia de óxidos de Fe y Mn en los sedimentos es, en general, escasa y se limita a los 2 m superficiales. Es común la existencia de una capa de suelo pardo oscuro, menor que 1 m en espesor, que cubre estos depósitos, desarrollado en material piroclástico.

Esta unidad conforma un relieve aterrazado, que se caracteriza por planicies y llanuras anchas de inundación fluvial y frente del sistema morrénico de la Glaciación Llanquihue (con edades probables entre 73.000 y 14.000 AP). Los depósitos de esta unidad ocupan las terrazas medias a bajas de los ríos Quepe, Cautín, Allipén y Toltén.

Depósitos fluviales antiguos, Hfa (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a sedimentos antiguos no consolidados, que fueron depositados por antiguos cursos de ríos meandriformes inscritos en la cuenca de Labranza, en los alrededores de los ríos Cholchol y Quepe y ríos trenzados en los alrededores de Boroa. Por sobre el lecho de los ríos Cholchol y Quepe están representados por terrazas de 1-4 m de alto. En el río Quepe esta unidad está caracterizada por depósitos no consolidados, compuestos por conglomerados clastosoportados, grano decrecientes, imbricados hacia el NO, con niveles de arena fina y limos, asociados a ríos trenzados.

En el río Cholchol está caracterizada por una secuencia de limos finamente laminados y arenas finas sin aparente estructura interna, con menor presencia de turba. En algunos casos se observan arenas con estratificación planar horizontal, que alternan con gravas finas clastosoportadas y grano decreciente.

Estos depósitos sobreyacen en discordancia de erosión a rocas sedimentarias y volcánicas del Oligoceno-Mioceno (EMt, OMp) y depósitos no consolidados asociados a las glaciaciones pleistocenas (Plgf2). En los alrededores de Nueva Imperial, los depósitos fluviales antiguos del río Cholchol engranan lateralmente con los depósitos

glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1), lo que sugiere que, en parte, estos depósitos fluviales serían contemporáneos a esta glaciación.

Depósitos lahári cos históricos y actuales, Hlh (Holoceno superior e histórico)

Depósitos de flujo de detritos volcánicos, no consolidados, con abundantes fragmentos tamaño grava y bloques polimícticos, subredondeados a angulosos y ricos en matriz arenosa, mal seleccionados. El espesor de los depósitos lahári cos varía desde decímetros hasta varios metros. Están asociados, principalmente, a erupciones del volcán Villarrica en donde pequeños abanicos han descendido por los cauces de los ríos nacientes del volcán.

Depósitos de remoción en masa, Hrm (Holoceno)

Depósitos caóticos, que se acumulan al pie de escarpes y son producidos por la movilización rápida o lenta de rocas, derrubios y/o suelo, como resultado de procesos gravitacionales, como deslizamientos y avalanchas. Generalmente, estos procesos están favorecidos por debilidades estructurales de las rocas en zonas de alta pendiente y muchas veces son gatillados por la sobresaturación de agua durante las lluvias.
Los depósitos están conformados por fragmentos angulosos a subangulosos, de tamaño gravas a bloques de tendencia monomíctica y clastosoportados, con una matriz de gravilla, arena y subordinadamente arcilla-limo, de mala selección.

Con motivo del terremoto de Febrero del año 2010, el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) realizó una serie de observaciones en diferentes localidades de la IX Región, solicitados por municipios, el GORE, MINVU Araucanía, SERVIU Araucanía, Concejeros Regionales, COE Araucanía, Gobernación Provincial, DOH Araucanía.

Estas descripciones geológicas incluye, entre otras, la descripción de grietas (tamaño, apertura, profundidad, orientación), de remociones en masa y estructuras. En general realizan observaciones acerca de estado del terreno (estabilidad, pendiente, relleno natural o artificial), situación de peligrosidad y con probabilidad de que se produzcan deslizamientos. En estos documentos se establece además una serie de recomendaciones y medidas preventivas de ordenamiento territorial, con motivo de disminuir el peligro para la población ante un eventual riesgo geológico.

Estas observaciones se realizaron en las siguientes localidades: área urbana de la ciudad de Temuco, Maica, Villarrica, Carahue, Purén, Lumaco, Capitán Pastene, Mininco, Puerto Saavedra, Freire, Teodoro Schmidt, Hualpín, Toltén, Caleta Queule, Angol, embalse Huelehueico, Pitrufquén, los Sauces y Gorbea. En particular, en Villarrica se describe un movimiento de deslizamiento rotacional de relleno artificial, en que el área afectada presentó una extensión de 85 m de largo y unos 60-70 m de ancho, frente a la calle Trecalén.

Depósitos de playas lacustres, eólicos y litorales, Hep (Holoceno)

Se reúne dentro de este grupo a sedimentos de playas lacustres, eólicos y litorales. Los sedimentos de playas lacustres corresponden a fragmentos tamaño arenas finas a gruesas y gravas finas subordinadas, con partículas redondeadas, que forman bancos horizontales de espesor variable. Estos depósitos se ubican en las playas de los lagos Villarrica y Caburga, en donde predominan partículas volcánicas.

Los depósitos eólicos se ubican en el litoral, principalmente en las playas de la bahía Toltén. Se presentan como campos de dunas de 5 a 10 m de altura, en general de topografía ondulada, separados por depresiones, a veces, inundadas. Estos depósitos se componen por arenas de grano medio a grueso, bien seleccionadas.

Finalmente, los depósitos litorales están compuestos por gravas y arenas negruzcas de composición principalmente basáltica y andesítica que se disponen en las playas, en franjas que tienen desde algunos metros hasta 1 km de ancho. Las gravas predominan en las costas interiores y ocupan, principalmente, la zona intermareal. Los clastos son redondeados a subredondeados, con buena a moderada selección y escasa matriz de arena gruesa. Estos depósitos son de gran extensión, particularmente al norte de Punta Nihue.

Depósitos Coluviales, Hc (Holoceno)

Depósitos de bloques y gravas angulosas a subangulosas de mala selección, generalmente monomícticos y clastosoportados, con matriz de grava fina angulosa, arenas y limos. Se presentan al pie de laderas escarpadas como escombros de falda en conos o abanicos coalescentes de pendiente superior a 30°, generados por colapso gravitacional de taludes en condiciones inestables. Estos depósitos no presentan estratificación.

Depósitos Aluviales, Deltaicos y Poligénicos, Hal (Holoceno)

Depósitos no consolidados e inmaduros, compuestos por gravas y arenas. En la zona proximal a su fuente, estos depósitos se componen de gravas, mal seleccionadas, clastos- a matriz soportada, pobremente estratificada, con bolones subredondeados a subangulares, inmersos en una matriz escasa de arena gruesa. En la zona distal, se caracterizan por la disminución del tamaño de los clastos, con acumulación de gravas, lentes de arena y limos con estratificación planar y cruzada de bajo ángulo. Estos depósitos conforman abanicos de pendiente cercana a los 10° en general localizados en la desembocadura de las quebradas. En estos sedimentos, predominan los materiales producto de la interacción entre un transporte gravitacional, como flujo de detritos, y uno fluvial. Se acumulan en la cabecera, eje y desembocadura de las quebradas tributarias a los valles principales.

Depósitos Fluviales, Hf (Holoceno)

Depósitos no consolidados de gravas, arenas y limos interestratificados, en partes, intercalados por gravas con moderada a buena selección, compuestas por clastos redondeados a subredondeados. Esta unidad incluye los depósitos que ocupan los lechos y las llanuras de inundación de cursos fluviales activos. Destacan en importancia, los depósitos situados a largo del curso de los ríos Queule, Quepe, Allipén, Cautín, Toltén, Cholchol, Imperial, etc.

Las gravas se presentan, comúnmente, clastosoportadas y, en parte, imbricados, con matriz de arena gruesa, intercaladas con bancos de arena y limos, con estratificación cruzada y en artesa, y laminación, respectivamente. Los tamaños de los clastos varían desde menos de 10 cm a más de 100 cm. Las terrazas formadas por estos depósitos son constantemente sobrepasadas cuando aumenta el nivel del río.

6.2.1.5 Contexto Geológico del Área de Estudio

La región de La Araucanía se caracteriza por presentar unidades geológicas que abarcan desde el Devónico-Carbonífero (Paleozoico) al presente. La Figura 6-3 muestra la distribución de estas unidades en superficie.

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), el que expone esquistos pelíticos a semipelíticos, con intercalaciones menores de meta-areniscas y metacherts, esquistos máficos y rocas ultramáficas, en general intensamente plegadas. 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. Esta cuenca es parte de diversas cuencas extensionales tipo rift, relacionadas con una extensión cortical en el borde occidental del megacontinente Gondwana, desarrolladas durante el preciclo Andino en donde hubo un cese del ciclo de subducción.

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 marinas y continentales, constituidas por rocas clásticas y carbonatadas, lavas basálticas de ambiente marino y rocas volcánicas de ambiente subaereo, representado por la formación Nacientes del Bio Bio (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. Estas unidades presentan edades del Jurásico Superior-Cretácico (Grupo Plutónico Gualletue), Cretácico Inferior (Complejo Intrusivo Maichín y Granitoides Palguín), Cretácico Superior (Granitoides Reigolil, Caburgua, granodiorita Los Baldos y las secuencias volcánicas Complejo Viscacha-Cumilao).

Posteriormente, en el Paleoceno, sobre este basamento plutónico-volcánico, se desarrollaron cuencas intramontanas, 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) como se observa en afloramientos al norte y sur de Temuco). Los centros activos de estas cuencas de intrarco se localizaron sobre una estructura mayor de orientación NO-SE, denominada Zona de Falla Lanalhue (ZFL). Durante el Oligoceno superior-Mioceno se depositaron

en estas cuencas depósitos de lavas andesíticas y brechas volcánicas, con intercalaciones de tobas, areniscas y conglomerados, además de cuerpos subvolcánicos, representados por la Formación Curamallín (OMcm). La subsidencia en la cuenca y el volcanismo se prolongaría hasta el Mioceno inferior, donde 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), caracterizada por areniscas y limolitas con flora y fauna fósil márinas.

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 glaciar 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. Estos sedimentos provienen de la erosión del basamento metamórfico y las unidades triásicas, producto de su alzamiento, en la formación de la cordillera de Nahuelbuta (activación de la ZFL) originando las unidades Conglomerado Paillal y Conglomerado Raluncoyán (PPl). Paralelamente, se depositaron secuencias volcánicas, volcanocláticas y tobas de las formaciones Malleco y Curarrehue (PPlm) 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 (PPlmu) y también a depósitos de la Formación Malleco (PPlm).

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 estas, 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 (PlHdp) 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).

6.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

A continuación se presenta un resumen de la geología estructural expuesta en las cartas geológicas del Sernageomin (Figura 6-3), complementado con estudios estructurales en el área de estudio (Melnick et al. 2006, 2009).

6.3.1 Deformación dúctil a frágil-dúctil y frágil de Complejos Metamórficos

Las rocas metamórficas de la Cordillera de La Costa fueron afectadas por una deformación al estado dúctil a frágil-dúctil, mientras que una deformación al estado frágil se sobrepuso a la anterior y afectó incluso a rocas del Cenozoico. La foliación principal S2, de carácter dúctil y penetrativa, que exhiben las rocas del Complejo Metamórfico Bahía Mansa, presenta tres direcciones preferenciales de orientación N-S, NO y NE, con manteos variables entre 30 y 60º al NE y SE. Pliegues asimétricos y recumbentes (en algunos casos isoclinales) de S2 presentan planos axiales de dirección N-S y NO-SE.

Estructuras frágiles tipo fallas normales de dirección preferencial al NO y NO-O, subverticales, han afectado a las rocas basamentales. Otras estructuras frágiles, que son mejor observadas en la vertiente oriental de la Cordillera de La Costa, y que podrían tener continuidad hacia el sur, habrían originado sistemas de cuencas de orientación norte-sur durante el Oligoceno Superior-Mioceno temprano.

Algunas fallas inversas, de vergencia al oeste, asociadas a los emplazamientos tectónicos de esquistos máficos y de rocas ultramáficas, se observan en el cerro El Mirador, al sur del área de estudio, en la carta geológica Lanco-Loncoche.

6.3.2 Zona de Falla Lanalhue

Se reconoce un sistema de fallas activo en la Cordillera de La Costa denominado Zona de Falla Lanalhue (ZFL). La ZFL presenta una orientación NO-SE y se extiende desde la península de Arauco (lago Lanalhue) hasta las cercanías de Temuco. Su actividad habría comenzado con fallas sinestrales (caracterizada por zonas miloníticas) durante el Pérmico inferior, desplazando los bloques continentales por más de 100 Km y controlando el alzamiento de la Cordillera de Nahuelbuta, hasta el Triásico Inferior. En el Triásico Superior, su reactivación como fallas normales de orientación NO-SE habría controlado la generación de cuencas tipo rift. Durante el Oligoceno superior-Mioceno inferior a medio, su actividad se percibió como fallas normales de orientación NO-SE y E-O, subverticales, que habrían afectado las rocas del basamento, generado cuencas de intraarco y condicionado el emplazamiento de estructuras volcánicas y cuerpos subvolcánicos.

Durante el Mioceno superior al Plioceno-Pleistoceno, cambios en el régimen de subducción habrían generado esfuerzos compresivos y transpresivos que habrían producido la inversión de las cuencas oligocenas-miocenas. Esto también provocó el alzamiento de terrazas adosadas al basamento metamórfico en la Cordillera de Nahuelbuta, favoreciendo la generación de potentes depósitos de conglomerados en la cuenca de Labranza (Conglomerado Raluncoyán y Conglomerado Paillal) y lagos costeros elevados (e.g., Lanalhue, fuera del área de estudio).

Otras estructuras que estarían ligadas a la ZFL corresponden a una estructura inversa de orientación NNO-SSE y vergencia al oeste en el estero Paillal (escarpe con

afloramientos del Triásico y ocurrencia de la unidad Conglomerado Paillal) y lineamientos de orientación NO-SE, ENE-OSO y E-O.

Datos de neotectónica indican que la ZFL está activa, especialmente por los epicentros de réplicas de los sismos del 22 de mayo de 1960 y del 27 de febrero de 2010, localizados en la porción meridional de la cordillera de Nahuelbuta. En la región de La Araucanía, el terremoto del año 1960, produjo una subsidencia de alrededor 2 m, generando un hundimiento del terreno, donde depósitos fluviales (Hf) fueron permanentemente inundados, los que constituyen actualmente humedales. Soluciones focales reportadas de las réplicas del terremoto del 27 de febrero del 2010, indicarían un movimiento inverso con un componente sinistral. La reactivación reciente de la ZFL estaría relacionada con el alzamiento de la cordillera de Nahuelbuta.

6.3.3 Zona de Fallas Liquiñe-Ofqui y falla Reigolil-Pirehueico

Otro sistema de fallas activo en la Cordillera Principal corresponde a la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO) y la falla Reigolil-Pirehueico (FRP). Ambos presentan orientación N-S a NNE y definen un sistema estructural de intraarco que se extiende por ca. 1.200 km entre los 38 y 46°S.

El emplazamiento del Conjunto de Volcanes de la Cordillera Principal estaría controlado por ZFLO, la cual pasa por la traza de los volcanes Lonquimay y Llaima, continua por el borde este y oeste del lago Caburga y finaliza al sur del área de estudio pasando por la traza del volcán Villarrica.

Datos gravimétricos y de campo indican que las estructuras mayores (ZFLO y FRP) son de ancho decamétrico, que están profundamente enraizadas en el basamento y describen ejes de acortamiento aproximadamente NE-SO, compatibles con un régimen transpresivo dextral. Esto es concordante con la geometría de los alineamientos volcánicos, lo que admite una interpretación similar en el régimen de deformación durante el Pleistoceno-Holoceno, período en el que domina un eje de máximo esfuerzo horizontal de rumbo noreste-suroeste.

Durante el Cuaternario la zona de deformación activa estaría limitada en el oeste por el borde occidental de la franja plutónica miocena, y en el este por la Falla Reigolil-Pirehueico, y se caracteriza por un régimen de deformación transpresivo dextral. La edad mínima de esta deformación queda acotada por una edad de ca. 3,1 Ma obtenida en granitoides foliados del lago Caburgua. Plegamientos asociados a esta deformación se observa en los Estratos de Relicura (KTvc) o la Formación Curamallín (OMcm) y la Formación Curarrehue (PPlm).

6.3.4 Zona de Falla Mocha-Villarrica

Estructuras secundarias de orientación NO-SE que atraviesan ambas fallas, se observa desde la ribera norte del lago Villarrica hasta el curso medio del río Trancura, observándose la alineación en esa misma orientación los estratovolcanes Lanín y Villarrica. Estas estructuras formarían parte del Sistema de Gastre definido en Argentina como un conjunto de estructuras activadas en el Jurásico para las que se ha descrito, además, desplazamiento sinestral hasta el Mioceno Superior y, eventualmente, Pleistoceno. Melnick et al, 2003 une el lineamiento volcánico Villarrica-Quetrupillan-Lanín con el cañón del Río Imperial, el cual correspondería una estructura de similar orientación. De esta forma, se denomina a este set de estructuras como Zona de Fallas Mocha-Villarrica, sin embargo, el relleno de la Depresión Intermedia dificulta su verificación.

6.4 GEOLOGÍA DE SUBSUPERFICIE

En las cuencas de estudio, se cuenta con la información estratigráfica de pozos a partir de 5 fuentes de información (Anexo A.1):

- Pozos ENAP: información relevante en cuanto a la caracterización de las unidades geológicas más profundas. Esta referencia (ENAP, 1966-1993) presenta la descripción estratigráfica de detalle de 14 pozos cuya profundidad de varía entre 348 m y 1153 m. La mayoría de la información geológica se encuentra concentrada en el sector de Labranza.
- Pozos APR: Corresponden a 31 pozos que presentan información estratigráfica con profundidades variables entre 20 y 126 m de profundidad.
- Piezómetros DGA: entrega información estratigráfica de 5 piezómetros perforados por Compañía Chilena de Perforaciones, distribuidos en las cuencas en estudio, con profundidades variables entre 27,5 y 30,58 m.
- Catastro de Expedientes de solicitudes de derechos de aguas subterráneas de la Dirección general de Aguas (DGA): se cuenta con un total de 231 pozos con información de estratigrafía, con profundidades variables entre 3 y 175 m.
- Pozos GeoH: Corresponde a 3 pozos construidos durante la realización de este estudio, cuyas profundidades van desde los 103 m a los 150 m.

6.4.1 Análisis Regional

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, se describe a continuación la geología de subsuperficie de las áreas de estudio.

6.4.1.1 Cuenca del Río Imperial

Dentro de la cuenca hidrográfica actual del río Imperial, los trabajos de ENAP (1987) caracterizaron la cuenca sedimentaria de Temuco, de edad Cenozoica. Este trabajo se efectuó en base a la estratigrafía de los pozos de exploración perforados por ENAP y a trabajos de gravimetría realizados en la zona. La cuenca sedimentaria de Temuco se ubica en la depresión del valle central, entre Los Ángeles y Villarrica, y entre las cordilleras de la Costa y de los Andes, emplazándose en gran parte en la cuenca hidrográfica actual del río Imperial. El relleno de esta cuenca sedimentaria está constituida por secuencias del Eoceno al Cuaternario, de tipo marino y continental.

La Figura 6-5 muestra un perfil geológico regional (A-A') de la cuenca del río Imperial, basada en información de las cartas geológicas del área de Temuco (REF 10-P, Sernageomin, 2010) y del área de Curacautín (REF 16-P, Sernageomin, 1997), además de la estratigrafía de pozos ENAP: Cholchol 2 (397 m de profundidad) y Antaro 1 (1.153 m de profundidad). En esta figura, se observa además un perfil geológico local (1-1'), mostrando la estratigrafía proveniente de los expedientes de pozos, ubicados a una distancia menor a 500 m del perfil, que fueron proyectados a éste.

De la Figura 6-5 se observa, principalmente, las diferencias en las escalas de trabajo que involucra el área en estudio. Existen dos escalas de trabajo principales:

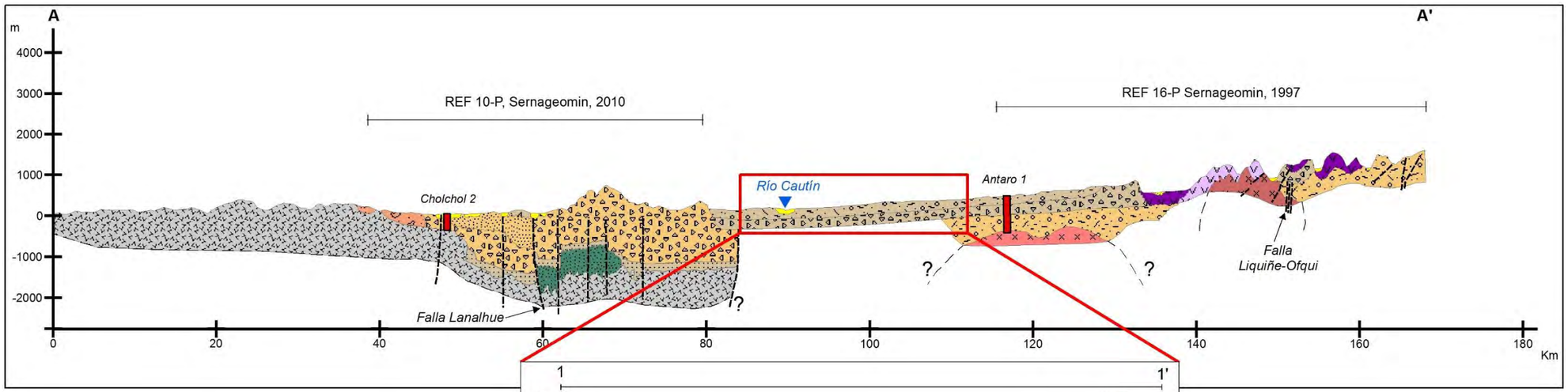
1) Geología de Subsuperficie profunda, caracterizada por una historia geológica compleja, en que el basamento rocoso se encuentra deformado y controlado

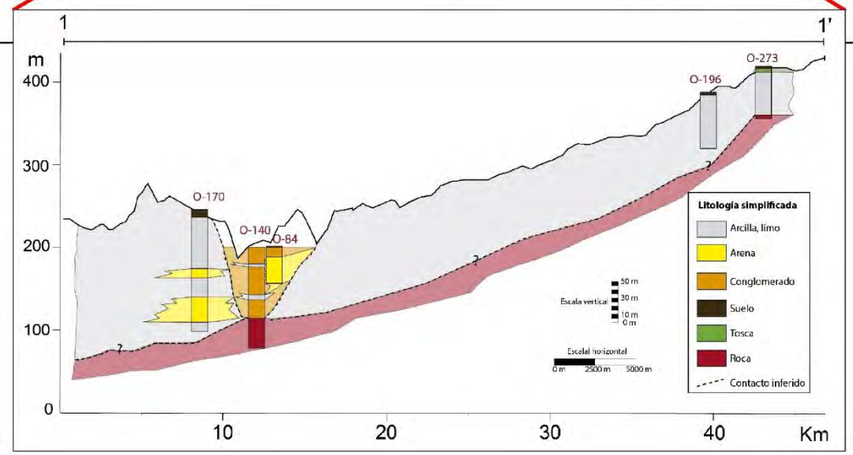
tectónicamente por estructuras, alcanzando profundidades mayores a 1.000 m. Las secuencias volcánicas y sedimentarias (de origen continental y marino) que se depositaron sobre este basamento, pueden ser descritas y definidas en subsuperficie, preliminarmente, sólo a partir de la estratigrafía de pozos perforados por ENAP (que presentan profundidades mayor a 300 m). En este sentido, se observa en el perfil geológico regional A-A′ que los pozos Cholchol 2 y Antaro 1, alcanzan el basamento metamórfico (PzTrbm) y granítico (Kg) por el oeste y este, respectivamente.

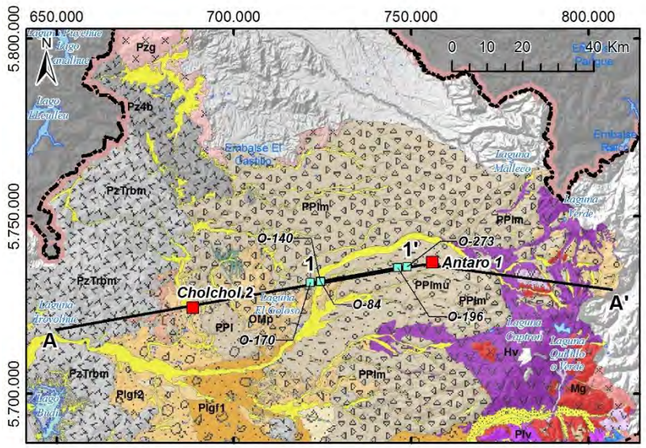
2) Geología de Subsuperficie Somera, caracterizada por secuencias sedimentarias jóvenes, no consolidadas a semiconsolidadas, consistentes en gravas, arenas, limos y arcillas. La mayoría de las captaciones de agua subterránea, se ubican sobre estas unidades, y corresponde a la principal fuente de información estratigráfica para su descripción (expedientes de pozos, pozos APR y DGA-CChP).

De la Figura 6-5 se observa el perfil geológico local 1-1′, de dirección NE-SO, que se dispone sobre el perfil geológico A-A′. Destaca una capa superficial con espesores variables entre 50 y 100 m, caracterizada por sedimentos finos (arcilla y limos) y que superficialmente corresponden al Abanico Volcanoclástico de Muco (PPlmu). La descripción estratigráfica de los pozos, indican la intercalación de niveles de granulometría más gruesa (arenas), que podrían corresponder a lentes, o bien, a variaciones laterales en la granulometría. El pozo O-140 ubicado en la traza del río Cautín, está conformado por conglomerados, que corresponderían a depósitos fluviales del río (Hf).

La Figura 6-6 muestra el perfil geológico local 2-2′, de dirección N-S, el cual atraviesa los ríos Cholchol, Cautín y Quepe. La descripción estratigráfica de los pozos ubicados en este sector, indican una granulometría gruesa (conglomerado) con escasas intercalaciones de material fino (arcilla, limo). Superficialmente, estos pozos se ubican principalmente sobre depósitos fluviales y glaciofluviales.







Simbología

- Pozos ENAP
- Estructuras
- Perfiles

Unidad Geológica

- Areniscas
- PzTrbm: Complejo Metamórfico Bahía Mansa
- Tr: Formación Llafquentué-Huimpil
- Jnb(lp): Formación Nacientes del Bío Bío
- Kg: Grupo Plutónico del Cretácico
- KTvc: Complejo Viscacha-Cumilao/Estratos de Relicura
- Emt: Formación Temuco
- OMp: Formación Pilmahue
- OMcm: Formación Curamallín
- Mg: Granitoides Carhuello
- Mch: Estratos de Huinchahue y Fm Cholchol
- PPlm: Formación Malleco/Curarrehue
- PPl: Conglomerados Raluncoyén y Paillal
- PPlmu: Abanico Volcanoclástico de Muco
- Hv: Lavas y conos de piroclastos recientes
- Hal: Depósitos aluviales, deltaicos y poligénicos
- Hf: Depósitos fluviales actuales

Figura 6-5: Perfil Geológico Regional A-A’ y Local 1-1’de la cuenca del río Imperial (REF 10-P, Sernageomin, 2010; REF 16-P, Sernageomin, 1997)

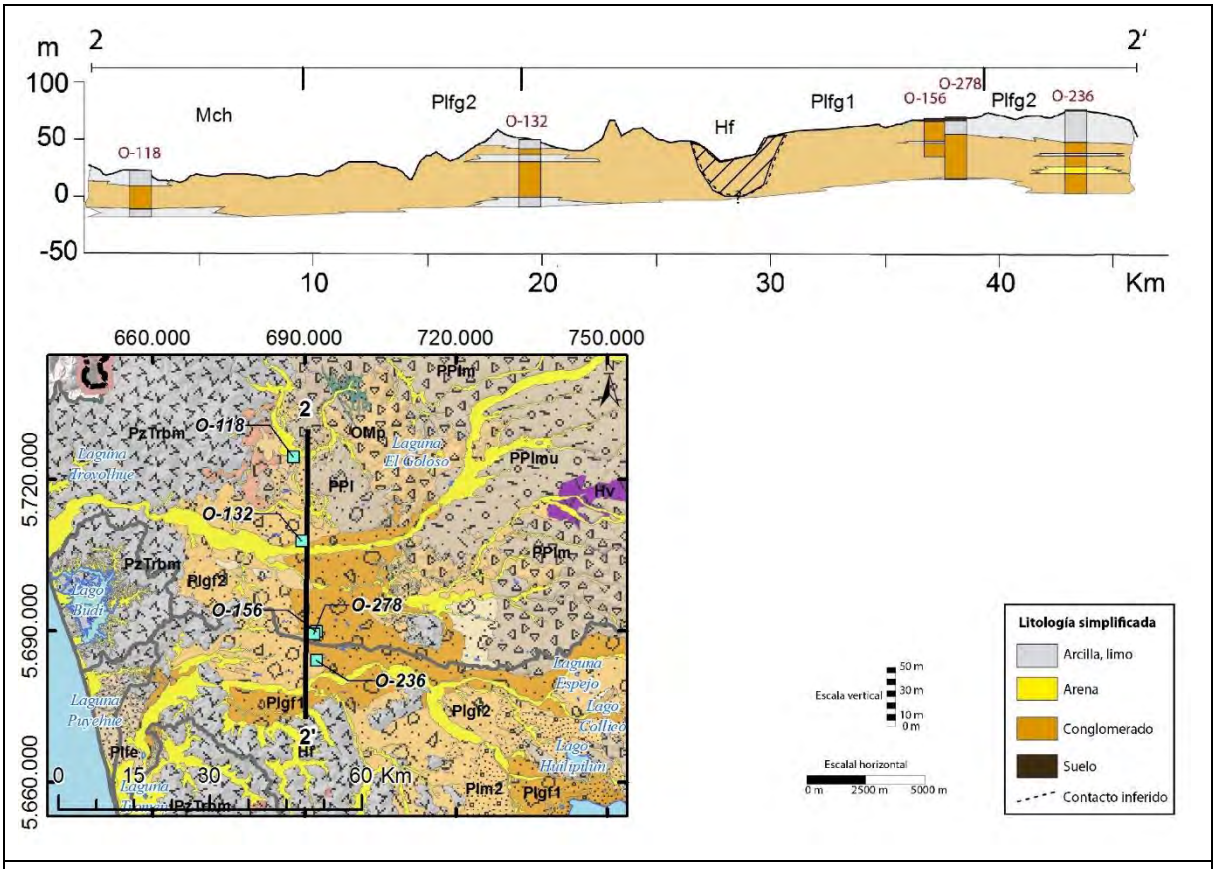


Figura 6-6: Perfil Geológico Local 2-2′ de la cuenca del río Imperial

6.4.1.2 Cuenca del Río Toltén

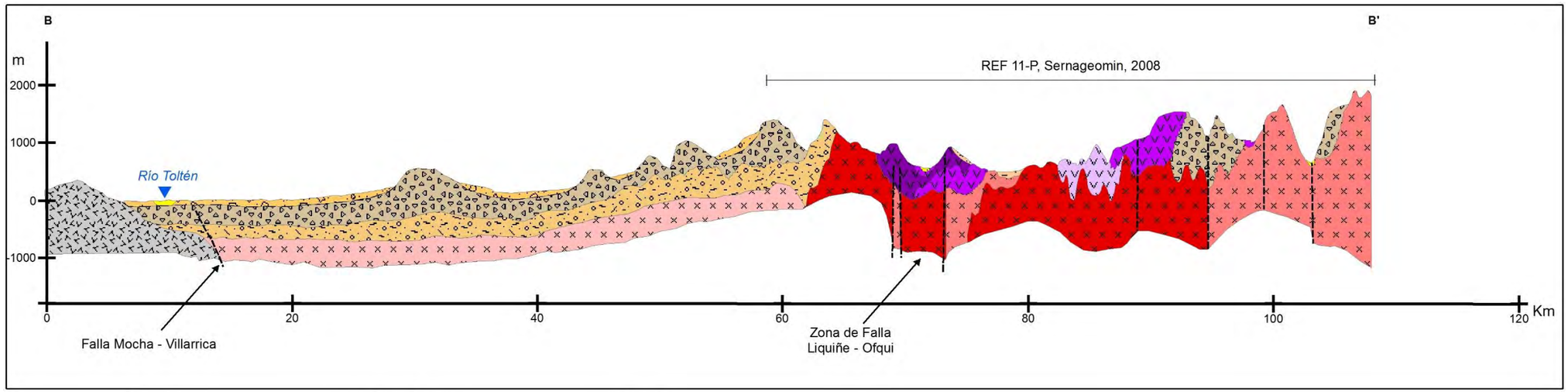
En la cuenca del río Toltén existe un volumen menor de información de subsuperficie en comparación a la cuenca del río Imperial.

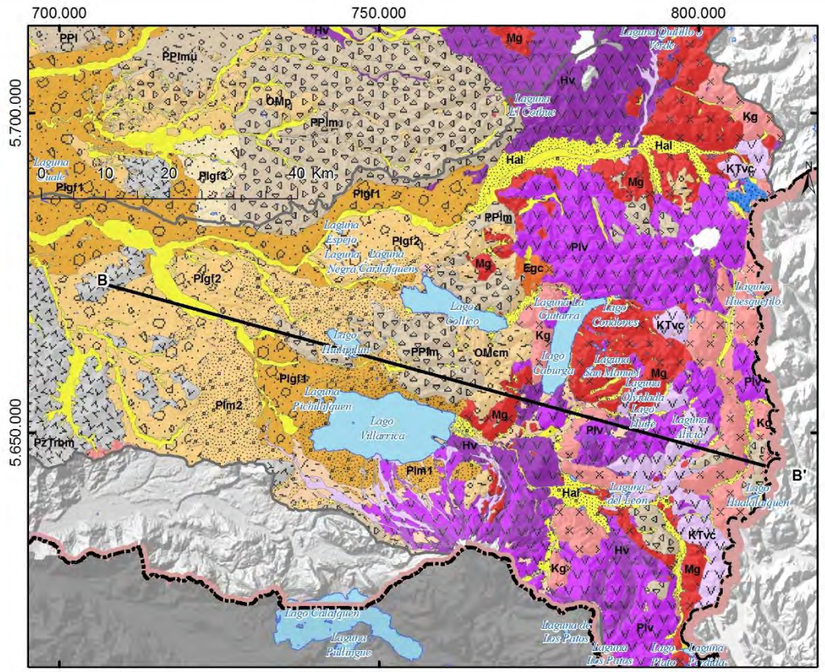
El perfil geológico de la Figura 6-7 muestra un basamento compuesto por complejos intrusivos del cretácico (Kg) y mioceno (Mg). Sobre estos cuerpos intrusivos, se deposita en discordancia de erosión, un relleno de hasta 1.000 m de espesor, correspondiente a secuencias volcanosedimentarias del Plio-Pleistoceno pertenecientes a la Formación Curarrehue o Malleco (PPlm), secuencias volcánicas de estratovolcanes del Pleistoceno Inferior − Medio (Plv) y del Holoceno (Hv). En el extremo este del perfil, se observan los depósitos volcanosedimentarios del Oligoceno − Mioceno de la Formación Curarrehue (PPlm), que son intruidos por granitoides miocenos (Mg). En la mitad oeste del perfil B-B′, depósitos de la Formación Curamallín (OMcm) se habrían depositado de forma discordante sobre el basamento intrusivo y metamórfico paleozoico (Pzg y PzTrbm). Sobre la Formación Curamallín se depositó en discordancia de erosión la Formación Malleco (PPlm) y sobre ésta los depósitos glaciofluviales (Plgf2) y fluviales (Hf) del Holoceno.

6.4.1.3 Cuencas Costeras

Según el perfil geológico C-C′ (Figura 6-8, REF 12-P, Sernageomin, 2008), al norte del río Queule, en la cuenca costera entre el río Budi y río Toltén, extremo occidental de la cuenca de Toltén y cuenca de Queule, se depositarían hasta 200 m de sedimentos holocenos de forma discordante sobre el basamento paleozoico. Este relleno estaría compuesto por arenas y limos semiconsolidados.

Por otra parte, la estratigrafía de un pozo de ENAP, ubicado en el extremo norte de la cuenca costera entre río Budi y río Toltén (al norte del perfil anteriormente descrito), indica un espesor de relleno sedimentario de 779 m. Este consiste en 196 m de sedimentos marinos del Oligoceno-Mioceno depositados en discordancia de erosión sobre el basamento metamórfico paleozoico, los que son a su vez sobreyacidos por 583 m de sedimentos de origen fluvial-costero del Plioceno.





Simbología

- Perfil
- Estructuras
- PzTrbm: Complejo Metamórfico Bahía Mansa
- Pzg: Batolito Costero del Sur
- Kg: Grupo Plutónico del Cretácico
- KTvc: Complejo Viscacha-Cumilao/Estratos de Relicura
- OMcm: Formación Curamallín
- Mg: Granitoides Carhuello
- PPlm: Formación Malleco/Curarrehue
- Plv: Lavas y rocas volcanoclásticas
- Plgf2: Depósitos glaciofluviales
- PlHdp: Depósitos piroclásticos posglaciales
- Hv: Lavas y conos de piroclastos recientes
- Hep: Depósitos de playas lacustres, eólicos y litorales
- Hf: Depósitos fluviales actuales

Figura 6-7: Perfil Geológico de la cuenca del río Toltén (REF 11-P; Sernageomin,2008)

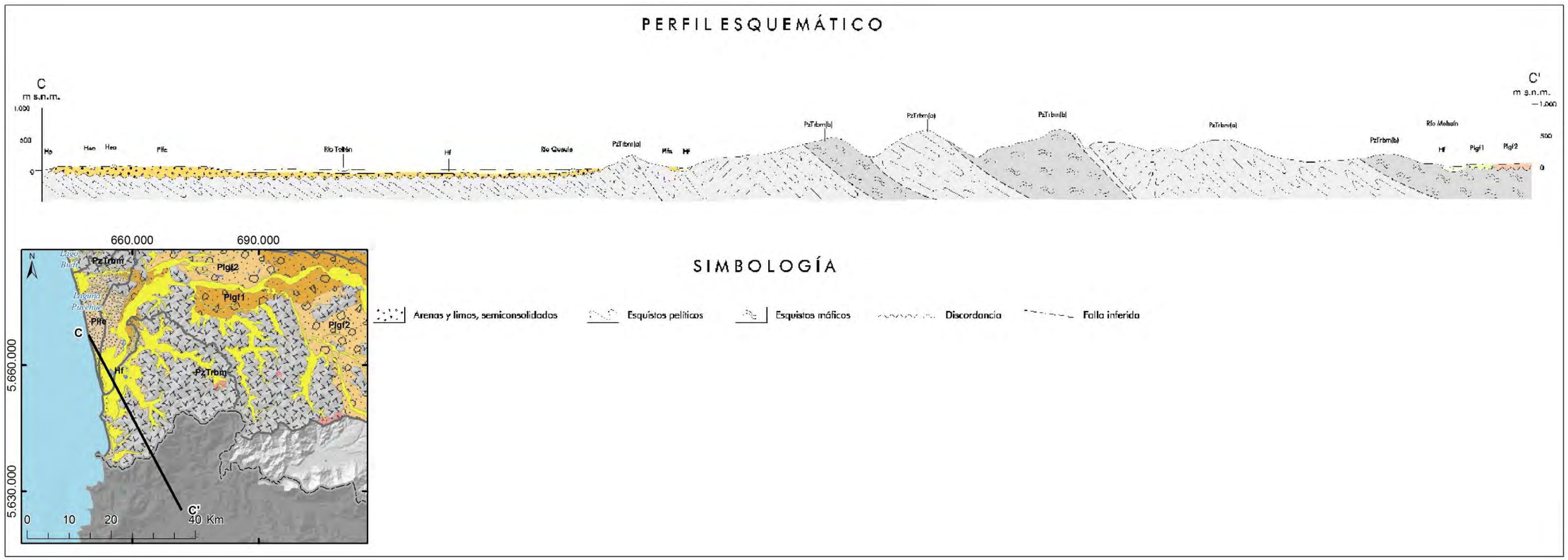


Figura 6-8: Perfil Geológico del área Queule-Toltén (modificado de REF 12-P; Sernageomin,2008)

6.4.2 Análisis Local

Se analizó la información estratigráfica de detalle de todos los pozos en toda la zona de estudio. La Figura 6-9 muestra la distribución de estos pozos en toda el área de estudio. La mayor parte de la información se obtuvo a partir de los expedientes de solicitud de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Cabe destacar que las descripciones estratigráficas de estos pozos es de pobre calidad, por lo cual, se agruparon estratos que presentaron litologías de similar granulometría. Se subdividieron en cuatro tipos granulométricos:

- Tipo A: En zonas específicas del área de estudio se reconoce una unidad superior compuesta por litologías de tipo arena fina a gruesa, ripio, grava y bolones.
- Tipo B: Este tipo se observa en general, en todo el relleno no consolidado de la zona de estudio (Figura 6-10), y está compuesto por depósitos con un alto contenido de material fino. En general se agruparon litologías de arcilla, limo y de material de grano más grueso (arenas, gravas, ripio y bolones) con un alto porcentaje de matriz fina. Generalmente, este tipo litológico aparece como la actual superficie de erosión, mientras que ocasionalmente, subyace al tipo A.
- Tipo C: Al igual que el tipo B, este tipo litológico se distribuye a lo largo de todo el relleno sedimentario del área de estudio (Figura 6-10), la mayor parte de las veces, subyaciendo al tipo B y muy ocasionalmente, se observa como la actual superficie de erosión. Se compone de litologías de tipo arena, gravas, conglomerados, ripio y bolones. En ocasiones se describe poco porcentaje de finos en la matriz.
- Tipo D: Este tipo litológico subyace al tipo C y está compuesto por litologías de grano muy fino a fino. Se describen además depósitos conformados por bolones, gravas y arenas, con un alto porcentaje de finos en su matriz. Dado que el techo de este tipo litológico es más profundo, solo se reconoce en algunos pozos de mayor profundidad.

Esta clasificación se aplica sólo a las unidades hidrogeológicas detríticas, ya que es una caracterización granulométrica. 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.

En el Anexo D.3 se incluye, entre otros, un análisis en detalle, por subcuenca, de la geología subsuperficial asociada a las unidades hidrogeológicas reconocidas localmente en cada subcuenca, mientras que el Anexo D.2 presenta la estratigrafía de los pozos analizados. El Anexo D.4, en tanto, describe las características de los pozos PPA-01, PPA-02 y PPA-04, perforados durante la realización de este estudio. Esta información podría ser de gran utilidad en el caso que se requiera construir modelos hidrogeológicos locales, o bien como fuente de información para futuros trabajos a escala local 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.

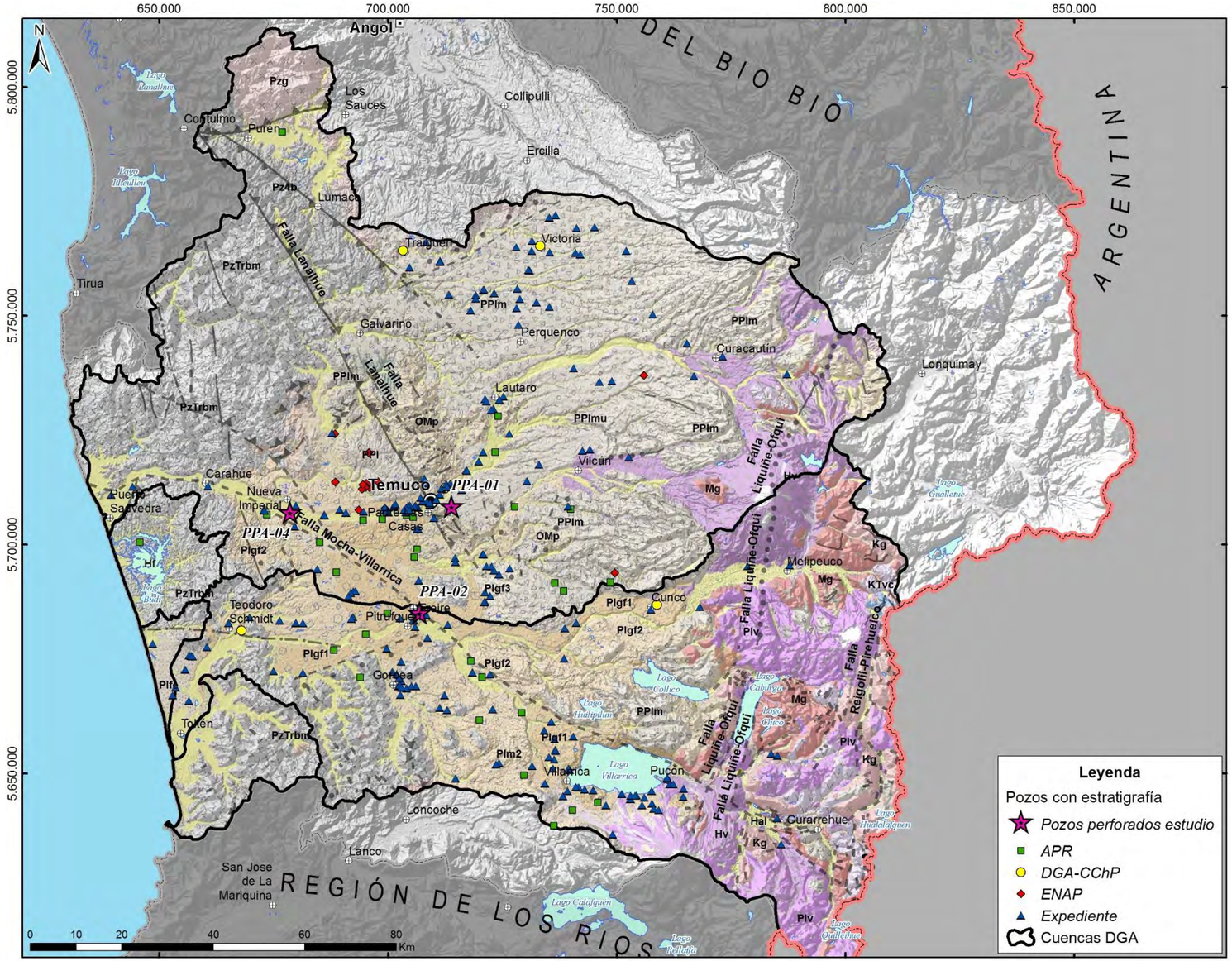


Figura 6-9: Distribución de Pozos con estratigrafía en el área de estudio

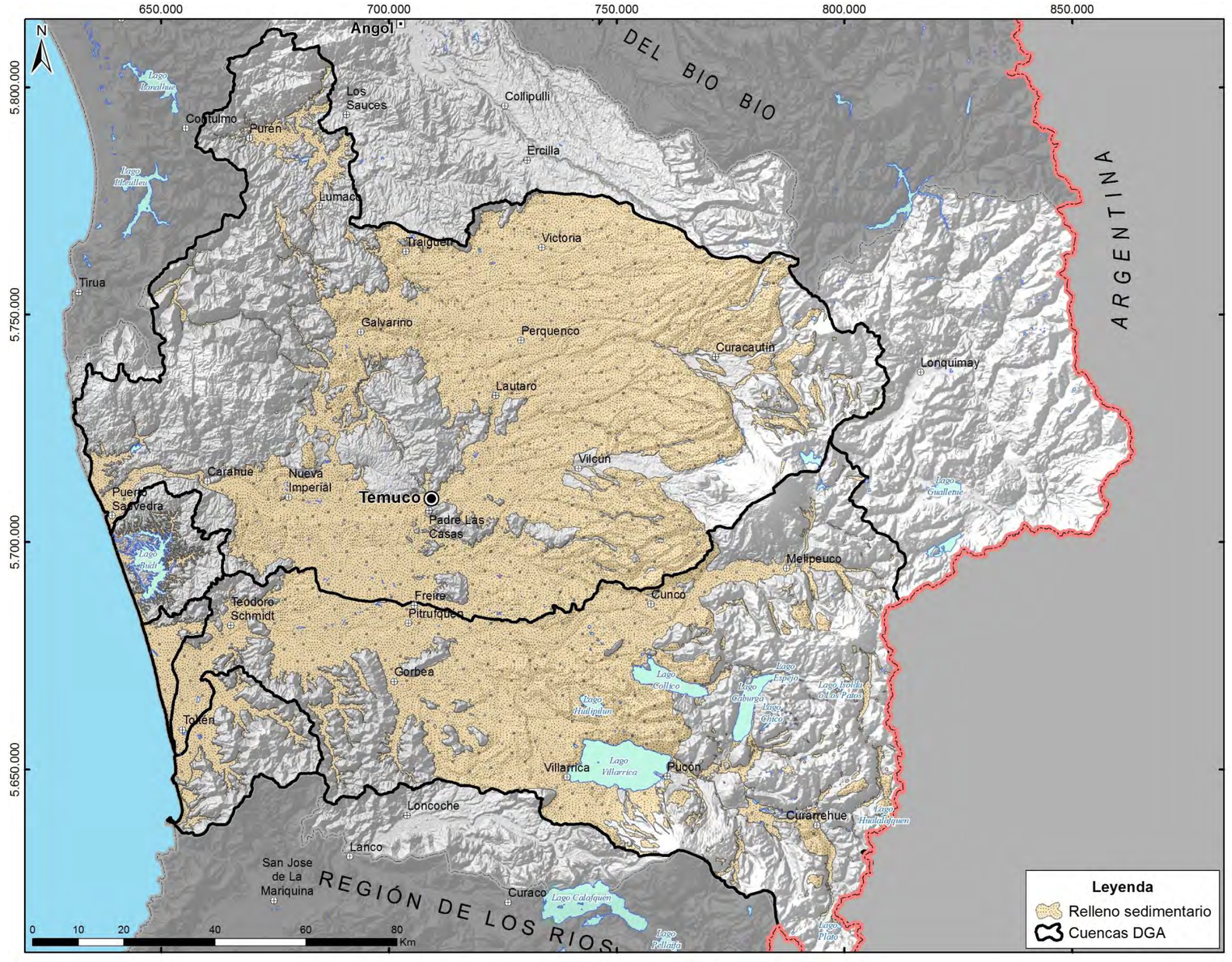


Figura 6-10: Relleno sedimentario del área de estudio

7 ESTUDIO GEOFÍSICO

El diseño de las campañas geofísicas Transiente electromagnético (TEM) y Gravimetría contempló la ejecución de 450 TEM y 680 estaciones gravimétricas, las que se presentan a continuación. En el Anexo E.1 se incluyen los informes con las interpretaciones del estudio geofísico realizado.

7.1 CAMPAÑA GRAVIMÉTRICA

La campaña de gravimetría tuvo por objetivo principal el identificar y limitar unidades geológicas en subsuperficie. El método gravimétrico hace uso de campos de potencial natural igual al método magnético. El campo del potencia natural observado se compone de las formaciones geológicas, que construyen la corteza terrestre. De esta forma, el método se basa en mediciones de gravedad, las que 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.

7.1.1 Especificaciones Técnicas

Los equipos utilizados para el levantamiento geofísico fueron un gravimétrico automático Scintrex CG.5. La posición y elevación de los puntos se determinó con un GPS de doble frecuencia Promark-500. Las especificaciones técnicas el gravímetro y GPS utilizados se presentan a continuación en la Tabla 7-1 y Tabla 7-2:

Tabla 7-1: Especificaciones Técnicas Gravímetro Scinetrex CG-5

Tipo de Sensor	Cuarzo con anulación electroestática
Resolución	1 microGal
Desviación Estándar	<5 microGal
Deriva Residual	Menos de 0.02mGal/día
Compensación en la inclinación	±200 arc seg
Correcciones Automáticas	Marea, Inclinación del instrumento, DRIFT, terreno
Temperatura de Operación	-40°C - +45°C
Dimensiones	30 x 21 x 22 cm
Peso	8Kg

Tabla 7-2: Especificaciones Técnicas Magellan GPS- Promark 500 (Base & Rover)

Características GNSS	GPS L1/L2 P-code; GLONASS L1 C/A L2 P-code; SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS)
Adquisición Tiempo Real (rms)	Horiz. 10mm + 1.0 ppm Vertical 20mm +1.0 ppm
Post-Procesado (rms)	Estático, Rapid Estático: Horizontal 5mm +0.5 ppm Vertical 10mm + 1.0 ppm
Tamaño / Peso	9″x7.4″x3.3″ / 3.1 Kg
Memoria	128 Mb Memoria Interna

7.1.2 Metodología de trabajo

El levantamiento gravimétrico consiste en determinar en cada estación el incremento (positivo o negativo) de la gravedad con respecto a un punto de referencia. La operación topográfica y la adquisición, propiamente, del dato gravimétrico, están íntimamente relacionadas, de tal manera que deben ser efectuadas con gran precisión. En este sentido, además de llevar un control de los circuitos en las estaciones base por cada jornada, se realizan repeticiones en estaciones previamente leídas durante un mismo día y también con estaciones registradas en otros días. Esto, con la finalidad de verificar la repetitividad de las lecturas y cumplir con los estándares internacionales establecidos para este tipo de estudios.

La gravimetría es una técnica pasiva donde las lecturas son exactas (con resolución del orden de los microgales) y las medidas están asociadas con los cambios relativos en el campo gravitatorio de la Tierra.

En el método gravimétrico de exploración, no se miden los valores absolutos de la gravedad en los puntos de observación, sino el valor relativo de éstos respecto a un punto considerado como base. Las mediciones que se llevan a cabo están afectadas por varios tipos de efectos, como variación temporal del campo, mareas, etc. Por eso, es fundamental efectuar diferentes correcciones antes de iniciar el proceso de modelado. Según procedimiento, a lo largo del día se deberán tener derivas menores a 0,05 mGal (50 microgales) por jornada de trabajo.

De acuerdo con Nettleton (1976), son seis las correcciones que se deben de realizar:

- Corrección por Factor de Escala del Instrumento: Esta es la constante del instrumento que proporciona el fabricante del equipo para efectuar la conversión de las lecturas del gravímetro a valores de gravedad en miligales. En el caso del CG5 esta corrección es automática.

- Corrección por Latitud: Esta corrección se basa en el incremento de la gravedad desde el Ecuador al Polo y se calcula de acuerdo con la Fórmula Internacional del Geoide. Los valores de las constantes que se presentan en esta ecuación son corregidas debido a que en los últimos años los procesos para evaluarlas se han ido modificando.

- Corrección por Elevación: Esta corrección toma en cuenta que los puntos de observación difieren normalmente en su altitud. Consiste en establecer los valores a una altitud o nivel de referencia común para todas las estaciones. Esta corrección se divide en dos partes: la corrección por aire libre y la corrección de Bouguer.

- Corrección por Aire-Libre: Se refiere al decremento vertical de la gravedad con el incremento en la elevación por encima de la superficie del terreno y también considera una variación de 0.3086 mGal/m. Se puede hacer para cualquier nivel de referencia.

- Corrección de Bouguer: Toma en cuenta el material que se encuentra entre el nivel de referencia y la altitud del punto de observación. Se supone que el material tiene forma de una placa infinita de espesor h, cuya atracción está dada por la fórmula: $g = 2\prod G\partial h$, donde ∂ es la densidad de la placa.

- Corrección por Topografía: Esta corrección se basa en la topografía (los valles como deficiencia y las montañas como excesos de masa) que altera el concepto de la placa infinita. Se hace de acuerdo con un modelo geométrico; calculando su efecto en el punto de observación y sumándolo o restándolo según sea el caso. Para esta corrección se utilizará el concepto de plantilla de Hammer y complementado con corrección de terreno cercana (50m alrededor de la estación mediada) y lejana (hasta 30-50 km).

Una vez que se han realizado las correcciones sobre los valores observados en cada estación, se construye un plano con estos valores y se hace la configuración de curvas que unen puntos de igual valor. De esta forma se obtiene el denominado Mapa de Anomalía de Bouguer, que es el resultado de la exploración gravimétrica, del cual se pueden efectuar una serie de procesos para destacar información útil. Estos procesos incluyen el separar los efectos causados por estructuras superficiales o profundas. A estos campos se les conoce como Residual y Regional, respectivamente.

7.1.3 Resultados

La campaña gravimétrica comprendió el levantamiento de infromacion en 680 estaciones, con un intervalo de separación entre 1 a 2,5 km, formando una malla de 176 x 176 km y que cubre un área aproximada de 30.976 km^2 (Figura 7-1).

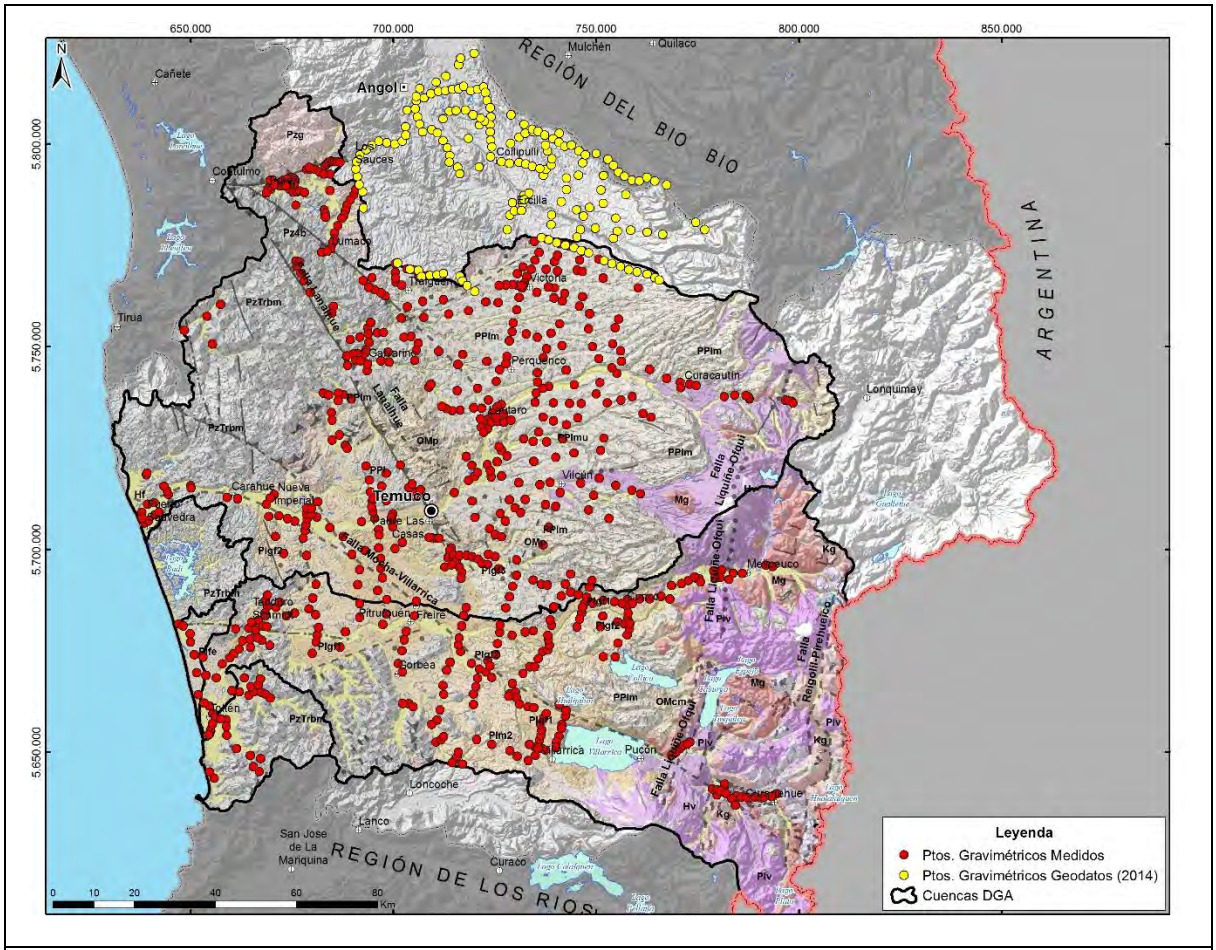


Figura 7-1: Estaciones gravimétricas utilizadas en la inversión "tipo cuenca", para la estimación de la profundidad del basamento.

La información generada fue reprocesada por Geodatos para obtener un mapa de profundidad del basamento, utilizando un modelo de inversión "tipo cuenca". La información levantada en el presente estudio fue complementada con información gravimétrica generada por Geodatos en la parte norte de la región, en la cuenca del Rio Bío-Bío ("Estudio Geofísico para el Complemento a la Modelación Hidrogeológica de La Araucanía" de Diciembre 2014), resultando en un mapa de profundidad de basamento, integrado para toda la región.

Se realizó una corrección por deriva (drift) y marea (tide) de los datos. Las correcciones Teórica (o de Latitud), Aire Libre, Bouguer y Topográfica se calcularon con el software Oasis Montaj v 8.0, de Geosoft. La gravedad Simple de Bouguer (sin corrección topográfica) usando los siguientes parámetros: Fórmula de 1967 (Sheriff) para la corrección Teórica, 0.308596 mGal/m (Oasis) para la de Aire Libre y densidad terrestre de 2.67 gr/cc para la de Bouguer. El efecto Topográfico se calculó para toda el área integrada obteniéndose valores razonables (diferencia entre extremos de 11.211 mGal).

Las gravedades de Bouguer del sector Norte (Geodatos, 2014) fueron ajustadas a las del sector Sur (este trabajo) mediante la diferencia de las grillas de Bouguer Total en el área de intersección de datos.

Se tomaron muestras de roca para medición de su densidad en distintas zonas de la región (Anexo E.2); sin embargo, dada la complejidad para la interpretación de los datos levantadaos considerando distintas densidades de roca, se acordó 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 interfaz sedimentos/basamento (o profundidad del techo del basamento o espesor de sedimentos) se calculó mediante un programa computacional construido en Geodatos, el cual calcula iterativamente una grilla de Profundidad del Basamento a partir de una grilla de Anomalía Residual de Gravedad.

La unidad sedimentaria se simula por un arreglo de prismas verticales de sección horizontal cuadrada, de ancho igual al paso de la grilla de gravedad. La longitud vertical (variable) de cada prisma es la profundidad del basamento en cada nodo de la grilla gravimétrica. El paso de esta grilla se fijó en el presente caso en 2000 m, que es una representación adecuada de la densidad promedio de los datos en el área de estudio.

La profundidad calculada del basamento debe ajustarse, dentro de cierta tolerancia, a la profundidad en los puntos de control. Para esto se varió en forma gradual el Regional y, por consiguiente el Residual. Estas variaciones del Regional se pueden interpretar como un efecto de la diferencia de la densidad según el sector (tipo de basamento y/o tipo preponderante de sedimentos).

El procedimiento se inició descontando a la gravedad de Bouguer total una superficie de primer orden, que representa una primera aproximación a la gravedad regional, y restando una constante de manera que la gravedad residual sea negativa en todo lugar (para que la profundidad sea positiva). Luego se usaron los puntos de control, correspondientes a los Pozos Enap y a un conjunto seleccionado de estaciones gravimétricas con afloramientos del Basamento, para comparar las profundidades calculadas y variar el Regional (y por lo tanto el Residual) de manera de ajustar estas profundidades.

La Figura 7-2 presenta los mapas de Profundidad y Elevación del Basamento, resultantes del procedimiento de inversión aplicado (para más detalle, ver Anexo E.1). La elevación corresponde a la topografía SRTM menos la profundidad.

Se observan profundidades de hasta 2700 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 7-2) son sólo una interpolación numérica, pero que ayudan a dar continuidad a la información y a visualizar el conjunto. Del mismo modo, el resultado de las interpolaciones realizadas son 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.

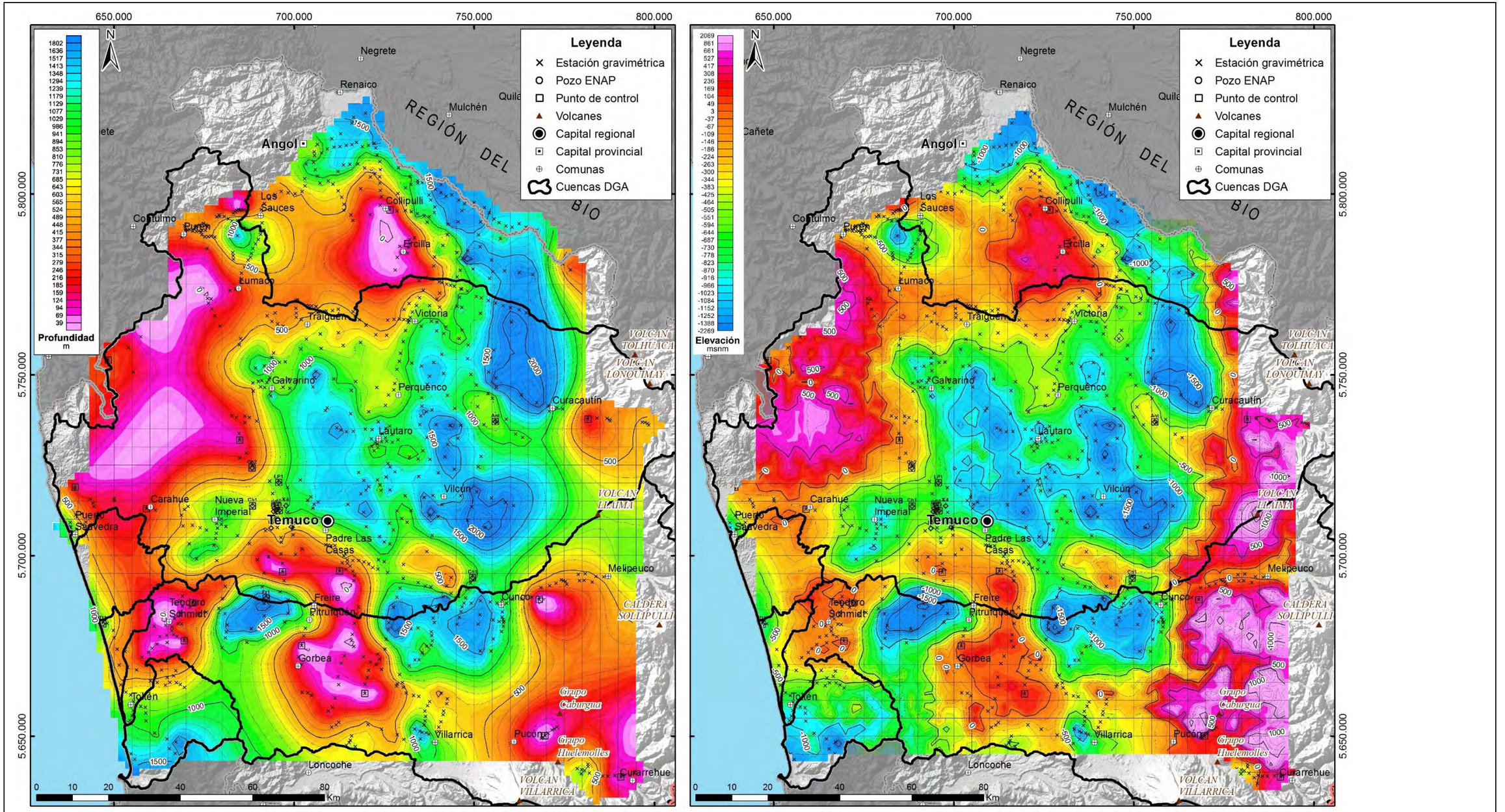


Figura 7-2: Mapas de profundidad y elevación de basamento

7.2 CAMPAÑA TEM

La campaña TEM tiene como objetivo caracterizar geoeléctricamente el subsuelo, identificando zonas saturadas o drenadas (secas), tipos de relleno y eventualmente, zonas de debilidad estructural o fallas. Las secciones TEM permitirán 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.

7.2.1 Metodología de trabajo

El principio del método TEM consiste en hacer circular una corriente por una bobina transmisora o loop (Tx) que genera un campo magnético primario estable en el subsuelo. Cuando se interrumpe de forma instantánea (y por tanto cesa el campo magnético primario), el campo electromagnético inducido en el subsuelo causa corrientes parásitas (EMF), que se propagan a través de éste. Como consecuencia de pérdidas de resistencia calórica estas corrientes disminuyen con el tiempo, provocando un campo magnético secundario decreciente en la superficie. Utilizando una bobina receptora (Rx) se mide la evolución temporal de la velocidad de decaimiento del campo secundario, la cual puede relacionarse con la resistividad del subsuelo.

Esta técnica requiere una "calibración" directa con pozos, para la correlación de unidades geoeléctricas identificadas con la estratigrafía local y la ubicación del nivel freático y zonas saturadas. De esta forma se pueden realizar analogías de las respuestas de isoconductividad del subsuelo con las características geológicas e hidrogeológicas del mismo.

La resolución de los TEM, bajo condiciones ideales, entrega un alto grado de precisión entre los 50 y 300 m de profundidad, sin embargo, esto dependerá entre otras cosas, del tamaño del loop utilizado, permitiendo caracterizar de mejor forma las zonas más someras utilizando un loop reducido. Como norma general, la profundidad de penetración del equipo es aproximadamente la mitad a dos tercios del perímetro de la espira, así una estación con un loop de 100x100 m alcanzará una profundidad de investigación de entre 200 a 300 m, la cual dependerá principalmente de la respuesta geoeléctrica del terreno y las frecuencias utilizadas en la medición.

7.2.2 Resultados

La exploración TEM consistió en la medición de 466 estaciones de forma inicial. De éstos (medidos por Compañía Chilena de Perforaciones), 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 con 15 estaciones medidas por Geodatos con loop de 200x200 m (Anexo E.4). Al igual que la información gravimétrica, la información TEM fue reprocesada íntegramente por Geodatos.

La Figura 7-3 (y en Anexo E.3) muestra la distribución de las estaciones TEM levantadas en terreno y los perfiles representativos que se muestran a continuación en el capítulo 9. 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 apreciar el reconocimiento de más 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 9 se analizará cada perfil TEM, comparándolo con la geometría obtenida de las unidades geológicas o hidrogeológicas .

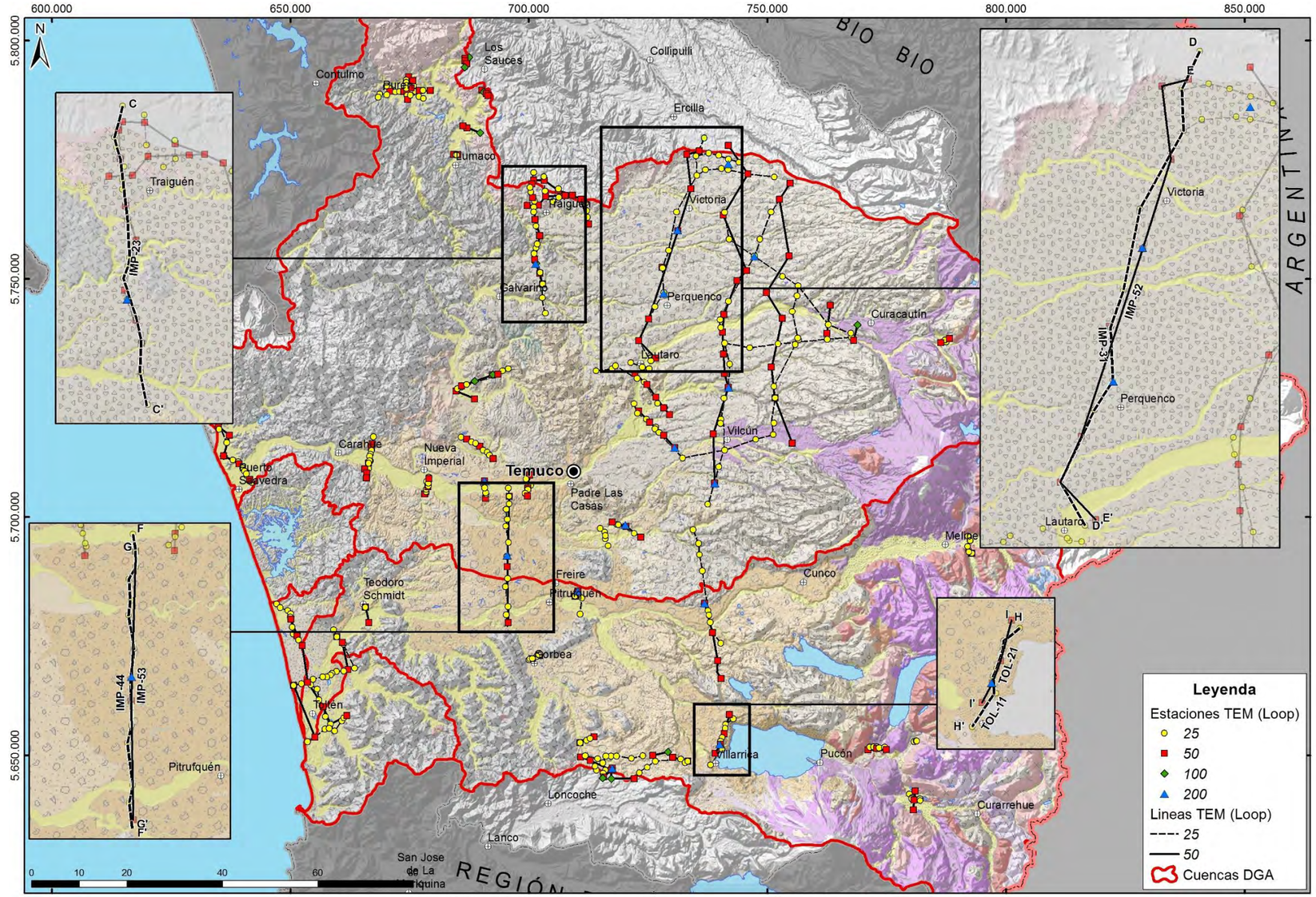


Figura 7-3: Ubicación de estaciones TEM levantadas en terreno y perfiles representativos interpretados

8 HIDROQUÍMICA

El muestreo y análisis hidroquímico del estudio se enfoca en la caracterización de los distintos sistemas acuíferos que conforman las cuencas de los ríos Toltén e Imperial y las cuencas costeras de la región de La Araucanía, de forma tal que la información recopilada permita dar sustento cabal al modelo hidrogeológico conceptual que se desarrolla para este estudio.

De acuerdo a lo anterior, los siguientes objetivos específicos del estudio son atingentes al muestreo hidroquímico de aguas naturales:

- Conocer el funcionamiento de los acuíferos. El estudio considera la confección de modelos conceptuales y numéricos del funcionamiento de los acuíferos de ambas cuencas, con el objetivo de poder describir el funcionamiento de los sistemas.
- Apoyar y complementar el modelo conceptual hidrogeológico que se encuentra bajo desarrollo para las cuencas de los ríos Imperial y Toltén y cuencas costeras intermedias.
- Caracterizar la calidad de las aguas subterráneas. En especial, interesa establecer la calidad basal y grado de conexión entre las aguas superficiales y subterráneas.

En este contexto, se presentan en este capítulo los principales resultados obtenidos en las cuatro campañas de muestreo, elaborando con ellos una caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas de la región de La Araucanía.

La metodología utilizada consiste en la recopilación de antecedentes, toma de muestras en terreno y análisis de gabinete.

Los análisis químicos y microbiológicos fueron realizados por el laboratorio Hidrolab. El análisis de Cl en precipitaciones fue realizado por el laboratorio ALS Global (Santiago) con cromatografía iónica para que el límite de detección fuera suficientemente bajo (0,2 mg/l versus 0,5 mg/l con el método tradicional).

Las muestras para análisis isotópicos se enviaron al laboratorio IT2 Isotopes de Waterloo, Canadá.

El manejo de datos se realiza con el software AquaChem para luego integrar toda la información generada con los antecedentes considerados, y contribuir finalmente con el análisis hidroquímico a la confección del modelo conceptual y caracterizar la calidad de las aguas. El detalle de los datos hidroquímicos se adjuntan en los Anexos F.1 a F.4.

8.1 CAMPAÑAS DE TERRENO

Se realizaron cuatro campañas de terreno, durante el año 2014 y parte del año 2015, con el objetivo de cubrir un ciclo hidrológico anual (Figura 8-1).

Entre los tipos de puntos de muestreo se distinguen aguas superficiales, subterráneas y precipitaciones. Los puntos de muestreo de aguas subterráneas fueron divididos según la profundidad del pozo, identificando como pozos someros a los que tienen menos de 20 m de profundidad y pozos profundos a los que tienen menos de 20 m de profundidad. Sin embargo, dentro del grupo de los pozos profundos, se subdividió en pozos con

profundidad entre 20 y 50 m y los mayor a 50 m, con el objeto de observar si existe alguna diferencia en la calidad química de las aguas según su profundidad de captación.

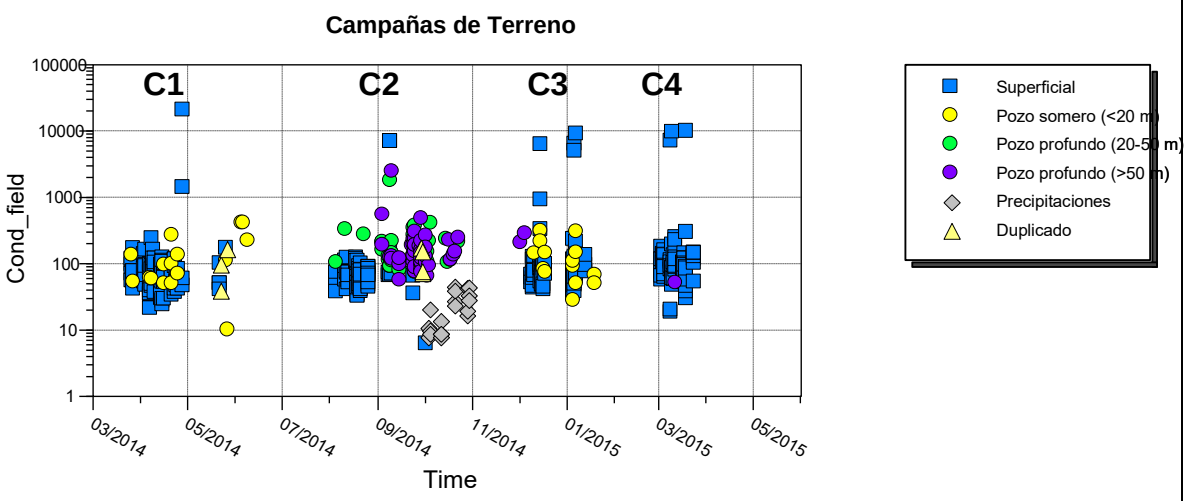


Figura 8-1: Distribución temporal de las campañas de terreno.

Los análisis realizados en los distintos puntos corresponden a datos hidroquímicos e isotópicos y las muestras fueron tomadas siguiendo el protocolo de muestreo confeccionado para este proyecto que se incluye como Anexo F.1. Al inicio de las dos primeras campañas se realizaron inducciones en la ciudad de Temuco para transmitir al equipo de terreno los términos establecidos por el protocolo para la toma de muestras superficiales y de pozos.

Se utilizan los mismos puntos de muestreo de aguas superficiales en las cuatro campañas. Los pozos someros de la campaña 1 se vuelven a muestrear en la campaña 3 siempre que sea posible. Los pozos profundos sólo se muestrean en la campaña 2.

En la Tabla 8-1 se presenta el nº de muestras tomada 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, Cl e isótopos durante las cuatro campañas de muestreo.

En la Figura 8-2 y Anexos F.2 y F.3 se presentan las muestras hidroquímicas 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.

Las muestras de isótopos tomadas en aguas superficiales son 74 y su ubicación se señala en la Figura 8-3. En pozos someros no se tomaron muestras de isótopos y en pozos profundos se tomaron en 43 puntos de muestreo. Además se tomaron muestras de isótopos en las 19 estaciones de precipitaciones.

Todos los resultados e informes enviados por el laboratorio se muestran en el Anexo F.3, mientras que una tabla que muestra todos los resultados de laboratorio de las distintas campañas se encuentran en el Anexo F.4.

Tabla 8-1: 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
Total por campaña	HQ	117	180	106	90	493
	isótopos	0	94	0	42	136
	Cl	0	19	0	0	19

8.1.1 Campaña 1

La campaña 1 se realizó entre el 26 de marzo y el 9 de junio de 2014, concentrándose la mayoría de las fechas de muestreo en abril del 2014. Se obtuvieron 98 muestras de aguas superficiales y 16 de pozos someros. Además se tomaron tres duplicados. No incluye muestreo isotópico.

8.1.2 Campaña 2

La campaña 2 comenzó el 5 de agosto y terminó el 29 de octubre de 2014, excluyendo a los pozos PPA-02 y PPA-01 que fueron muestreados el 2 y el 5 de diciembre respectivamente. Se tomaron 90 muestras de aguas superficiales, 32 de ellas con datos isotópicos y 86 muestras de pozos profundos incluyendo isótopos en 43 de ellos. Se instalaron colectores de precipitaciones en 19 localidades para medir concentración de Cl e isótopos. Además se muestrearon cuatro duplicados.

8.1.3 Campaña 3

La campaña 3 se desarrolló entre el 9 de diciembre de 2014 y el 19 de enero de 2015. Se obtuvieron 91 muestras de aguas superficiales y 15 de pozos someros. No considera análisis isotópico.

8.1.4 Campaña 4

La campaña 4 tuvo lugar entre el 3 y el 24 de marzo de 2015 y consistió en 90 muestras de aguas superficiales con 42 de isótopos.

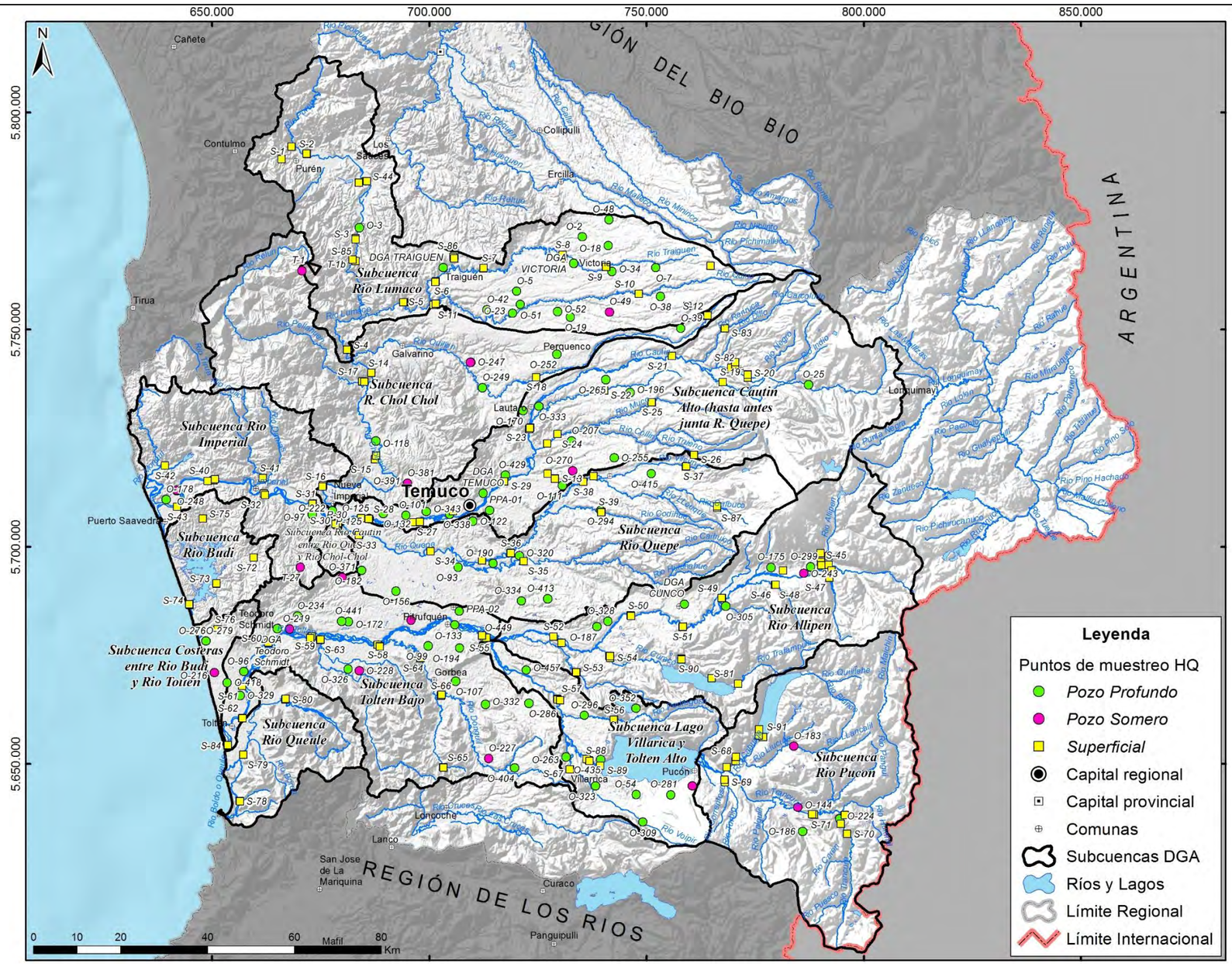


Figura 8-2: Mapa con puntos de muestreo hidroquímico.

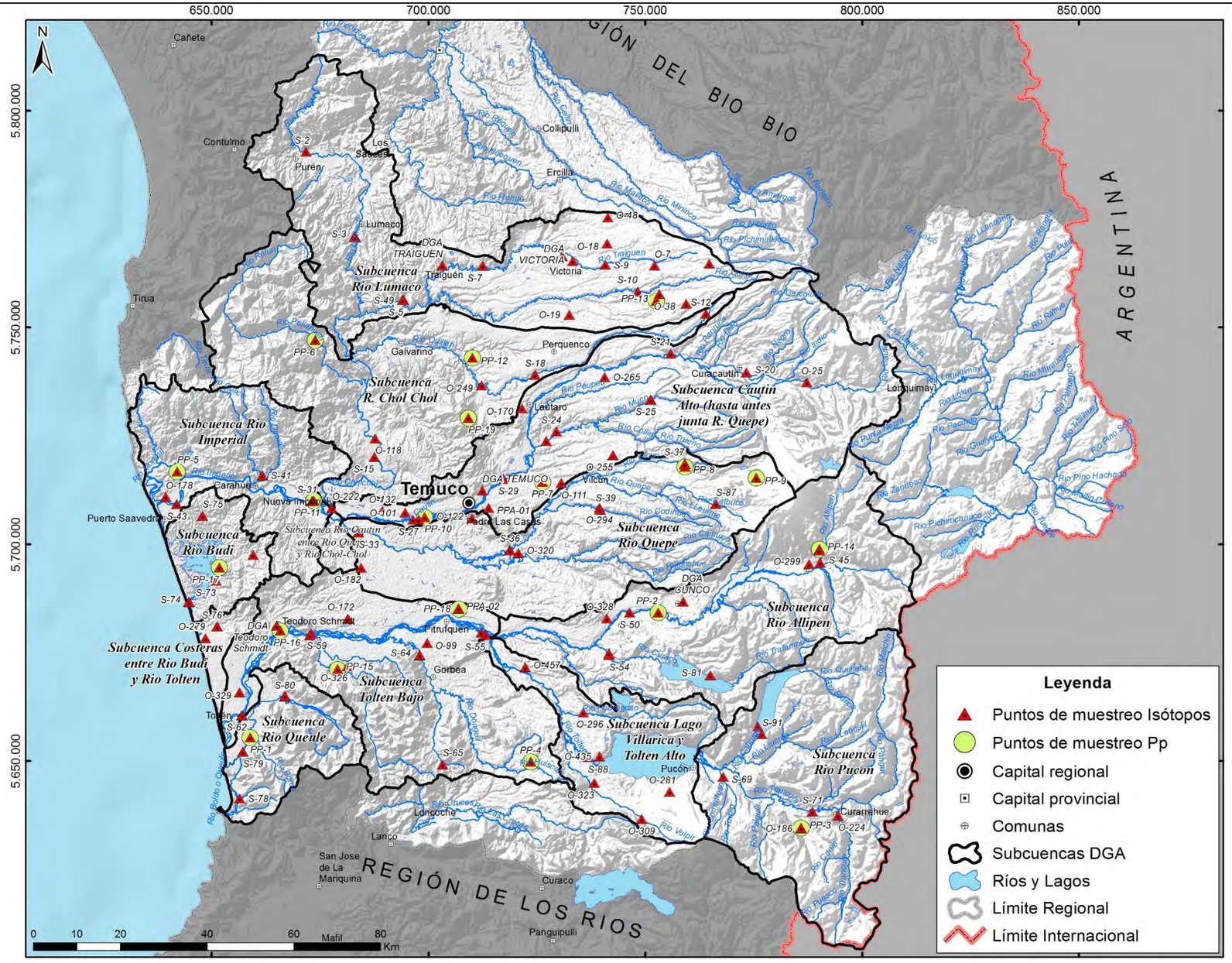


Figura 8-3: Mapa con puntos de muestreo isotópico.

8.2 VALIDACIÓN DE DATOS HIDROQUÍMICOS

Los datos hidroquímicos están sujetos a incertidumbre e imprecisiones asociadas tanto al muestreo como a los análisis de laboratorio (SEA, 2012), por lo que con el objetivo de evaluar la calidad de los resultados de los análisis químicos se ha validado la información entregada por el laboratorio. El criterio utilizado para la validación consiste en el error de balance iónico.

El error de balance iónico verifica que la suma de miliequivalentes de cationes sea igual a la suma de miliequivalentes de aniones (principio de electroneutralidad del agua). Esta relación se expresa como un error (Custodio & Llamas, 1983).

$$\sum cationes\ [meq/L] = \sum aniones\ [meq/L]$$

$$\text{error}\ (\%)\ = 100 \times \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}$$

Para calcular este error es necesario contar con el análisis de todos los iones mayoritarios, es decir aquéllos que representan casi la totalidad de los iones. Se presentan como aniones mayoritarios cloruro, sulfato y bicarbonato y como cationes mayoritarios sodio, calcio y magnesio (en algunos casos también nitrato y potasio). Se consideró un error admisible del 10%, y en casos particulares hasta un 20%.

En la Figura 8-4 se presenta el error de balance iónico calculado por AquaChem. Este programa considera los aniones y cationes mayoritarios y minoritarios para determinar si el análisis cumple con el principio de electro neutralidad.

Algunas muestras fueron descartadas por no cumplir apropiadamente con el protocolo de muestreo y presentar resultados anómalos.

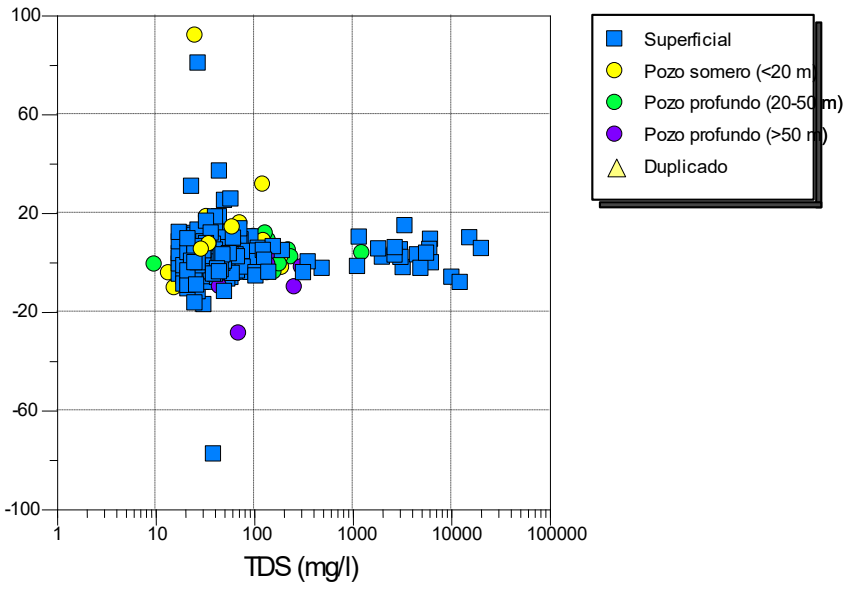


Figura 8-4: Error de balance iónico en relación a la C.E.

Como se menciona en el programa además se considera la inclusión de un 2,5% de muestras duplicadas en las campañas 1 y 2 con el objetivo de garantizar y validar la calidad de los análisis de laboratorio. Según este criterio se tomaron tres duplicados en la campaña 1 y cuatro duplicados en la campaña 2. Los resultados del análisis químico de las muestras duplicadas son similares a los de las muestras originales, al compararlas mediante los diagramas de Schoeller de la Figura 8-5 para la campaña 1 y de la Figura 8-6 para la campaña 2.

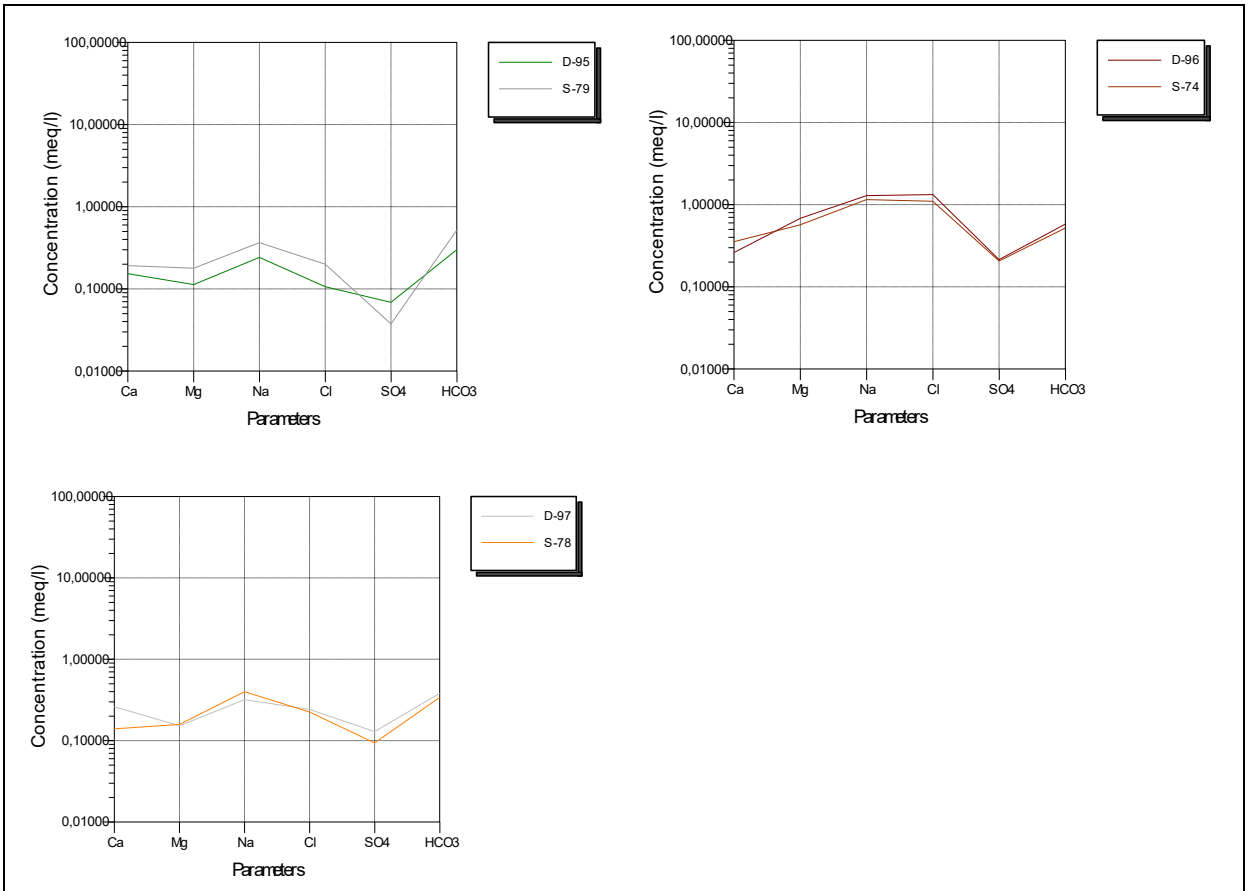


Figura 8-5: Diagramas de Schoeller para muestras duplicadas de campaña 1.

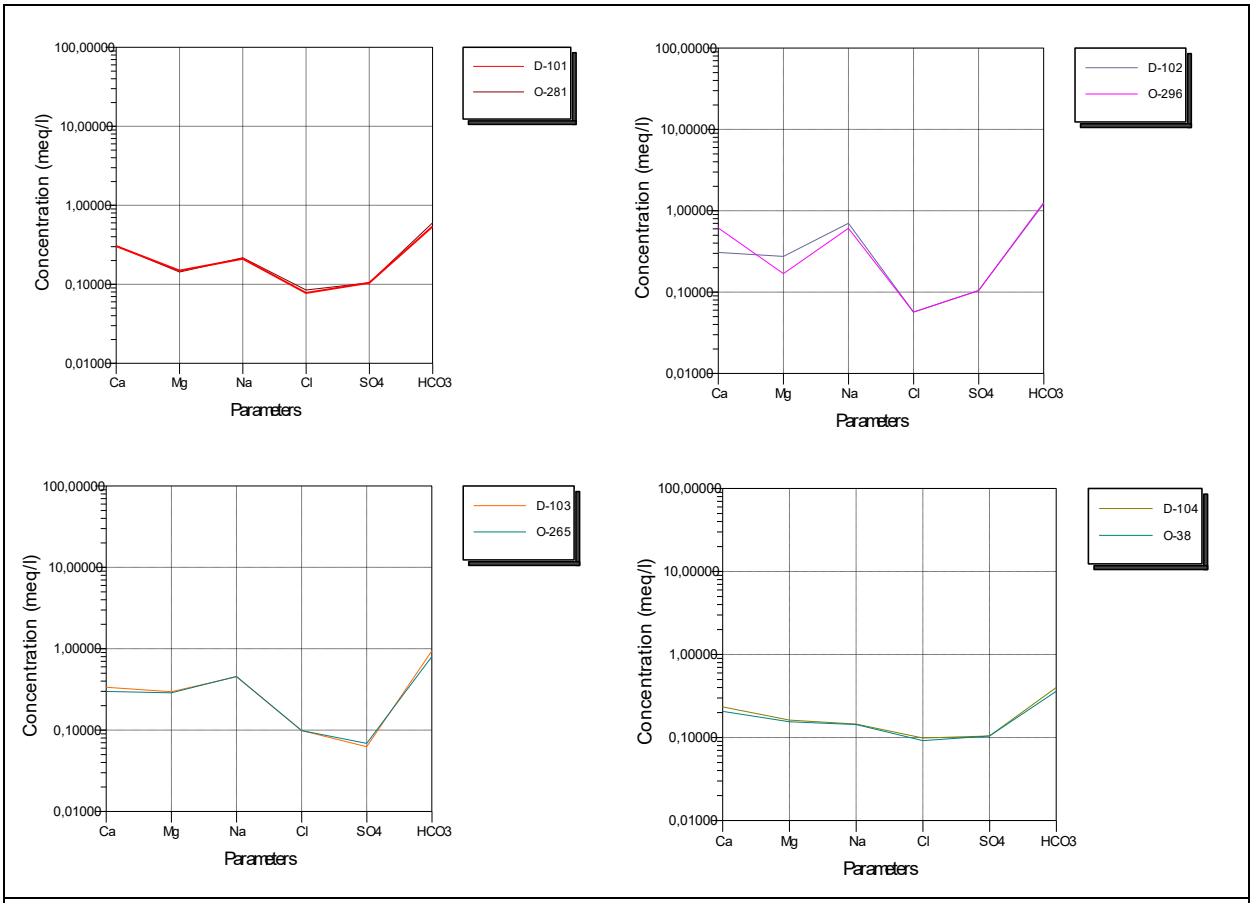


Figura 8-6: Diagramas de Schoeller para muestras duplicadas de campaña 2.

A los resultados de analitos cuya concentración es inferior al límite de detección (L.D.) se les ha asignado un valor que corresponde a la mitad del valor del L.D (por ejemplo si el L.D. es <1 mg/l se le asigna arbitrariamente una concentración de 0,5 mg/l).

La nomenclatura utilizada consiste en una letra "S" para puntos de muestreo superficiales, en el caso de los pozos se distinguen con una "O" los que cuentan con derechos otorgados y con una "T" los que están en trámite de aprobación. En el caso de las precipitaciones se utilizan las letras "PP" y para los duplicados una "D". A continuación se escribe el nº de punto de muestreo y finalmente se indica el nº de la campaña a la que pertenece la muestra.

En algunos casos particulares las muestras fueron rotuladas con un nombre distinto del que correspondía por lo que en la tabla resumen se indica en una columna el nombre original de la muestra y en otra columna el nombre corregido.

La mayoría de los análisis químicos cumplen el criterio de validación del 10% de error, con algunas excepciones que no superan el 20% por lo que fueron igualmente considerados. Sin embargo se excluyeron de la caracterización hidroquímica las muestras de los pozos O-178-2 y O-54-2 por considerarse datos anómalos producto de las malas condiciones en que se encontraban los pozos. También se excluyó la muestra superficial S-85-4 por corresponder a un punto de muestreo con estancamiento de aguas que no sería representativo.

8.2.1 Diagramas hidroquímicos

La composición de las aguas se representa mediante los diagramas de Piper y Schoeller. Con el diagrama de Piper se obtiene una visión de la composición de las aguas, sin tener en cuenta su grado de salinización. Permite representar un número ilimitado de muestras en un mismo gráfico lo que, a nivel regional, proporciona una visión global de las distintas composiciones de agua existentes. Las proporciones relativas de cationes y aniones son representadas en dos diagramas triangulares, y proyectadas en un diagrama en forma de rombo que muestra la relación entre los aniones y cationes en conjunto (Figura 8-7). Cada muestra está representada con un mismo símbolo en cada uno de los diagramas.

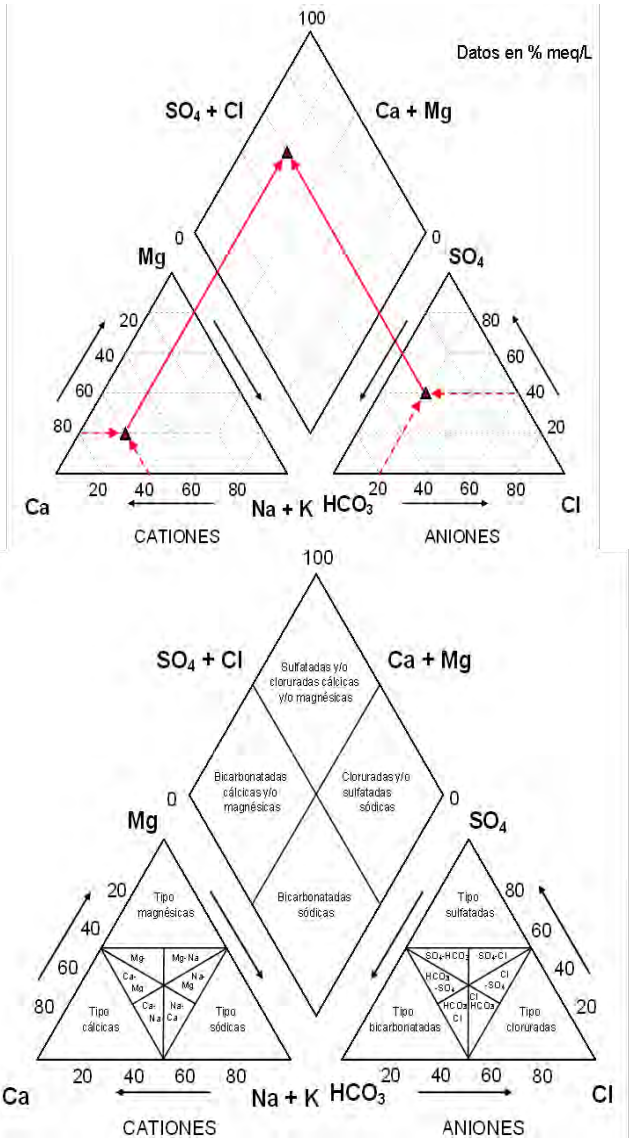


Figura 8-7: Representación gráfica de la concentración relativa de iones en un diagrama de Piper (modificado de Custodio y Llamas, 1983).

Así, los tres símbolos en el diagrama, uno en cada triangulo y otro en el rombo, indican la concentración relativa de los iones disueltos mayoritarios constituyentes del agua natural y esto determina la denominación de un agua en cuanto a su composición.

La representación espacial de las muestras se presenta mediante diagramas de Stiff. Estos diagramas consisten en cuatro rectas paralelas y equidistantes, cada una dividida en dos segmentos por una perpendicular. La longitud de cada segmento es proporcional a la concentración en meq/L de un determinado ion. En aguas subterráneas es común representar los Stiff modificados que consisten en tres rectas divididas en seis segmentos. Los segmentos situados a la izquierda representan (de abajo hacia arriba), la concentración en Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^{+}, y los de la derecha, la concentración en HCO_3^{-}, SO_4^{-2} y Cl^{-} (Figura 8-8).

Estos diagramas se utilizan frecuentemente para ser representados en mapas, siendo un buen método para caracterizar la variación hidrogeoquímica espacial de la composición de las aguas subterráneas. En este sentido es posible complementar la información hidrogeológica e identificar posible origen de las aguas, sectores de recarga y zonas geográficas de mezcla de distintos tipos de aguas.

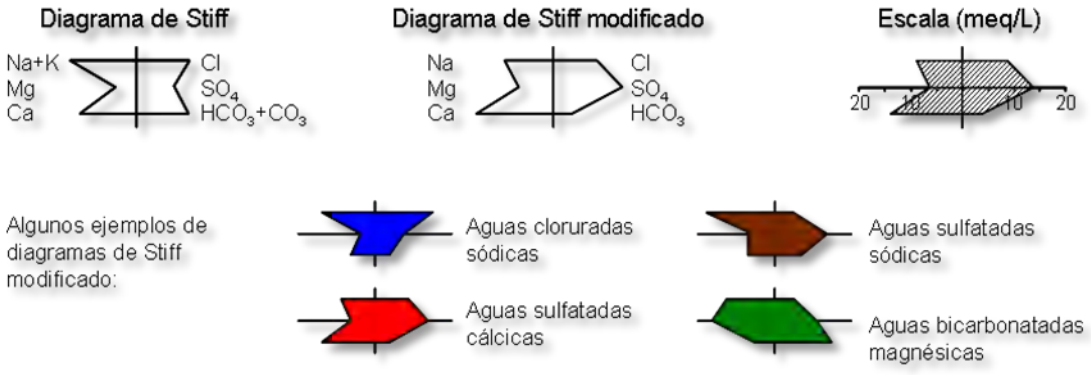


Figura 8-8: Ejemplos de concentraciones químicas según diagramas de Stiff y Stiff modificado

8.3 ANÁLISIS HIDROQUÍMICO AGUAS SUPERFICIALES

8.3.1 Parámetros físico químicos

Se presentan mediciones de pH y sólidos disueltos totales (TDS) o conductividad eléctrica (CE) para clasificar las muestras de aguas en ácidas, neutras o básicas y determinar su nivel de salinidad.

Las aguas superficiales (Figura 8-9) se clasifican mayoritariamente como aguas frescas (TDS <1.000 mg/l) y tienen un pH variable entre 6 y 8 principalmente, mínimo 5,6 (DGA CUNCO) y máximo 9,42 (S-25-2), con un pH promedio de 7,0. La mayoría de las aguas frescas son de pH neutro con pequeños grupos de tendencia alcalina (entre 8 y 9). Las aguas salobres a saladas también tienen un pH cercano a 7 pero la mayoría se ubica entre un pH de 6,5 y 8.

Las muestras de precipitaciones cuentan con datos de pH y CE tomados in situ (Figura 8-10) que indican que corresponden a aguas frescas con un pH muy variable entre 5,5 y 9,5. El pH promedio es de 7,4.

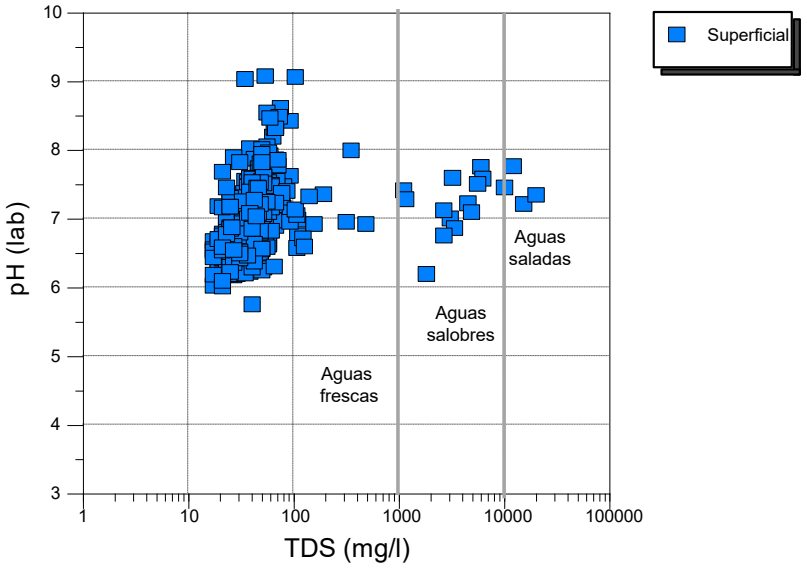


Figura 8-9: Relación pH y TDS en muestras de aguas superficiales.

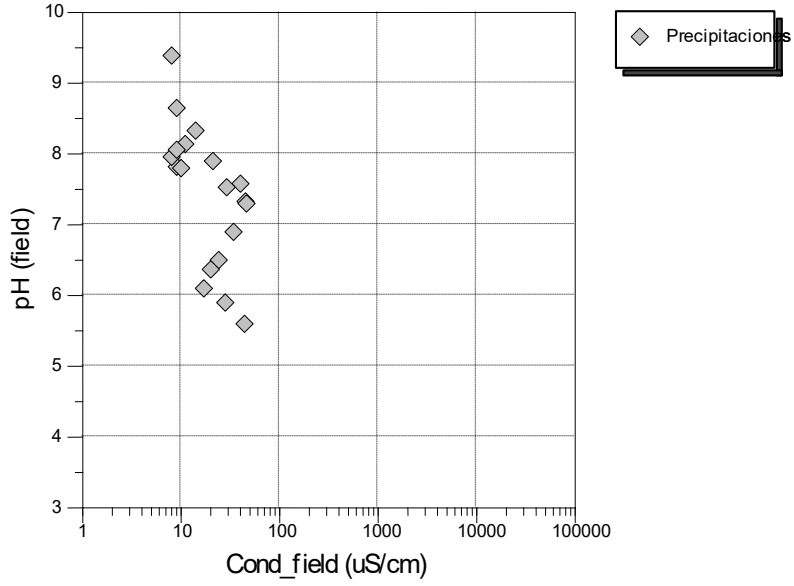


Figura 8-10: Relación pH y CE in situ para muestras de precipitaciones.

8.3.2 Caracterización composicional (diagramas de Piper)

La composición de las aguas se representa mediante los diagramas de Piper. En el diagrama de Piper para las aguas superficiales (Figura 8-11) se observa que el anión predominante es el HCO_3^- con proporciones variables de Cl^-. El SO_4^- se presenta en pequeñas proporciones. En el triángulo de los cationes la mayoría de las muestras son intermedias cálcico sódicas, mientras que otro grupo tiene tendencia sódica. El Mg se presenta en una proporción muy baja. Según el rombo de facies hidroquímicas las aguas superficiales son principalmente bicarbonatadas intermedias y una cantidad menor de muestras corresponden a la facies clorurada sódica.

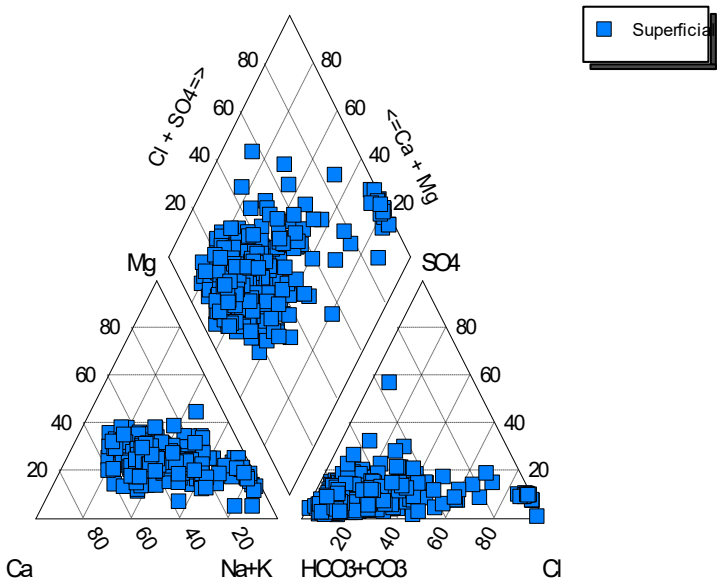


Figura 8-11: Diagrama de Piper para aguas superficiales.

Como se había señalado en la clasificación composicional, las aguas superficiales corresponden principalmente a aguas frescas bicarbonatadas cálcico- sódicas. Generalmente en las cuencas costeras y del río Budi se identifican algunas muestras de mayor salinidad (salobres) de composición clorurada sódica.

En la campaña 1 (desarrollada mayoritariamente en otoño), las muestras de la cuenca del río Imperial corresponden a aguas frescas bicarbonatadas Na-Ca. En la subcuenca del río Lumaco, las aguas de los ríos Traiguén y Quino son similares, destacando la muestra S-9 por presentar mayor concentración de iones, no obstante en el diagrama de Piper (Figura 8-12) es posible ver su similitud composicional con las demás muestras del sector. Las muestras S-42 (río Moncul), S-43 y en menor medida S-40 de la subcuenca del río Imperial tienen una composición particularmente Cl- Na. En el mapa de la Figura 8-25 se aprecia su cercanía al sector costero, cuya influencia favorece el aumento de los iones Na y Cl.

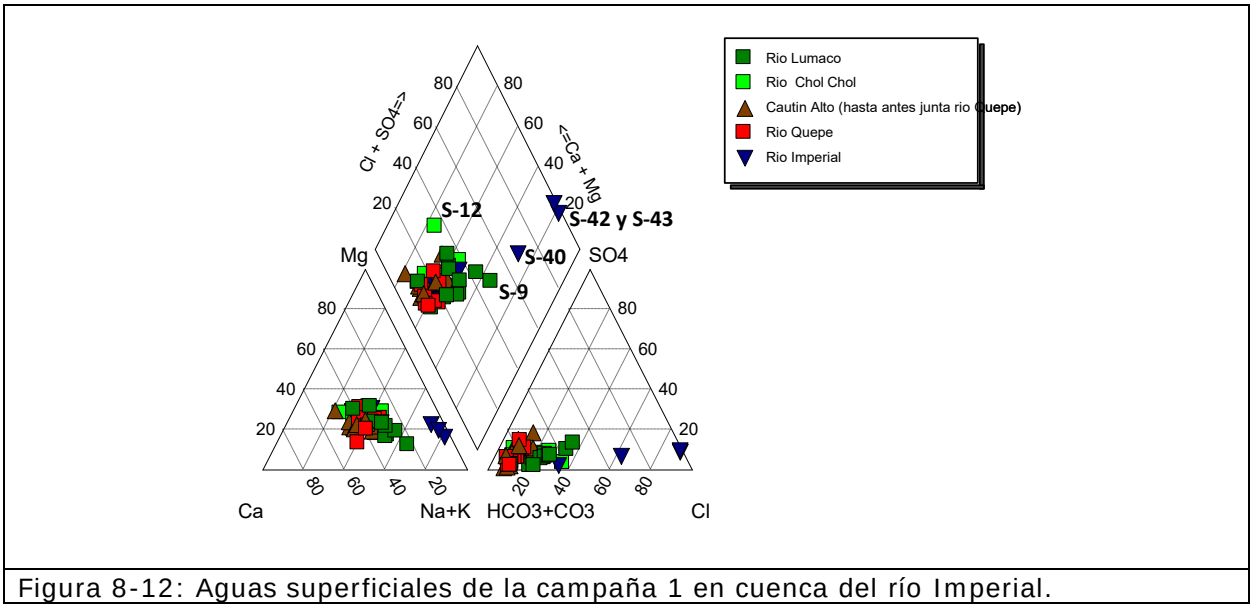


Figura 8-12: Aguas superficiales de la campaña 1 en cuenca del río Imperial.

En la campaña 2, que se desarrolló la mayor parte en invierno para las aguas superficiales, casi todas las aguas de la cuenca del río Imperial son aguas frescas bicarbonatadas Na-Ca (Figura 8-26). La única muestra Cl- Na es S-42 con una salinidad menor que la que tenía en la campaña anterior. En cambio la muestra S-43 obtenida en la misma fecha (09/09/2014) presenta la misma composición bicarbonatada Ca- Na de las demás aguas frescas. La muestra S-12 mantiene una composición intermedia en los aniones (HCO_3^- - Cl^-) y en los cationes (Ca- Mg).

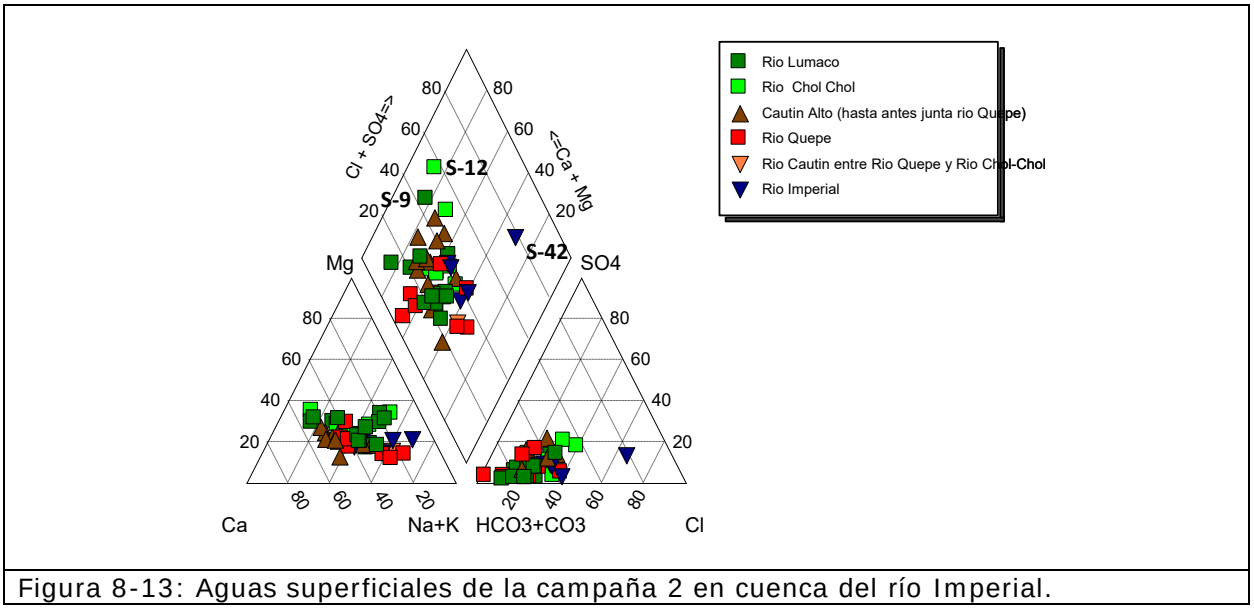


Figura 8-13: Aguas superficiales de la campaña 2 en cuenca del río Imperial.

Las aguas superficiales de la campaña 3 (verano) en la cuenca del río Imperial presentan una composición similar a las de la campaña 1, ubicándose las muestras de los puntos S-

40, S-42 y S-43 en el campo de las aguas Cl- Na. Según los diagramas de Stiff estos puntos coinciden nuevamente con los de mayor salinidad (Figura 8-27). En el río Traiguén el punto S-8 presenta una concentración levemente mayor de iones, así como ocurrió en la campaña 1 con el punto vecino S-9, cuya muestra S-9-3 se presenta con concentraciones bajas de iones.

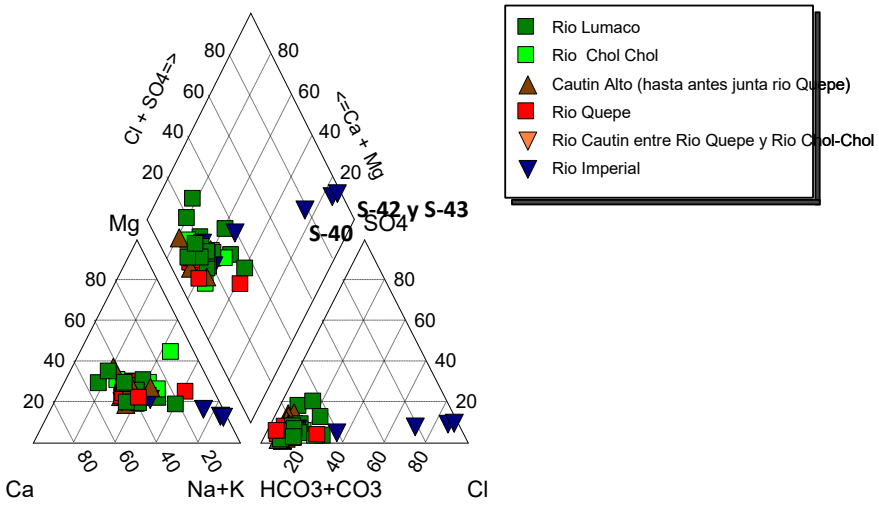


Figura 8-14: Aguas superficiales de la campaña 3 en cuenca del río Imperial.

Por último las aguas superficiales de la cuenca del río Imperial para la campaña 4 mantienen una composición general similar a las campañas anteriores (Figura 8-15), es decir aguas frescas bicarbonatadas Na-Ca. En el campo de las aguas Cl- Na se encuentran las muestras de la subcuenca río Imperial cercanas a la costa (S-40-4, S-42-4 y S-43-4). Otra muestra clorurada es S-41-4 (Cl intermedia) del río Colico justo antes de la desembocadura en el río Imperial, donde probablemente recibe también cierta influencia costera. La muestra S-44-4 de la subcuenca Lumaco también es Cl-Na y destaca en el sector por presentar mayor concentración de iones (TDS 366 mg/l).

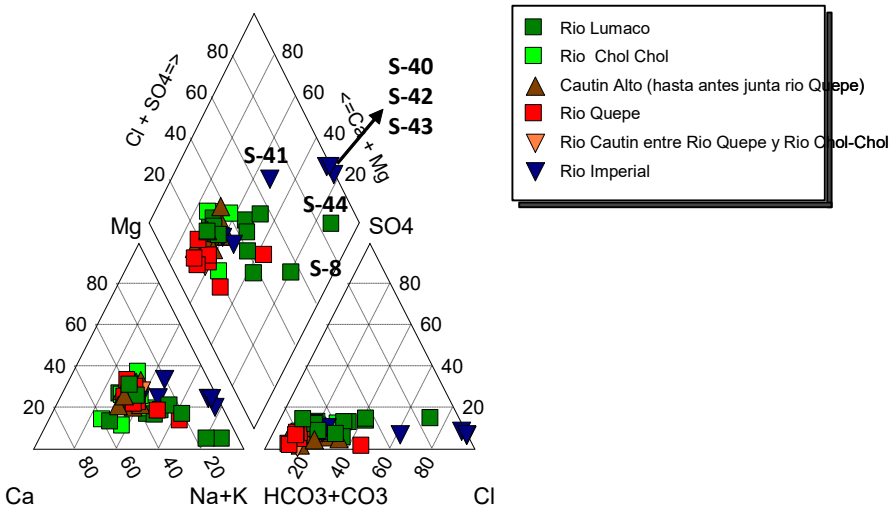


Figura 8-15: Aguas superficiales de la campaña 4 en cuenca del río Imperial.

Las aguas superficiales de la cuenca del río Toltén han sido representadas desde la Figura 8-16 hasta la Figura 8-19 para cada una de las campañas. En general se agrupan en el campo de las aguas bicarbonatadas intermedias (Ca- Na) al igual que las aguas superficiales del río Imperial. Se clasifican como aguas frescas en su mayoría, presentando tendencia salobre solamente en algunos sectores de la costa,

En la campaña 1 (Figura 8-16) las muestras de la subcuenca río Queule (S-78-1 y S-80-1) y de la subcuenca Toltén Bajo (S-62-1) corresponden a aguas bicarbonatadas pero con una proporción secundaria de Cl. Los tres puntos de muestreo se ubican cerca de la costa.

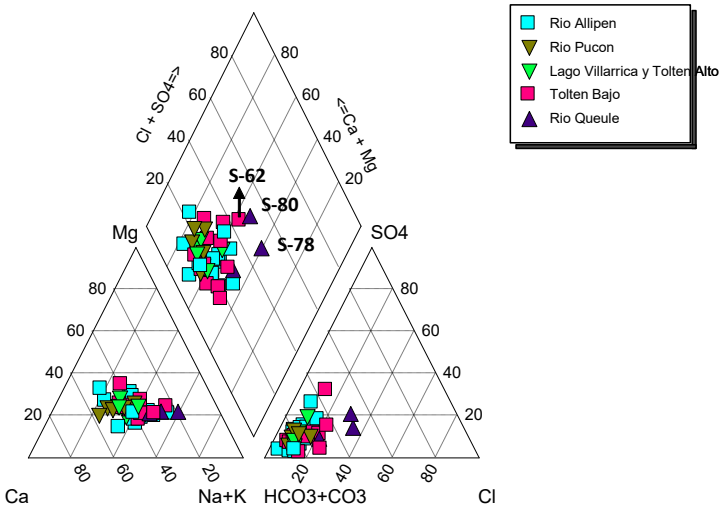


Figura 8-16: Aguas superficiales de la campaña 1 en cuenca del río Toltén.

En la campaña 2 (Figura 8-17), desarrollada durante el invierno, no hay muestras cloruradas sódicas y casi todas se agrupan en el campo de las aguas bicarbonatadas intermedias. Los puntos ubicados en el sector costero de las subcuencas Toltén Bajo y Río Queule presentan proporciones apreciables de Cl. En particular se distingue una tendencia clorurada en los puntos S-63, S-64 y S-66 de la subcuenca Toltén Bajo y en todas las muestras de la subcuenca del río Queule.

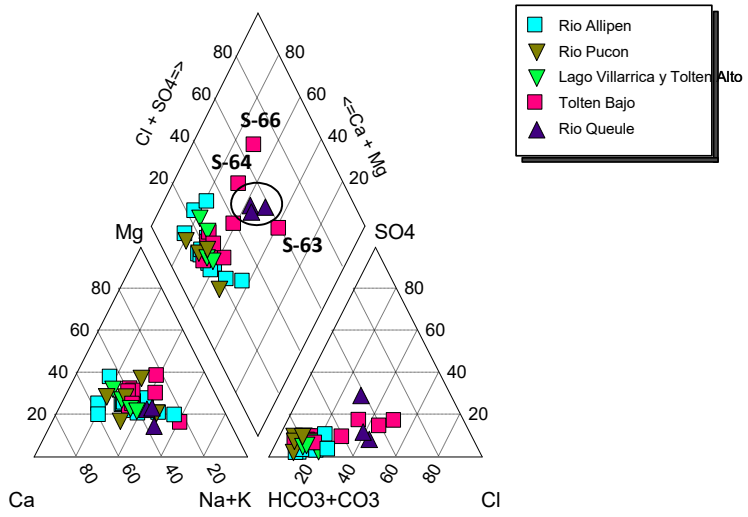


Figura 8-17: Aguas superficiales de la campaña 2 en cuenca del río Toltén.

En la campaña 3 (Figura 8-18), representativa del período estival se observan distintas tendencias en las muestras de las subcuencas Toltén Bajo y Río Queule. Las muestras S-78 y S-84 son Cl- Na, mientras que S-59-4 del río Toltén corresponde a una muestra sulfatada Ca- Na. Llama la atención que las muestras cercanas, S-63 aguas arriba y S-60 aguas abajo, no presentan esta tendencia.

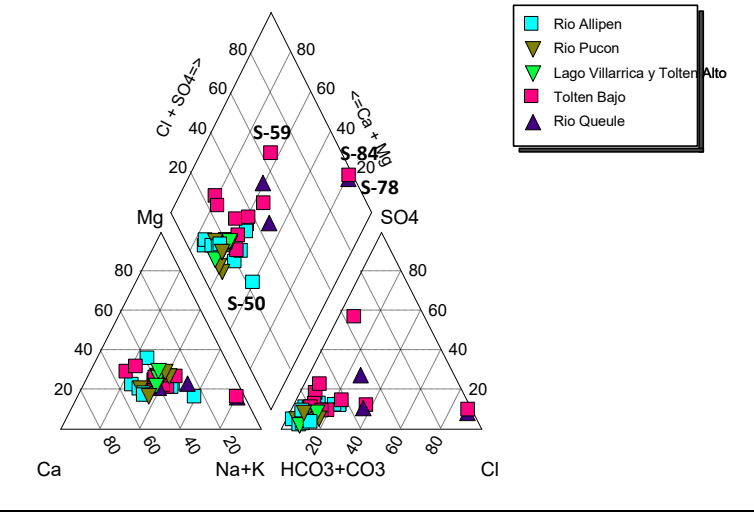


Figura 8-18: Aguas superficiales de la campaña 3 en cuenca del río Toltén.

En la campaña 4 se mantienen las muestras de S-78 y S-84 como Cl- Na con alta salinidad, mientras que S-79-4 (agua fresca) aumenta levemente su salinidad (en C4: 132 mg/l) y se ubica en el campo de las aguas Cl- Na.

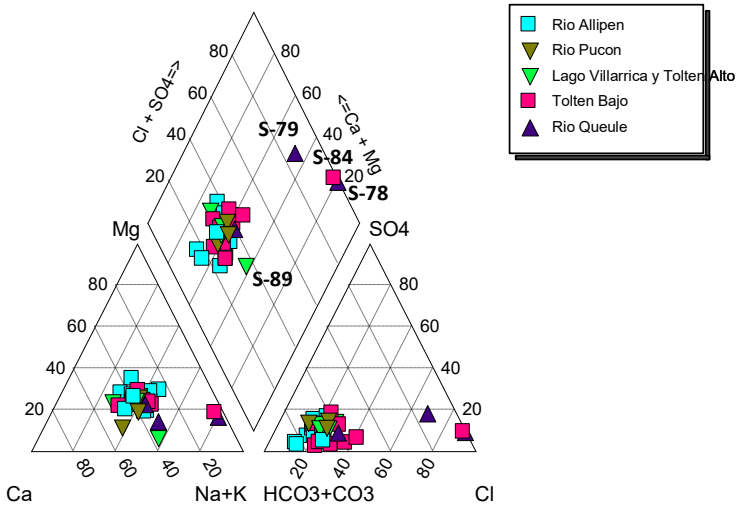


Figura 8-19: Aguas superficiales de la campaña 4 en cuenca del río Toltén.

En los gráficos siguientes se representan las tres muestras de la cuenca Río Budi y una de las cuencas costeras que están entre los ríos Budi y Toltén. En general corresponden a aguas cloruradas Na o Na- Ca.

En la campaña 1 la muestra S-73-1 es clorurada sódica mientras que las demás tienen una composición intermedia en los aniones de tipo clorurada bicarbonatada e intermedio en los cationes de tipo Na- Ca.

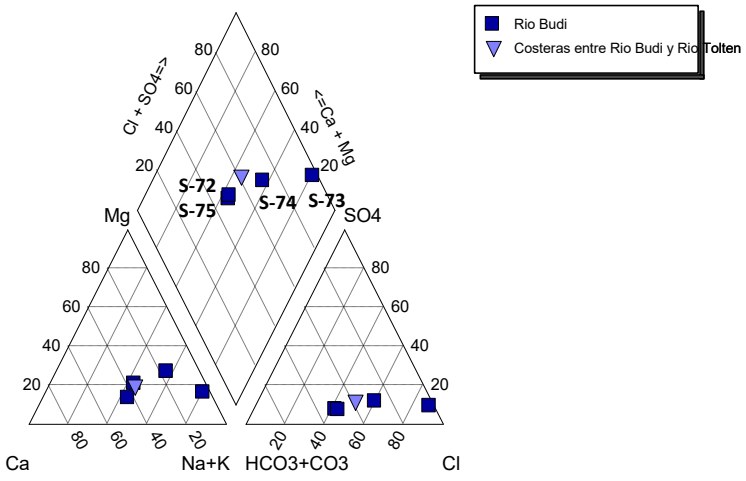


Figura 8-20: Aguas superficiales de la campaña 1 en cuencas costeras y cuenca del río Budi.

En la campaña 2, representativa del período de invierno, las aguas del sector costero mantienen una composición similar en los cationes y aumenta levemente la proporción de Na en S-72-2, S-74-2 y S-76-2.

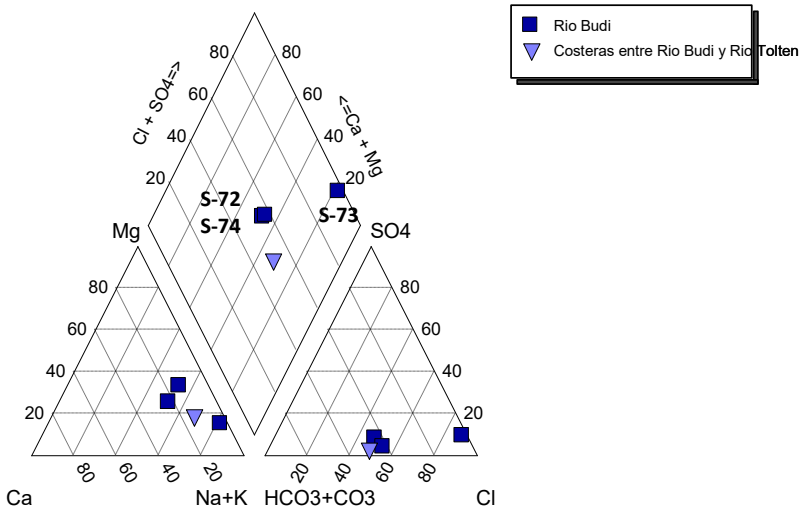


Figura 8-21: Aguas superficiales de la campaña 2 en cuencas costeras y cuenca del río Budi.

Luego en la campaña 3 su composición vuelve a ser intermedia en los cationes, mientras que en los aniones se mantienen en el campo de las aguas cloruradas bicarbonatadas.

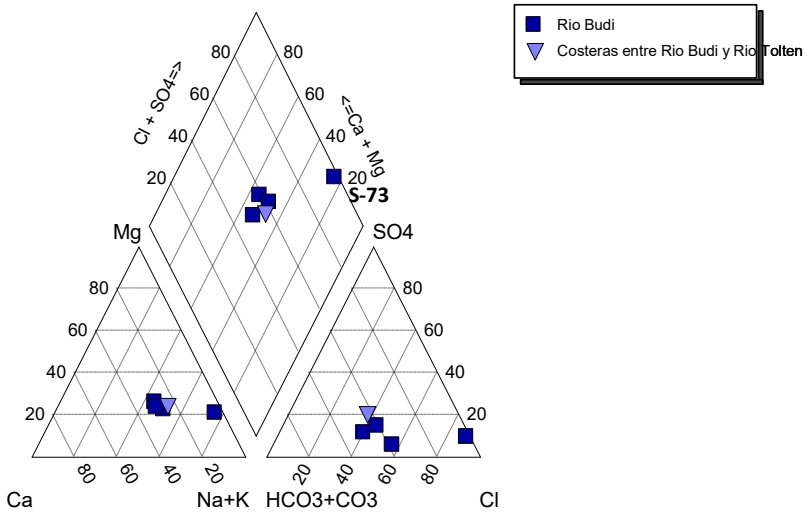


Figura 8-22: Aguas superficiales de la campaña 3 en cuencas costeras y cuenca del río Budi.

En la campaña 4 se aprecia la mayor dispersión en la composición de las muestras. La muestra S-73 sigue siendo Cl- Na. La muestra S-76-4 de las cuencas costeras es

clorurada Na- Ca. Las muestras S-72-4 y S-75-4 son intermedias en los aniones (Cl-HCO_3) y en los cationes (Na- Ca). Por último la muestra S-74-4 es la única bicarbonatada Ca- Na.

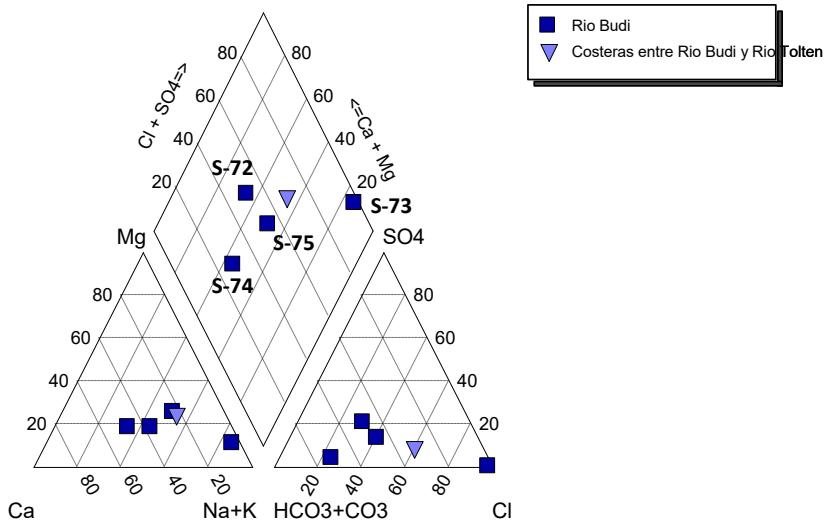


Figura 8-23: Aguas superficiales de la campaña 4 en cuencas costeras y cuenca del río Budi.

8.3.3 Distribución espacial (diagramas de Stiff)

En los mapas con diagramas de Stiff se representa la composición de las aguas superficiales en los distintos sectores de la región.

En la campaña 1 (Figura 8-25) los diagramas de Stiff indican que la mayoría de las aguas superficiales obtenidas en el otoño corresponden a aguas frescas bicarbonatadas.

En la cuenca del río Imperial, la subcuenca del río Lumaco y en particular las aguas de los ríos Lumaco y Quino son más frescas que las del Traiguén, donde las muestras S-9-1 (aguas arriba) y S-6-1 (cerca de Traiguén) destacan por ser un poco más salinas.

En la subcuenca del río Chol Chol las aguas del río Quillén (S-12-1) y Chol Chol son muy frescas, estas últimas similares a las del río Lumaco, que está aguas arriba.

En la subcuenca Cautín Alto las muestras S-21-1 y S-22-1 son un poco más concentradas, pero de composición muy similar a las demás. En los alrededores de Temuco, las muestras S-29-1, S-27-1 y S-28-1 también presentan una salinidad levemente mayor.

Las aguas de la subcuenca del río Quepe (muestras del río Vilcún) y río Cautín entre los ríos Quepe y Chol Chol son muy diluidas, mientras que aguas abajo, en la subcuenca del río Imperial, se presentan más concentradas manteniendo la composición observada en los alrededores de Temuco.

Las muestras de los puntos ubicados cerca de la costa en el río Moncul (S-42) y en el río Imperial (S-40 y S-43) son salobres y de composición clorurada sódica.

En la cuenca del río Toltén, las aguas de la subcuenca del río Allipén son más concentradas en el río homónimo especialmente desde los sectores de Melipeuco a Cunco y más frescas en el sector del lago Colico. Las aguas de este sector son similares a las de las subcuencas del río Pucón y lago Villarrica.

En la subcuenca Toltén Bajo, las aguas del río Donguil son bastante diluidas y ya en el río Toltén aumentan levemente su concentración que se mantiene hasta la desembocadura del río al mar. Las aguas del río Queule se asemejan a las del tramo inferior del río Toltén.

En las cuencas costeras las muestras de los sectores más apartados de la costa son más frescas y de composición bicarbonatada (S-72-1, S-73-1 y S-76-1), mientras que S-75-1 (fresca) y S-74-1 (salobre) son Cl- Na.

Las aguas superficiales muestreadas durante el invierno en la campaña 2 (Figura 8-26) corresponden casi todas a aguas frescas bicarbonatadas, reconociéndose algunos sectores con aguas un poco más concentradas en los ríos Traiguén (sector de Traiguén), río Allipén, río Cautín (sector Lautaro) y desagüe lago Villarrica. El punto S-75 presenta una composición Cl- Na similar a la campaña 1, aunque levemente más diluido. El punto S-74 presenta un cambio similar manteniéndose como agua salobre Cl- Na pero más diluida que en la campaña 1.

Las muestras de la campaña 3 (Figura 8-27), que fueron tomadas entre los meses de diciembre y enero son en general levemente más concentradas que las de la campaña anterior.

En la subcuenca del río Lumaco destaca el punto S-9 como el más concentrado del sector, seguido de S-5 y S-6. En la subcuenca de Chol Chol están muy diluidas al igual que en la de Cautín Alto, donde nuevamente S-21 y S-22 son las más concentradas, además de S-29-3, S-27-3 y S-28-3 cerca de Temuco.

En la subcuenca río Imperial las muestras más concentradas corresponden a S-40-3 y S-42-3, ambas aguas frescas Cl- Na y S-43-3, agua salobre también Cl- Na. Todas ellas se ubican en el sector costero.

En la cuenca del río Toltén, dentro de las aguas frescas, las del río Allipén son un poco más concentradas que el resto, similares a las muestras del río Toltén en el sector costero. La muestra S-59-3 es la única sulfatada. Se identifican dos muestras salobres en la costa, que corresponden a las aguas Cl- Na de los puntos S-84 y S-78.

En las cuencas costeras la composición es muy similar a la campaña 1, siendo S-75-3 (fresca) y S-74-3 (salobre) de composición Cl-Na.

La campaña 4 se desarrolló a principios del otoño (Figura 8-28) luego de un verano con escasas precipitaciones. Este fenómeno climático se representa en la Figura 8-24 al comparar las precipitaciones medidas en la estación P28 durante el 2014 y parte del 2015 (barras azules) con las precipitaciones medias registradas históricamente en la misma estación desde 1980 (barras verdes).

Esta situación particular del otoño del año 2015 produce un aumento en los TDS de las aguas superficiales, destacando los puntos S-8 y S-44 de la subcuenca del río Lumaco. Varias muestras del sector costero se clasifican como aguas salobres en las subcuencas de los ríos Imperial, Budi, Toltén Bajo y Queule.

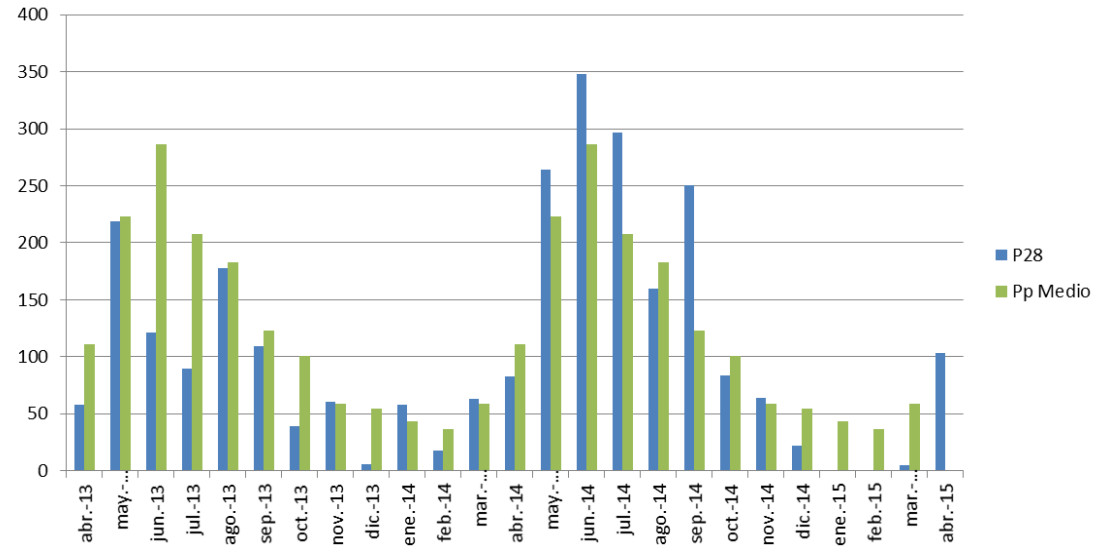


Figura 8-24: Comparación de precipitaciones en P28 (2014- 2015) con registro histórico de precipitaciones en la misma estación.

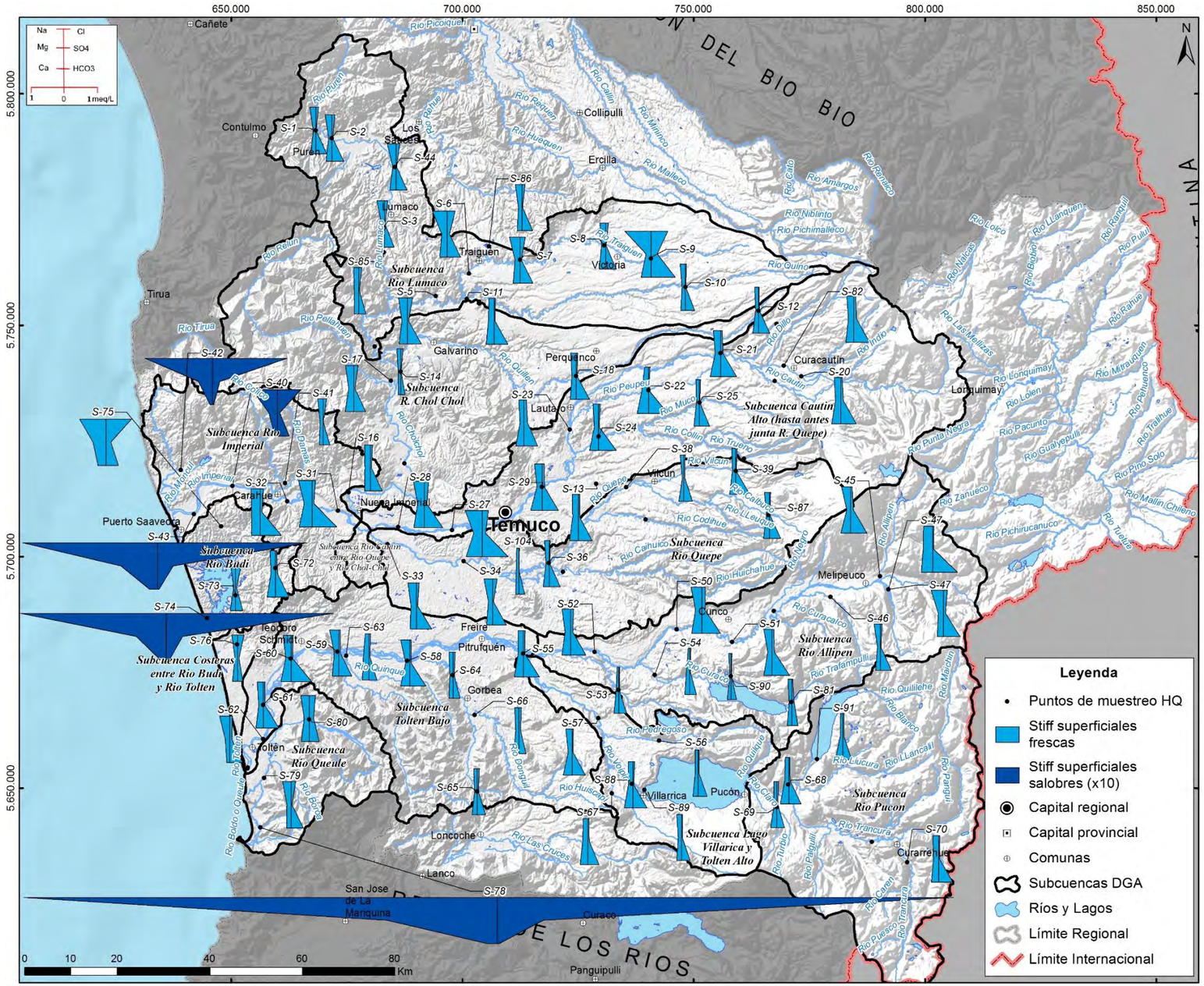


Figura 8-25: Mapa con diagramas de Stiff para aguas superficiales de campaña 1.

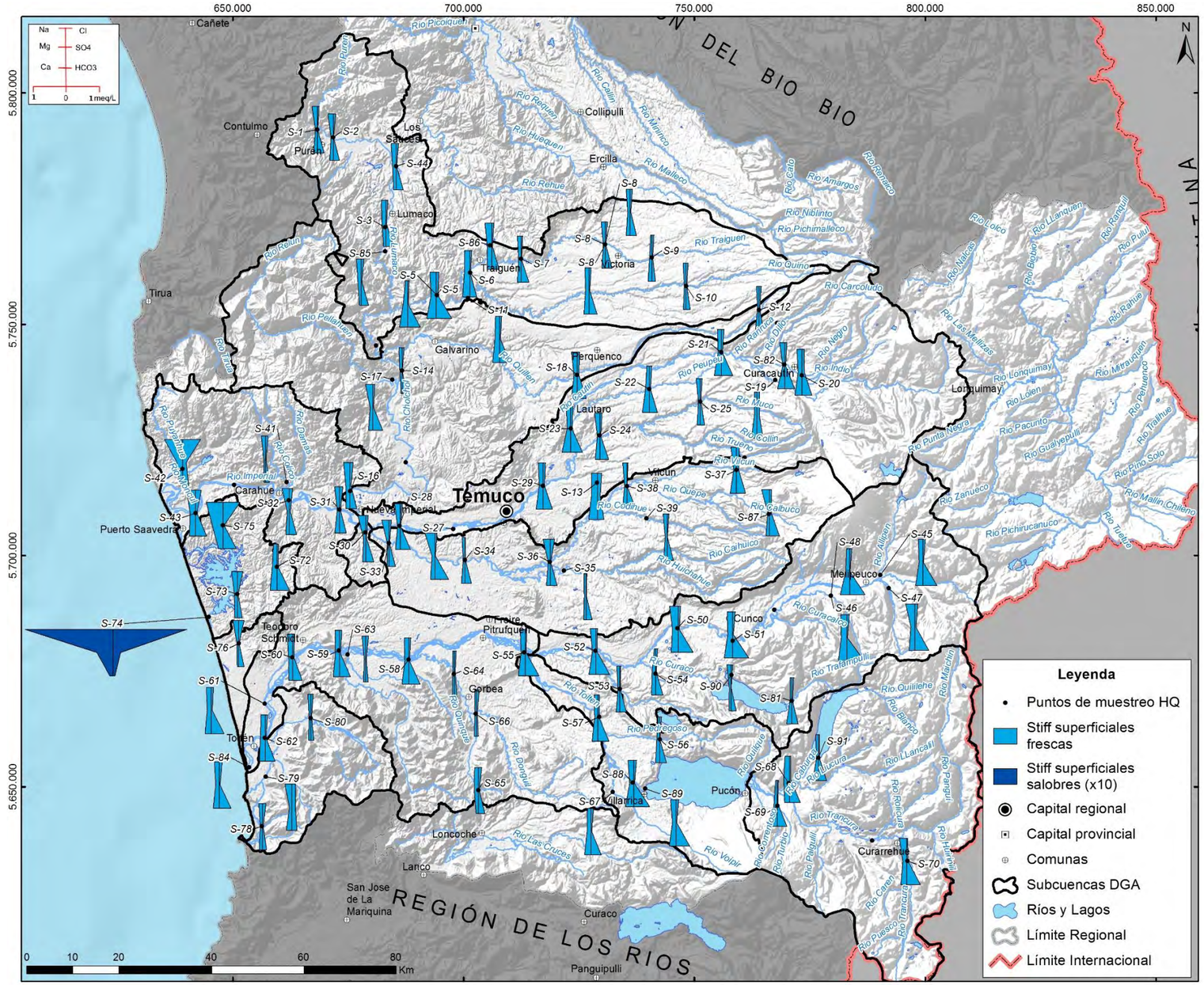
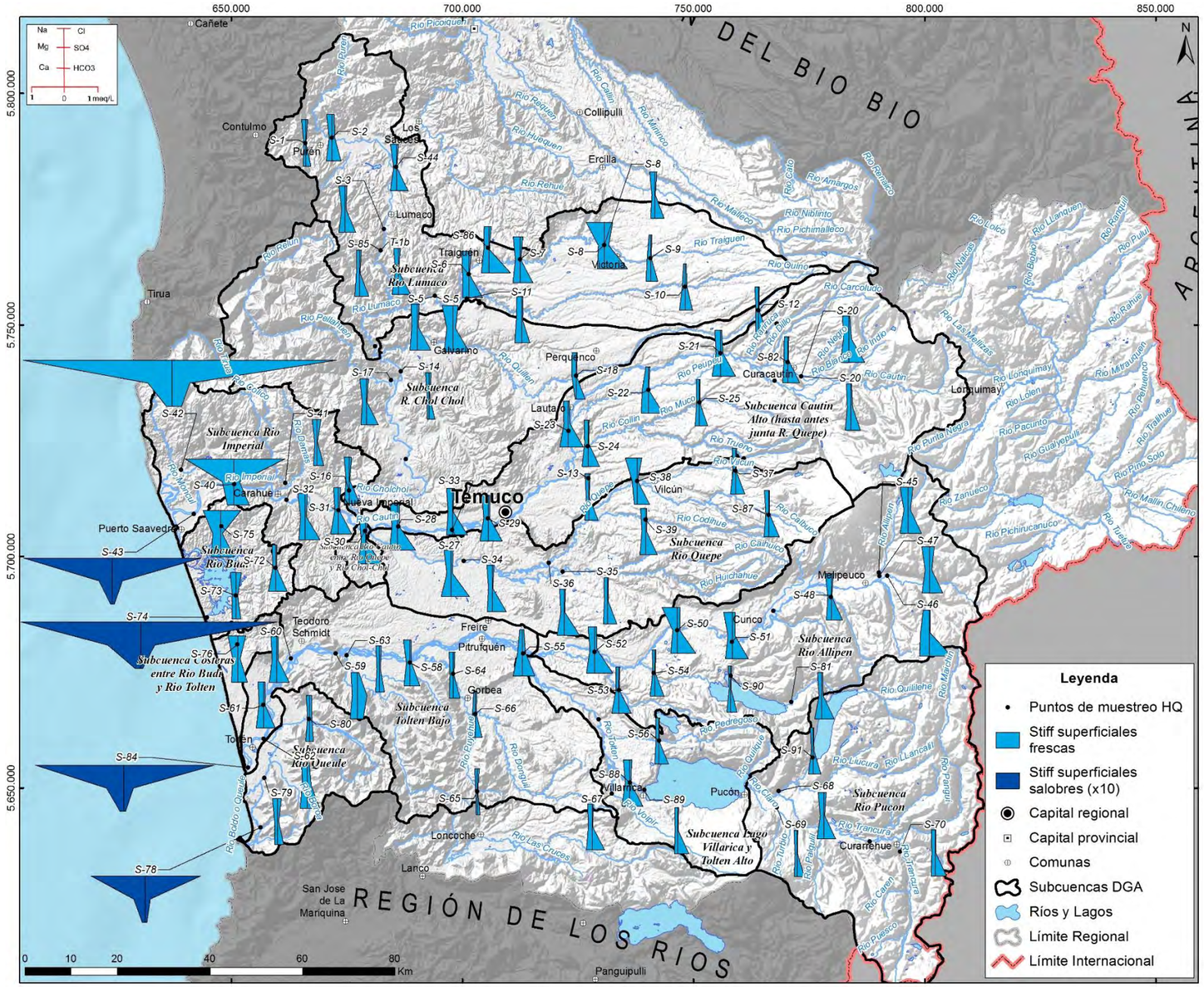


Figura 8-26: Mapa con diagramas de Stiff para aguas superficiales de campaña 2.


650.000
700.000
750.000
800.000
850.000
5.800.000
5.750.000
5.700.000
5.650.000
N
Na
Cl
Mg
SO4
Ca
HCO3
1
0
1 meq/L
Cañete
Contulmo
Purén
Los Sauces
Collipulli
Ercilla
Victoria
Lumaco
Traiguén
Tirua
Galvarino
Perquenco
Lautaro
Curacautín
Lonquimay
Temuco
Vilcún
Carahue
Nueva Imperial
Puerto Saavedra
Teodoro Schmidt
Freire
Pitrufquén
Cunco
Melipeuco
Gorbea
Toltén
Villarrica
Pucón
Curarrehue
Loncoche
Lanco
San Jose de La Mariquina
Panguipulli
Subcuenca Río Lumaco
Subcuenca R. Chol Chol
Subcuenca Río Imperial
Subcuenca Río Budi
Subcuenca Costeras entre Río Budi y Río Toltén
Subcuenca Toltén Bajo
Subcuenca Río Queule
Subcuenca Río Quepe
Subcuenca Cautín Alto (hasta antes junta R. Quepe)
Subcuenca Río Allipén
Subcuenca Río Pucón
Subcuenca Lago Villarica y Toltén Alto
Río Imperial
Río Cautín
Río Lumaco
Río Traiguén
Río Quino
Río Quepe
Río Allipén
Río Pucón
Río Toltén
Río Donguil
Río Pedregoso
Río Quillelhue
Río Trancura
Río Pichirucanuco
Río Zanuleo
Río Lolco
Río Llaucaill
Río Liucura
Río Carcoludo
Río Malleco
Río Niblinto
Río Pichimalleco
Río Amargos
Río Huequen
Río Rehue
Río Collin
Río Minuco
Río Picoiquen
Río Purén
Río Peuchen
Río Peuleo
Río Muco
Río Codihue
Río Huichahue
Río Calbuco
Río Trueno
Río Vilcun
Río Cholchol
Río Las Cruces
Río Pedregoso
Río Llanquihue
Río Mitrauquen
Río Pacunto
Río Guallepulli
Río Pino Solo
Río Mallin Chileno
Río Traiguén

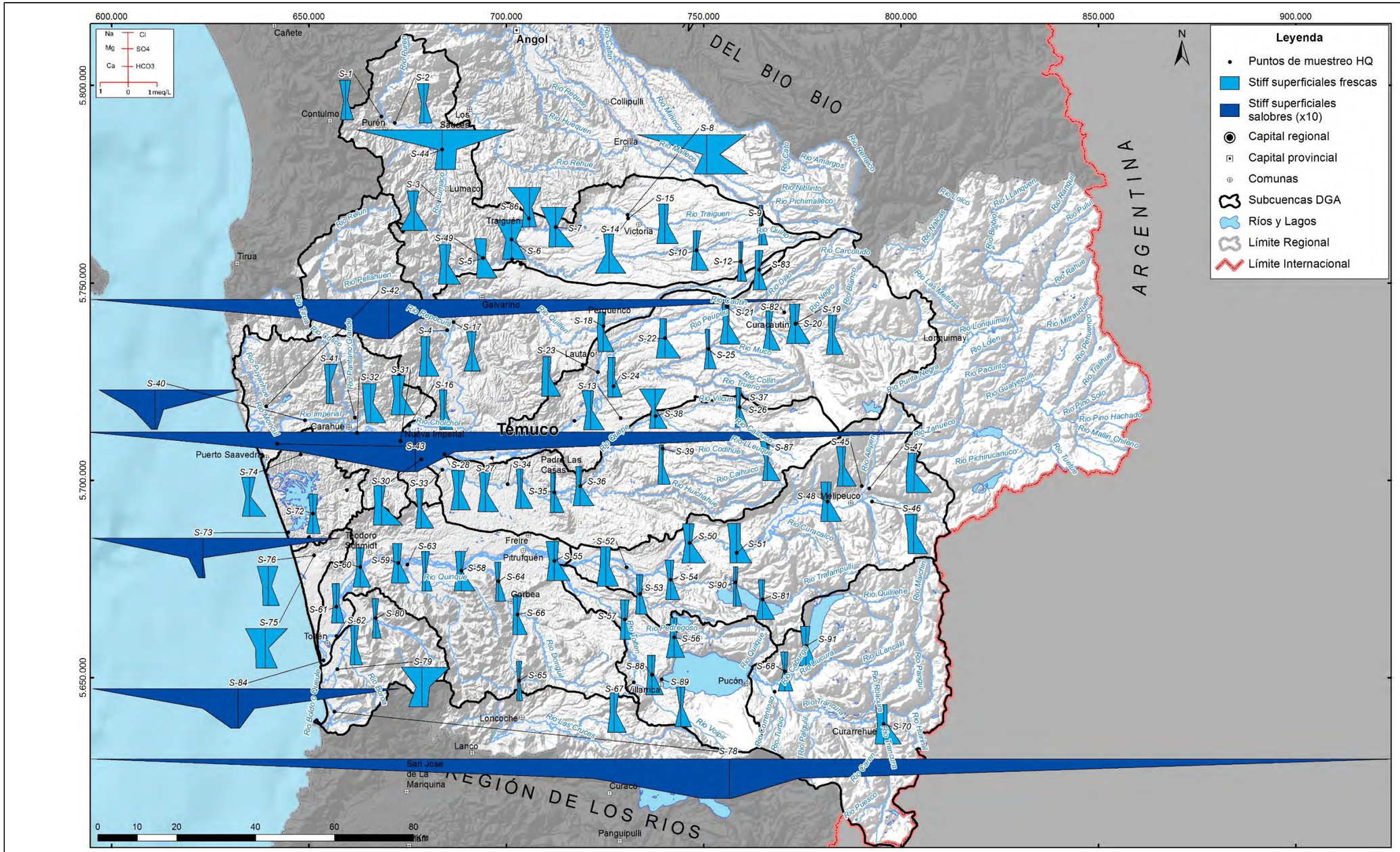


Figura 8-28: Mapa con diagramas de Stiff para aguas superficiales de campaña 4.

8.4 ANÁLISIS HIDROQUÍMICA AGUAS SUBTERRÁNEAS

8.4.1 Parámetros físico químicos

Las aguas subterráneas (Figura 8-29) representadas por los pozos someros tienen un pH entre 5,7 (O-227-3) y 7,8 (O-243-1). El pH promedio es 6,8, manteniendo la tendencia neutra de las aguas superficiales. En general las aguas subterráneas de pozos someros y profundos presentan características físico- químicas similares.

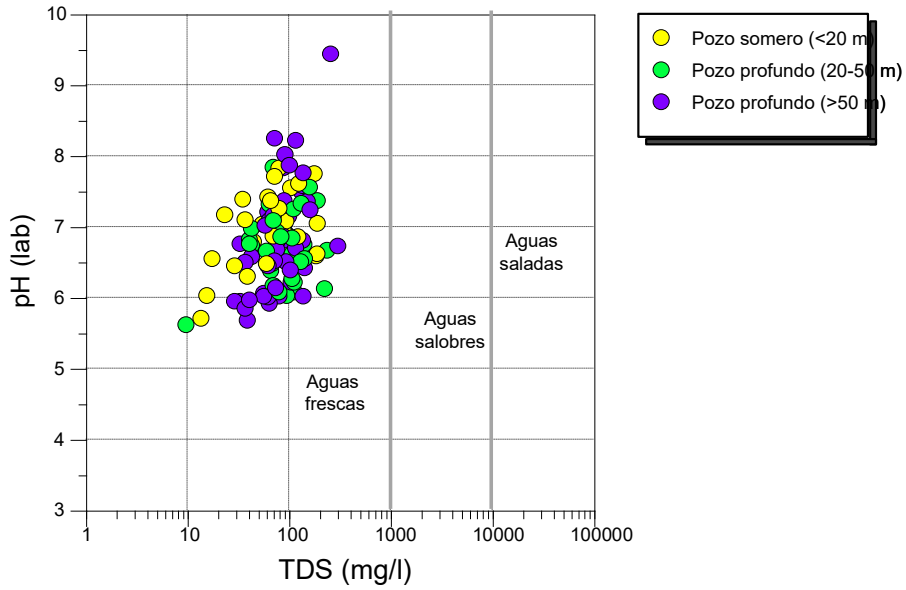


Figura 8-29: Relación pH y TDS para los distintos tipos de pozos.

8.4.2 Caracterización composicional (diagramas de Piper)

Las aguas subterráneas están representadas en los diagramas de Piper por los pozos someros (campaña 1 y 3) y por los pozos profundos (campaña 2). En la campaña 4 no se tomaron muestras de aguas subterráneas.

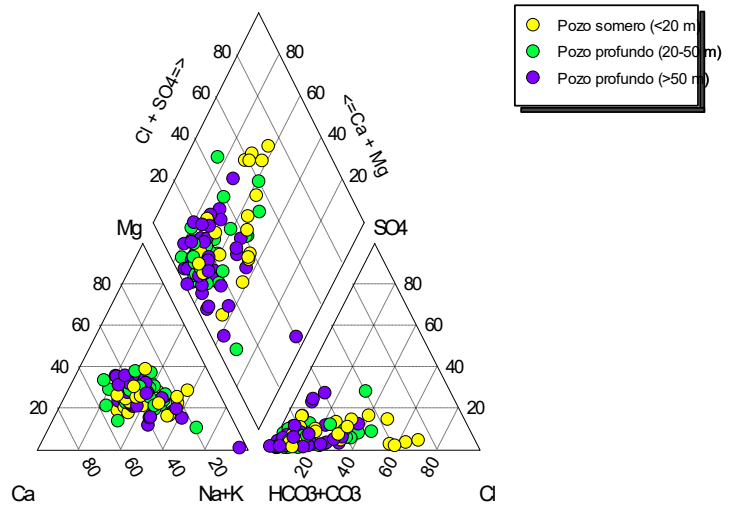


Figura 8-30: Diagrama de Piper para aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas de la cuenca del río Toltén han sido muestreadas en las campañas 1, 2 y 3. En la campaña 1 de otoño- invierno 2014 (Figura 8-31) las muestras de pozos someros de las subcuencas de los ríos Lumaco, Chol Chol y O-248-1 de río Imperial se ubican en el campo de las aguas cloruradas con una proporción menor de bicarbonato según el triángulo de los aniones. La otra muestra de la subcuenca del río Imperial (T-27-1) es bicarbonatada con una proporción importante de Cl. Las muestras de las subcuencas Cautín Alto y río Cautín entre río Quepe y Chol Chol son bicarbonatadas. En el campo de los cationes todas las muestras son intermedias Ca- Na.

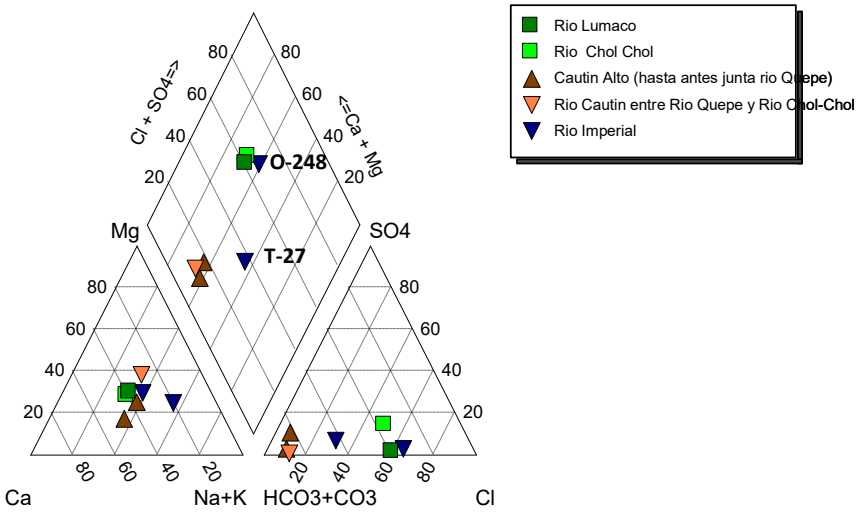


Figura 8-31: Pozos someros de la campaña 1 en cuenca del río Imperial.

En la campaña 3 se repite el muestreo de los pozos someros de la primera campaña, esta vez a principios del verano del año 2015 (Figura 8-32).

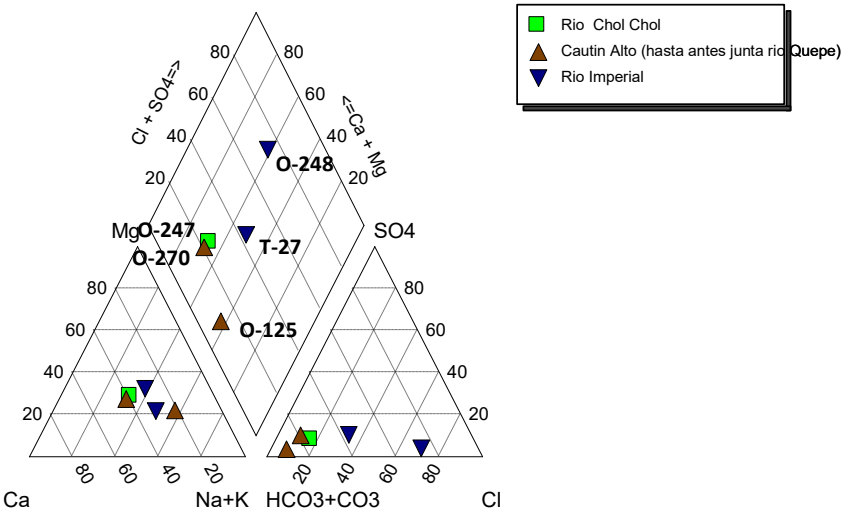


Figura 8-32: Pozos someros de la campaña 3 en cuenca del río Imperial.

Las muestras de pozos profundos de la campaña 2 se obtuvieron durante el período invierno- primavera 2014. La mayoría de las aguas subterráneas son bicarbonatadas a levemente cloruradas en los aniones e intermedias en los cationes (Figura 8-33). La muestra O-25-2 de la subcuenca Cautín Alto es bicarbonatada con una alta proporción de Na. Las muestras O-19-2 y DGA Traiguén de la subcuenca río Lumaco son también bicarbonatadas Na con una composición muy similar entre sí. Las muestras DGA Victoria y O-2, también de la subcuenca río Lumaco, son bicarbonatadas a levemente cloruradas Ca.

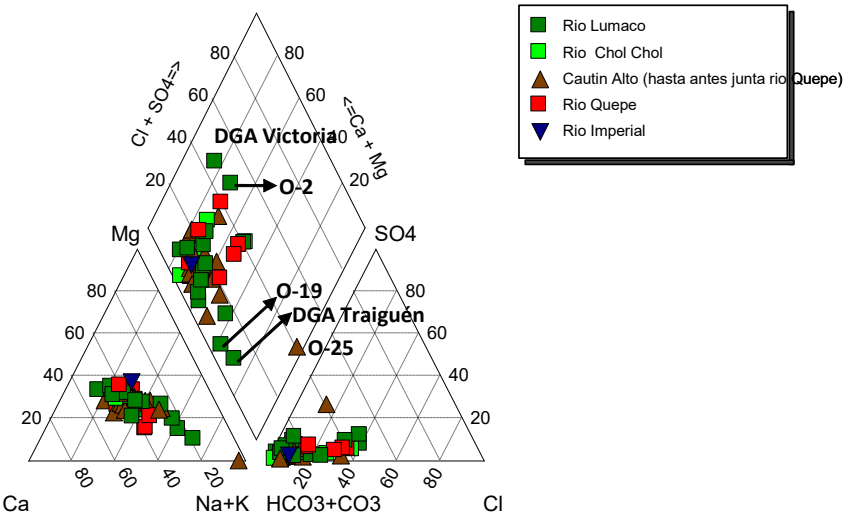


Figura 8-33: Pozos profundos de la campaña 2 en cuenca del río Imperial.

Los pozos O-248 (clorurado Ca- Na) y T-27 (bicarbonatada Ca- Na) de la subcuenca río Imperial mantienen su composición, al igual que los pozos de la subcuenca Cautín Alto, O-270 y O-125 (aguas bicarbonatadas Ca- Na). El pozo O-247 de la subcuenca río Chol

Chol presenta una variación en su composición pasando del campo clorurado a bicarbonatado.

En la cuenca del río Toltén la mayoría de los pozos se agrupan en el campo de las aguas bicarbonatadas intermedias. En la campaña 1 los pozos de la subcuenca Toltén Bajo, O-227 y O-228, se encuentran en el campo de las aguas bicarbonatadas sódicas (Figura 8-34), mientras que en la campaña 3 el pozo O-227 mantiene esta composición, mientras que la muestra O-228-3 se agrupa junto a las demás en el campo de las aguas bicarbonatadas intermedias (Figura 8-35). La muestra del pozo O-183 (sólo disponible para la campaña 1) es la única clorurada intermedia, con una proporción menor de bicarbonato.

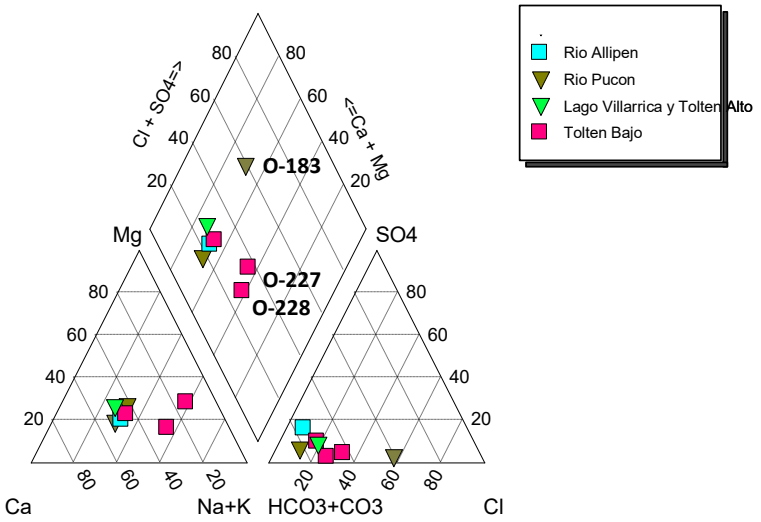


Figura 8-34: Pozos someros de la campaña 1 en cuenca del río Toltén.

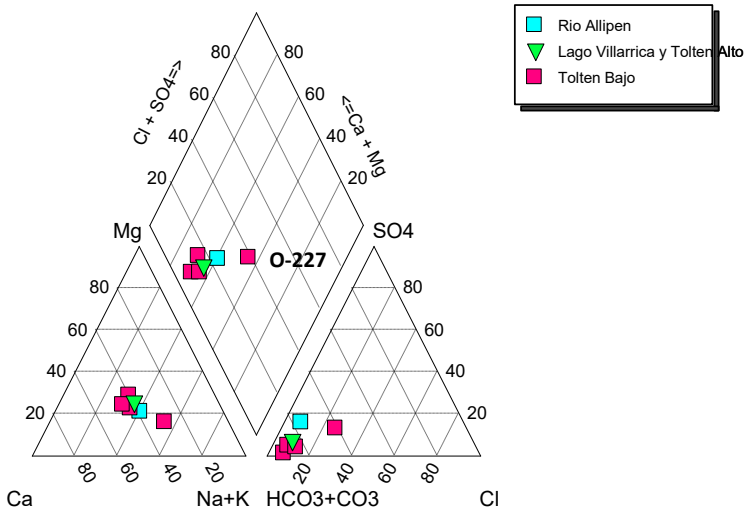


Figura 8-35: Pozos someros de la campaña 3 en cuenca del río Toltén.

Los pozos profundos de la cuenca del río Toltén fueron muestreados en la campaña 2 (Figura 8-36). Su composición es semejante a la de los pozos someros, bicarbonatada intermedia para la mayoría de las muestras. Dos pozos de la subcuenca Toltén Bajo (O-329 y DGA Teodoro Schmidt) tienen una composición intermedia bicarbonatada clorurada en el campo de los aniones.

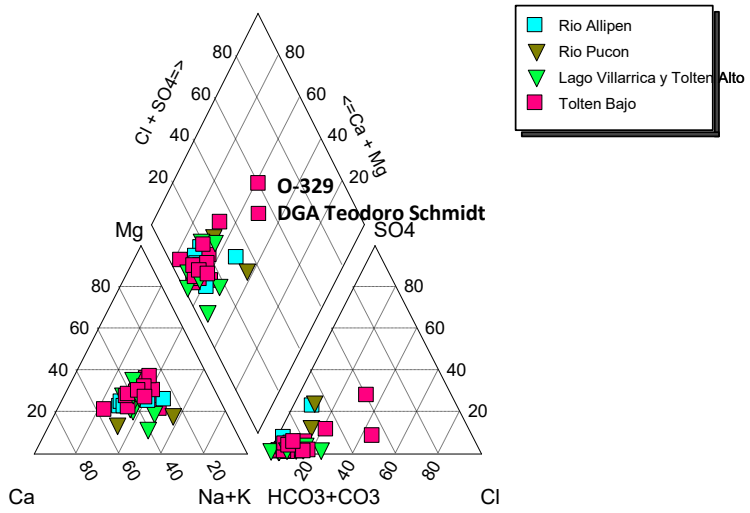


Figura 8-36: Pozos profundos de la campaña 2 en cuenca del río Toltén.

Los pozos someros (campañas 1 y 3) y profundos (campaña 2) de las cuencas costeras entre los ríos Budi y Toltén han sido representados en la Figura 8-37. No hay muestras de pozos de la cuenca del río Budi. Las aguas subterráneas presentan una composición de tendencia bicarbonatada con proporciones variables de Cl en los aniones y en los cationes todas se agrupan como aguas intermedias sin un catión predominante.

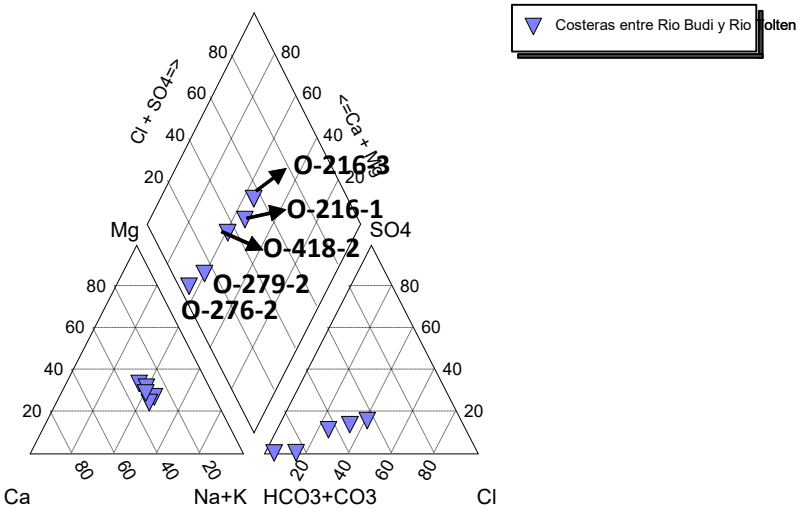


Figura 8-37: Pozos someros y profundos de las cuencas costeras y cuenca del río Budi.

El pozo somero O-216 fue muestreado en las campañas 1 y 3, ambas muestras corresponden a aguas intermedias, bicarbonatadas Cl en los aniones. Junto con el pozo

profundo O-418-2 son las que poseen una proporción apreciable de Cl. En los otros pozos profundos (O-279 y O-276) la proporción de bicarbonato es mayor.

8.4.3 Distribución espacial (diagramas de Stiff)

En los mapas con diagramas de Stiff se presenta la composición de las aguas subterráneas por sectores.

En la campaña 1 se representa la composición de los pozos someros (Figura 8-38) cuya profundidad no excede los 20 m. En general los pozos indican que las aguas subterráneas someras tienen una composición similar a las aguas superficiales. En el caso del pozo P-30, éste se diferencia por ser bicarbonatado son una concentración importante de Mg. El pozo del sector costero O-248 es similar a la otra muestra del sector (S-75-1) que corresponde a aguas superficiales Cl- Na.

La otra muestra subterránea de la costa es O-216-1 de composición bicarbonatada intermedia con una salinidad mayor que las muestras superficiales del sector.

En las muestras de aguas subterráneas de la campaña 2 se utilizan pozos profundos con profundidad mayor a 20 m. En la Figura 8-39 se diferencian los pozos entre 20 y 50 m de profundidad y los que tienen más de 50 m.

Primero se describen las subcuencas de la cuenca del río Imperial.

En la ribera del tramo medio del río Quillén, subcuenca del río Chol Chol, al este de los cerros de Ñielol, O-252 destaca por una marcada concentración de bicarbonato.

En la subcuenca del río Lumaco, las muestras de pozos entre 20 y 50 m destacan por ser muy concentradas, especialmente DGA Traiguén (bicarbonatada sódica) y DGA Victoria (bicarbonatada cálcica). Las muestras de pozos profundos señalan un predominio de bicarbonato y Ca, destacando O-5-2 por su marcada concentración en estos dos elementos.

En la subcuenca Cautín Alto, entre Curacautín y Lonquimay destaca el pozo O-25 por su alto contenido en cloruro, que corresponde a aguas subterráneas profundas de origen termal (sector Termas El Manzanar). Los demás pozos, del sector de Lautaro, reflejan una salinidad levemente superior a las aguas superficiales con una componente bicarbonatada dominante, tanto los que tienen profundidades de 20- 50 m como los más profundos.

Inmediatamente aguas abajo de Temuco es posible reconocer un aumento local en la salinidad de las aguas subterráneas profundas en el pozo O-338. Este efecto ya no se aprecia en las aguas subterráneas de los pozos ubicados un poco más al oeste, dado que sus concentraciones se parecen a las del sector de Lautaro.

En las subcuencas río Quepe y río Cautín entre ríos Quepe y Chol Chol, las aguas subterráneas son muy frescas.

En la subcuenca del río Imperial sólo se presenta la muestra O-222-2 de composición bicarbonatada y fresca.

En la cuenca del río Toltén, la subcuenca del río Allipén posee una serie de muestras de aguas superficiales y subterráneas desde las nacientes del río hasta su confluencia con el río Toltén. En general ambos tipos de aguas presentan una composición similar, siendo aguas frescas pero con una concentración apreciable de bicarbonato. El pozo O-175, ubicado en el sector cordillerano de Melipeuco, sigue la misma composición pero su salinidad es levemente mayor.

En la subcuenca del río Pucón la muestra O-224-2 es similar a las aguas frescas del sector Melipeuco, mientras que O-186 de un pozo >50 m de profundidad es un poco más concentrada.

Las aguas subterráneas de pozos profundos de la subcuenca del lago Villarrica, siguen el tipo bicarbonatado pero con bajas concentraciones en dos pozos del sector sur del lago Villarrica (O-281 y O-309). Al noroeste del lago, dos pozos indican la presencia de aguas subterráneas frescas pero con una componente mayor de bicarbonato (O-352 y O-296).

En la subcuenca Toltén Bajo los pozos profundos del margen este de esta subcuenca pueden agruparse en los sectores noroeste y sureste. Estos últimos presentan muy baja conductividad (CE 80 aprox.) y son de tipo bicarbonatado (O-404, O-286, O-332, O-107). Los otros son del mismo tipo pero su conductividad aumenta levemente, especialmente en O-194, PPA-02, O-133 y O-172. Los dos pozos del sector de Teodoro Schmidt son similares a este último grupo.

Las aguas subterráneas de las cuencas costeras según las muestras O-276-2 y O-279-2 son muy bicarbonatadas, pero representan sólo un sector acotado del litoral.

Las muestras de pozos someros de la campaña 3 indican que las aguas subterráneas de los pozos cuya profundidad es <20 m se asemeja a las aguas superficiales en composición y concentración. Destacan por ser un poco más concentradas O-125-3 en la subcuenca Cautín Alto y en la costa O-248-3 (clorurada) y O-216-3 de composición bicarbonatada intermedia.

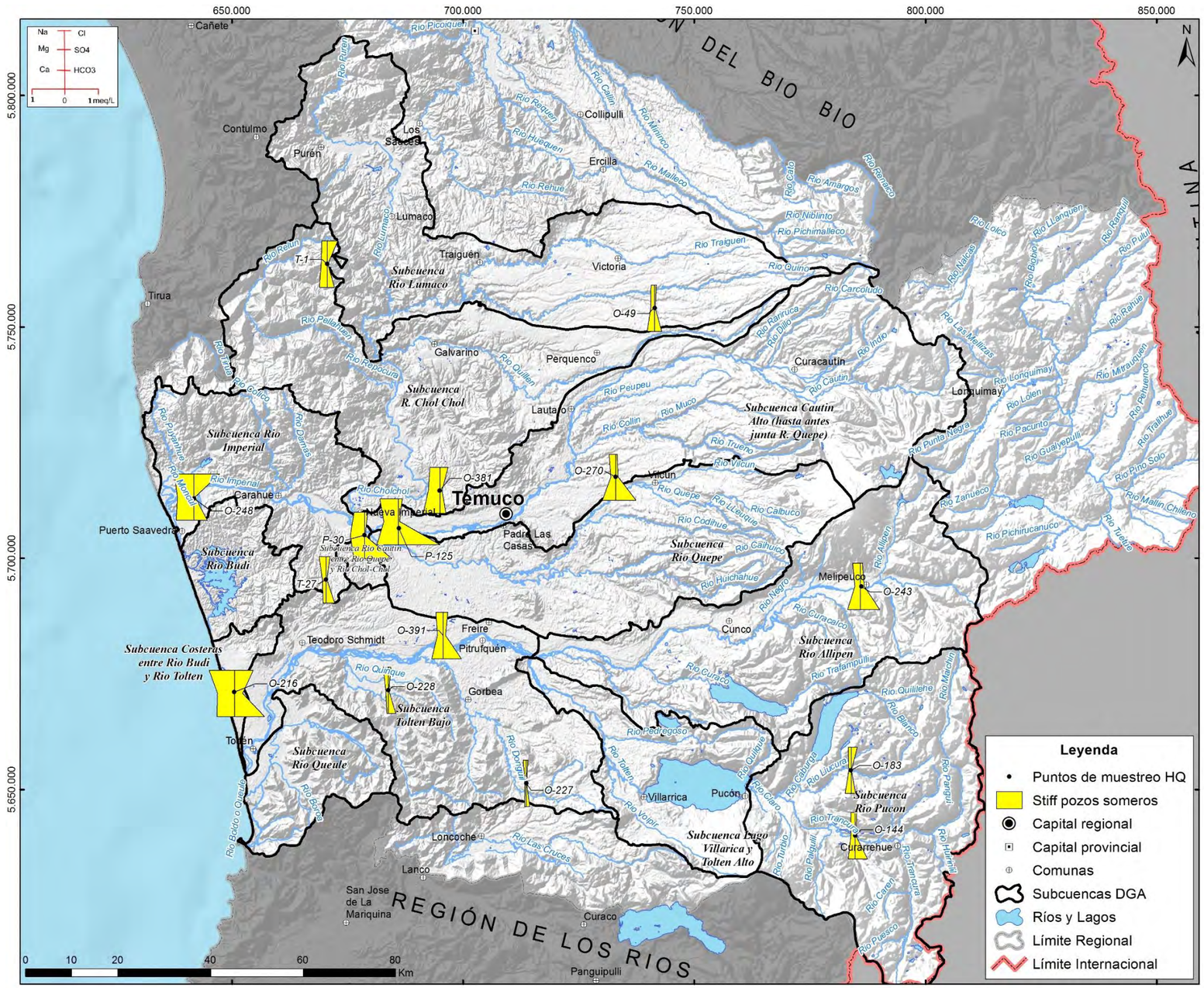


Figura 8-38: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de pozos someros campaña 1.

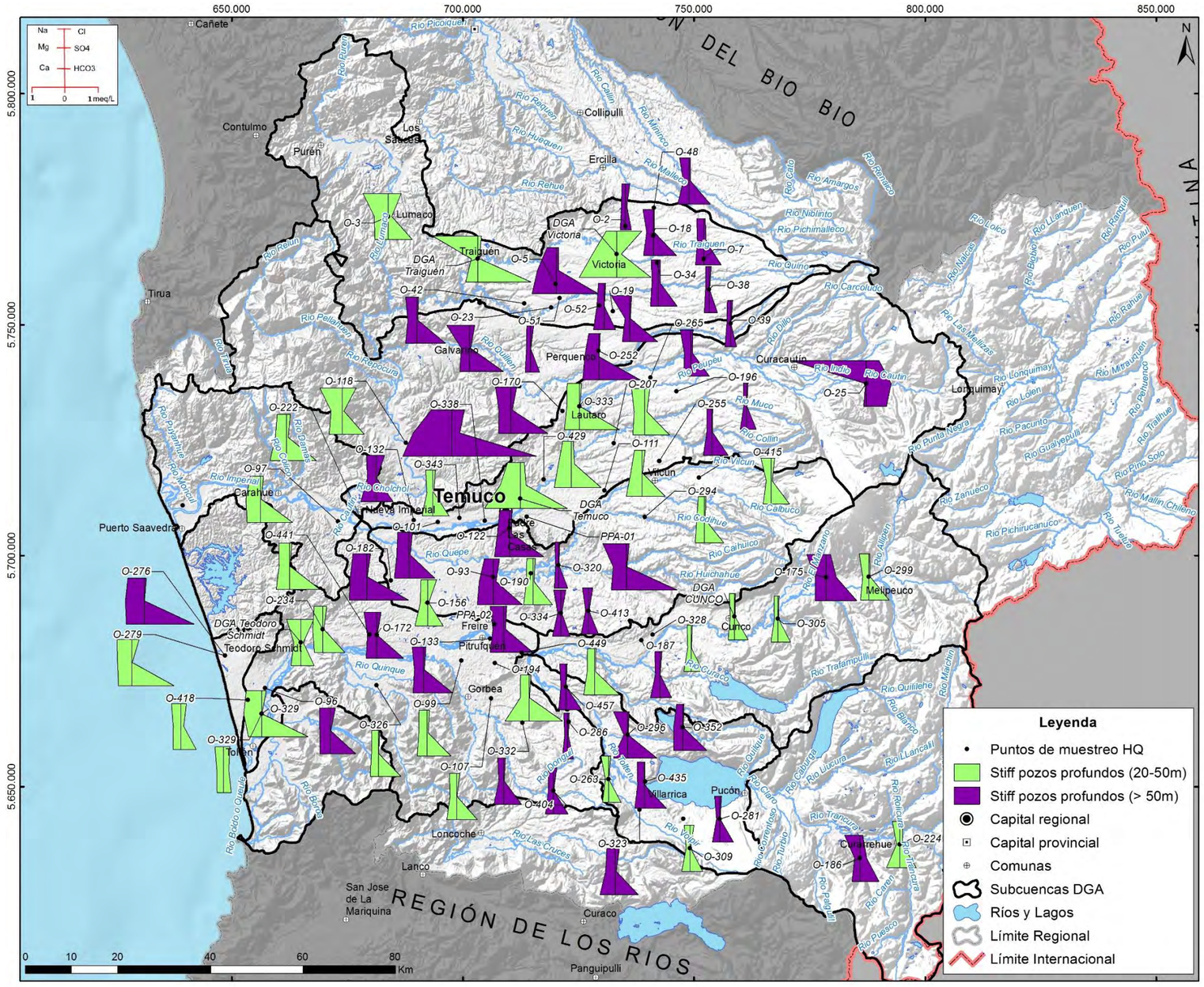


Figura 8-39: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de pozos profundos campaña 2.

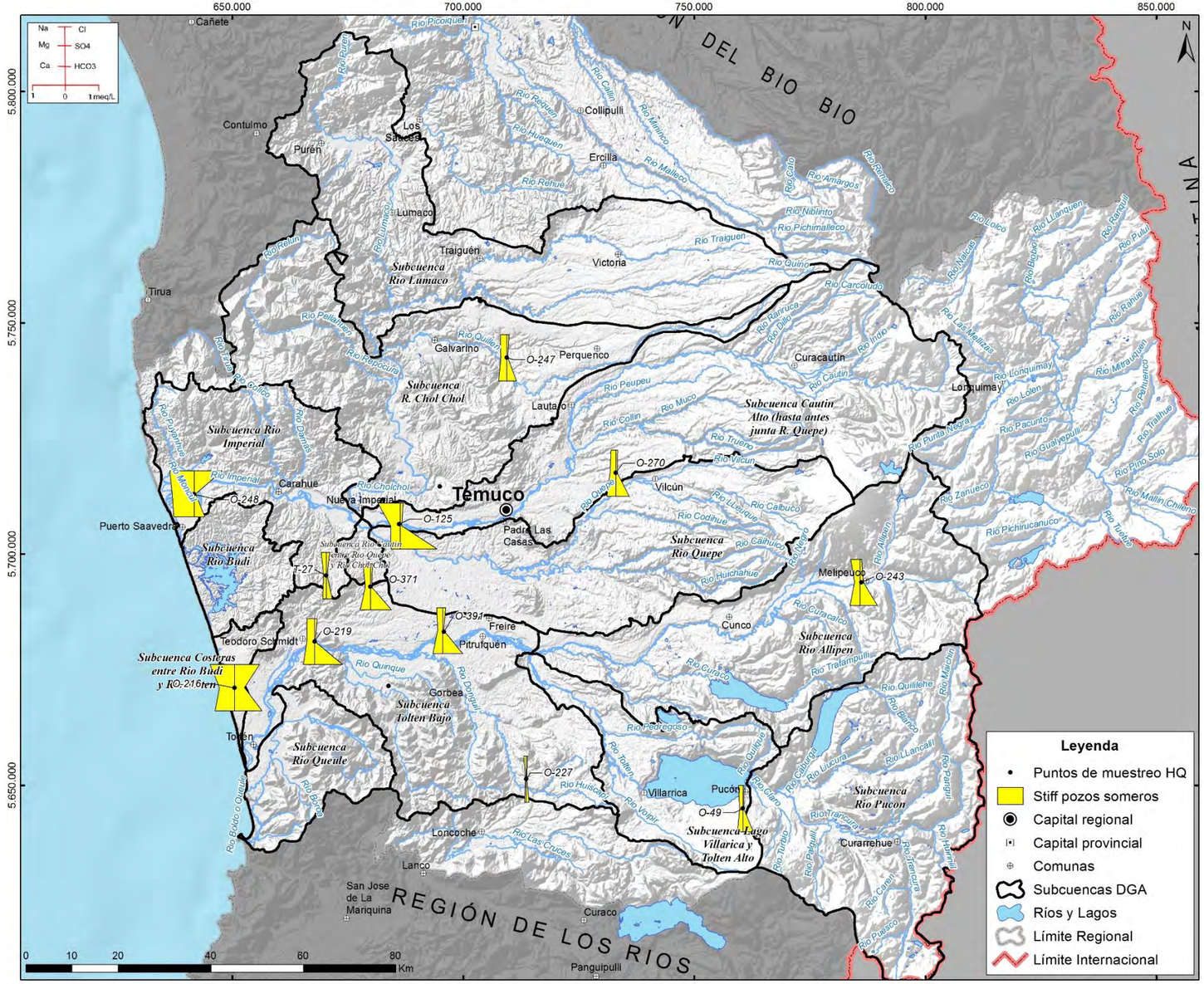


Figura 8-40: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de pozos someros campaña 3.

8.5 CALIDAD DE LAS AGUAS

La calidad de las aguas se establece mediante la evaluación de los análisis químicos en referencia a las normas chilenas de calidad para agua de riego y agua potable. Los requisitos de calidad del agua para riego se basan en la Norma Chilena Oficial NCh1333.Of78 modificada en 1987 (en adelante NCh 1333) y para el agua potable se considera lo establecido en la Norma Chilena de Agua Potable NCh 409 Of.2005 (en adelante NCh 409).

Considerando que la evaluación de la aptitud de los recursos hídricos para su uso como agua de riego es también uno de los objetivos del muestreo hidroquímico, se analizaron todos los analitos requeridos por la NCh 1333 (Tabla 8-2).

Tabla 8-2: Límites máximos establecidos por la NCh 1333.

ID	Parámetro	Expresión	Unidad	NCh 1333 Agua de riego	Analizado
Iones positivos (cationes)					
1	Aluminio	Al	mg/L	5	si
2	Arsénico	As	mg/L	0,1	si
3	Bario	Ba	mg/L	4	si
4	Berilio	Be	mg/L	0,1	si
5	Boro	B	mg/L	0,75	si
6	Cadmio	Cd	mg/L	0,01	si
7	Cobalto	Co	mg/L	0,05	si
8	Cobre	Cu	mg/L	0,2	si
9	Cromo	Cr	mg/L	0,1	si
10	Hierro	Fe	mg/L	5	si
11	Litio	Li	mg/L	2,5	si
12	Litio Cítricos	Li	mg/L	0,075	si
13	Manganeso	Mn	mg/L	0,2	si
14	Mercurio	Hg	mg/L	0,001	si
15	Molibdeno	Mo	mg/L	0,01	si
16	Níquel	Ni	mg/L	0,2	si
17	Plata	Ag	mg/L	0,2	si
18	Plomo	Pb	mg/L	5	si
19	Selenio	Se	mg/L	0,02	si
20	Sodio porcentual	Na	% (mg/L)	35	si
21	Vanadio	V	mg/L	0,1	si
22	Zinc	Zn	mg/L	2	si
Iones negativos (aniones)					
23	Cianuro	CN^-	mg/L	0,2	si
24	Cloruros	Cl^-	mg/L	200	si
25	Fluoruro	F^-	mg/L	1	si
26	N-Nitrato	NO^{3-}	mg/L	50	si
27	N-Nitrito	NO^{2-}	mg/L	3	si
28	Sulfatos	SO_4^{2-}	mg/L	250	si
Parámetros microbiológicos					

ID	Parámetro	Expresión	Unidad	NCh 1333 Agua de riego	Analizado
29	Coliformes fecales	Coli/100 ml	NMP/100 mL	1000/100ml	si
Parámetros físico-químicos					
30	Conductividad	COND	uS/cm	ver tabla	si
31	pH	pH		5,5 - 9,0	si
32	Sólidos disueltos tot.	SDT	mg/L	ver tabla	si

En el caso de la NCh 409 se verificaron los resultados de cationes, aniones, parámetros microbiológicos y físico- químicos. No se evaluaron parámetros como sustancias orgánicas, plaguicidas, productos secundarios de la desinfección, características organolépticas, parámetros de desinfección, detergentes y elementos radioactivos como señala la Tabla 8-3.

Tabla 8-3: Límites máximos establecidos por la NCh 409.

ID	Parámetro	Expresión	Unidad	NCH 409 Agua Potable	Analizado
Iones positivos (cationes)					
1	Amoniaco	NH_3	mg/l	0,25	si
2	Arsénico	As	mg/l	0,01	si
3	Cadmio	Cd	mg/l	0,01	si
4	Cobre	Cu	mg/l	2	si
5	Cromo Hexavalente	Cr^{6+}	mg/l	0,05	no
6	Hierro	Fe	mg/l	0,3	si
7	Magnesio	Mg	mg/l	250	si
8	Manganeso	Mn	mg/l	0,1	si
9	Mercurio	Hg	mg/l	0,001	si
10	Plomo	Pb	mg/l	0,05	si
11	Selenio	Se	mg/l	0,01	si
12	Zinc	Zn	mg/l	3	si
Iones negativos (aniones)					
13	Cianuro	CN -	mg/l	0,05	si
14	Cloruros	C l-	mg/l	400	si
15	Fluoruro	F -	mg/l	1,5	si
16	Razón Nitrato/Nitrito			1	si
Parámetros microbiológicos					
17	Coliformes totales	Coli/100 ml	NMP/100 ml	negativo	si
18	Coliformes fecales	Coli/100 ml	NMP/100 ml	negativo	si
Parámetros físico-químicos					
19	pH	pH		6,5-8,5	si
20	Sólidos disueltos tot.	SDT	mg/l	1500	si
21	Turbidez		UNT	4	si
22	Residuos sólidos filt.			1000	si
Sustancias orgánicas					
23	Benceno		ug/l	10	no

ID	Parámetro	Expresión	Unidad	NCH 409 Agua Potable	Analizado
24	Tetracloroeteno		ug/l	40	no
25	Tolueno		ug/l	700	no
26	Xileno		ug/l	500	no
27	Compuestos Fenólicos		mg/l	0,002	no
Plaguicidas					
28	4, 4DDT +DDD+DDE		ug/l	2	no
29	2, 4-D		ug/l	30	no
30	lindano		ug/l	2	no
31	Metoxicloro		ug/l	20	no
32	Pentaclorofenol		ug/l	9	no
Productos secundarios de la desinfección					
33	Monocloroamina		mg/l	3	no
34	Dibromoclorometano		mg/l	0,1	no
35	Bromodiclorometano		mg/l	0,06	no
36	Tribromometano		mg/l	0,1	no
37	Triclorometano		mg/l	0,2	no
38	Trihalometanos		mg/l	1	no
Características organolépticas					
39	Color verdadero		1 UC Pt-Co	20 UC Pt-Co	no
40	Olor			Inodora	no
41	Sabor			Insípida	no
Parámetros de desinfección y detergentes					
42	Cloro residual		mg/l	0.2-2	no
Elementos radioactivos					
43	Estroncio 90		Bq/l	0,37	no
44	Radium 226		Bq/l	0,11	no
45	Actividad base total		Bq/l	37	no
46	Actividad Beta total		Bq/l	1,9	no
47	Actividad Alfa total		Bq/l	0,55	no
Detergentes					
48	Detergente	SAAM	mg/l	0,5	no

8.5.1 Agua de riego

De los 32 parámetros que evalúa la norma de calidad de aguas para riego, se cumple a cabalidad con la mayoría de ellos. Además en la mayoría de los puntos de muestreo se cumple con los valores máximos permitidos de B, F, pH, Al, Cr, Cu, litio cítricos, Mn, Mo, Va, Zn y C.E., parámetros que presentan menos de 10 puntos de muestreo excedidos. El Cl está sobre la norma en 20 puntos de muestreo.

El Fe está sobre la norma en un 20 de los puntos de muestreo y el Mn en 45 de ellos. En la Figura 8-41 se señalan los puntos de muestreo donde el Fe excede la NCh 1333, resultando que particularmente para la campaña 2, en las cuencas ubicadas en el margen costero hay mayor cantidad de puntos superficiales y pozos que exceden la norma de Fe.

El exceso de Mn en relación a la NCh 1333 (Figura 8-42) señala que las muestras sobre la norma se presentan principalmente en la campaña 2 y nuevamente en el sector costero. El incumplimiento de la norma se produce en los pozos profundos principalmente, concentrados en la subcuenca del lago Villarrica y de Toltén Bajo.

Los coliformes totales están sobre la norma en 108 puntos (>1.000/100 ml en Figura 8-43) y su distribución es bastante aleatoria.

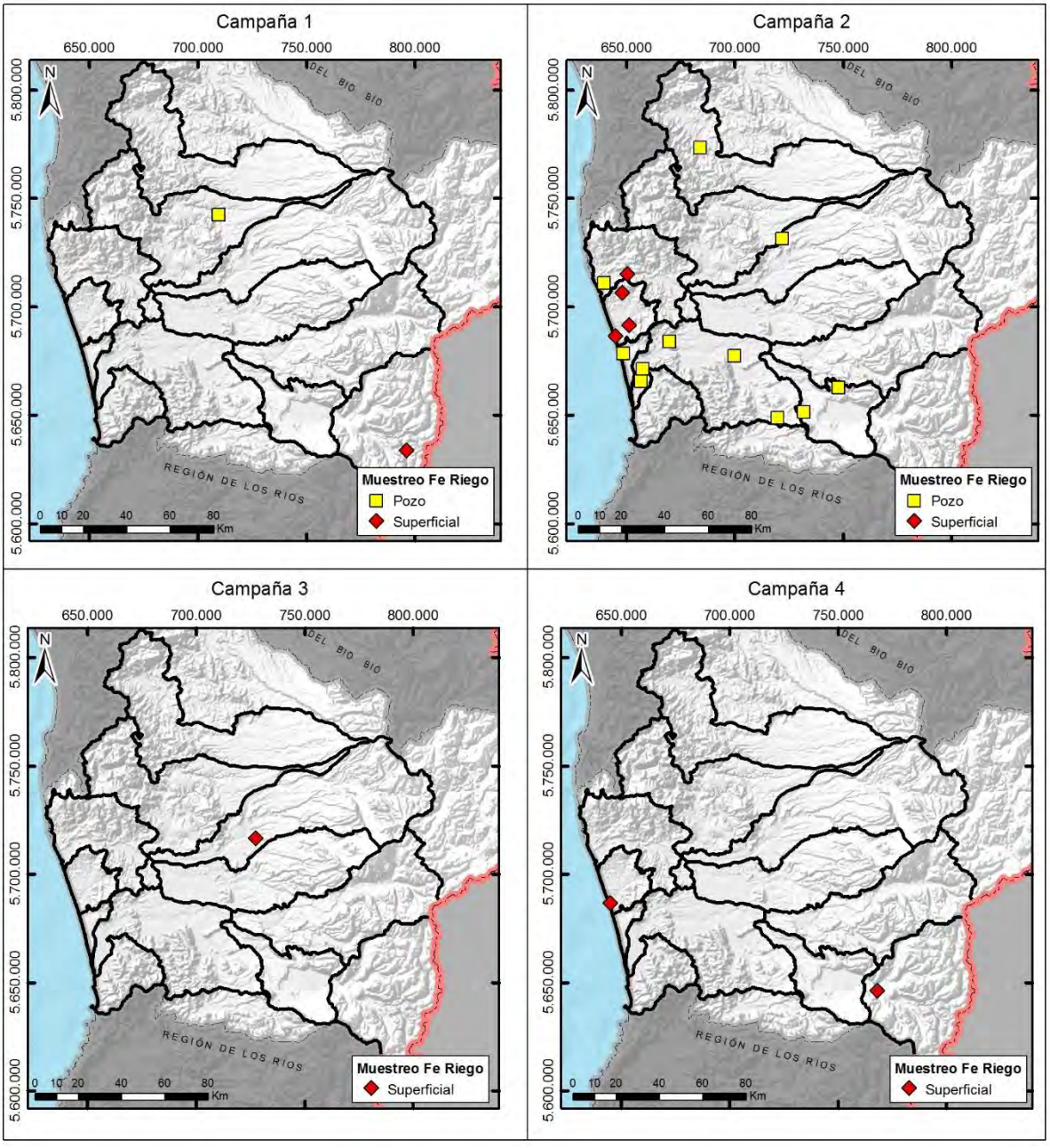


Figura 8-41: Puntos de muestreo que exceden Fe de la NCh 1333.

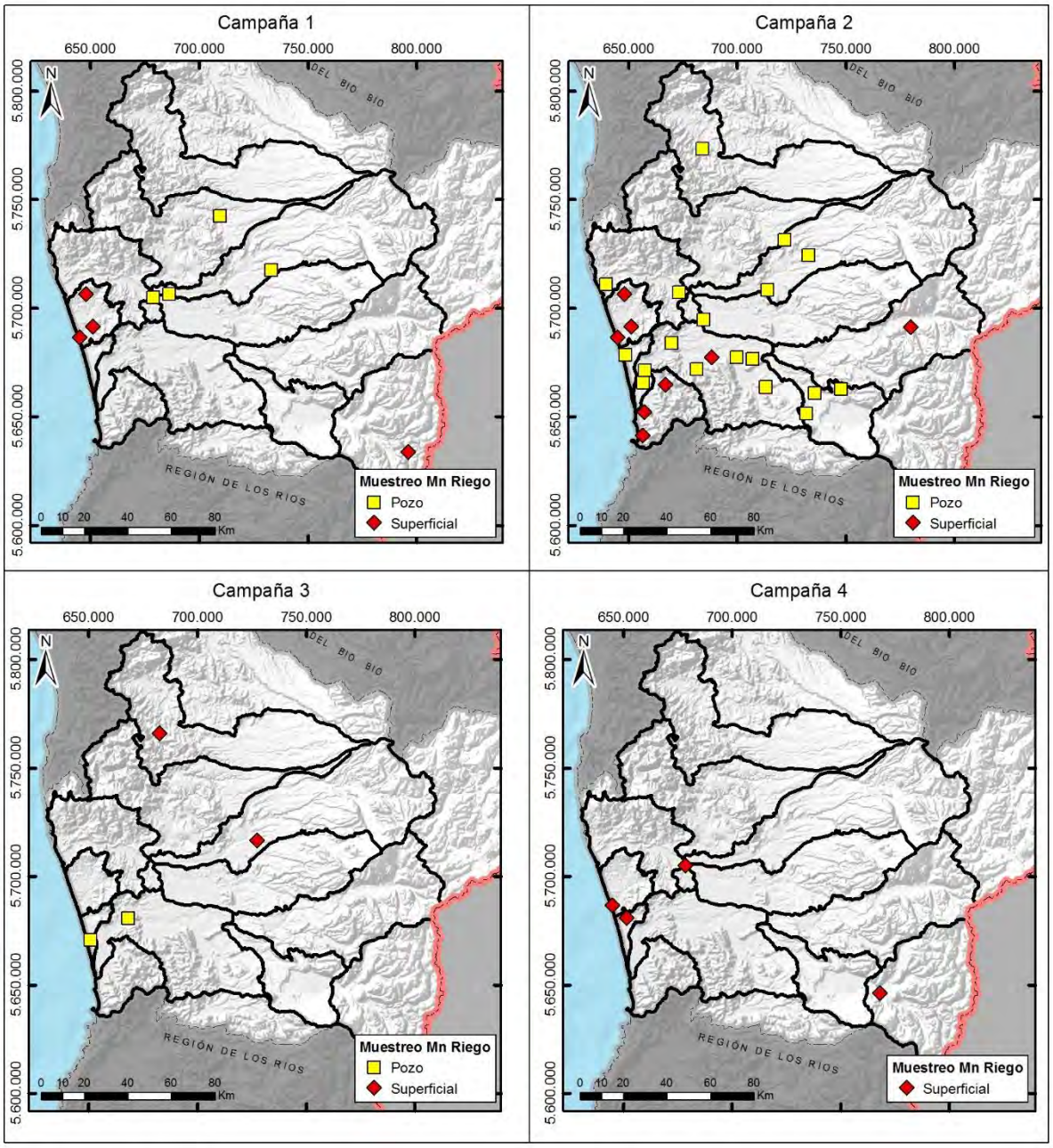


Figura 8-42: Puntos de muestreo que exceden Mn de la NCh 1333.

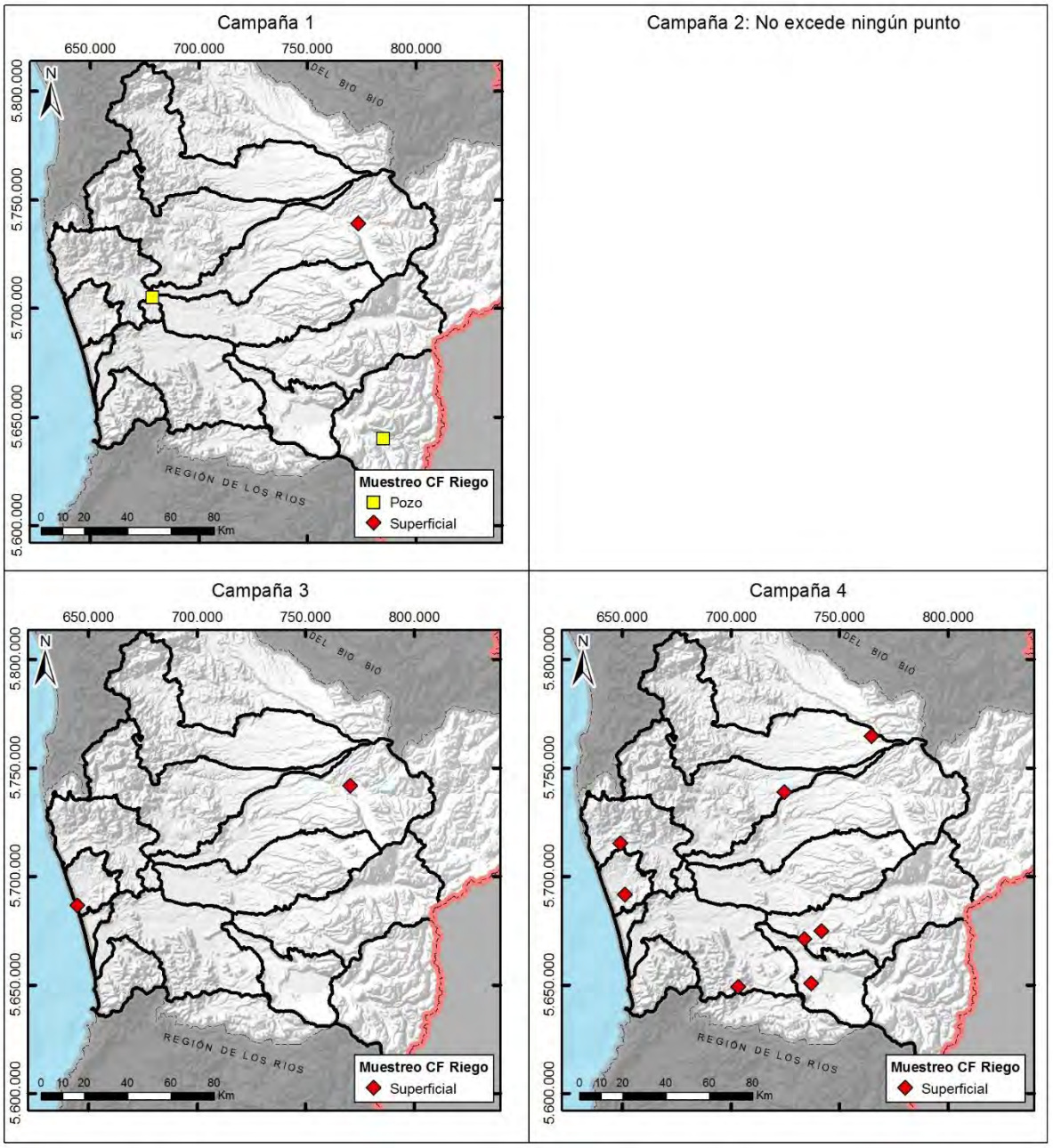


Figura 8-43: Puntos de muestreo que exceden coliformes fecales CF de la NCh 1333.

8.5.2 Agua potable

De la NCh 409 se evaluaron 19 parámetros, cumpliéndose 11 de ellos en todos los puntos de muestreo. En una minoría de los puntos de muestreo se detectó incumplimiento de Cl (16 puntos exceden la norma) y As (en 5 puntos). Las muestras que exceden el Cl se provienen de los alrededores del lago Budi (S-73) y zonas costeras generalmente, por lo que se atribuye a la influencia costera. El As está ligeramente sobre la norma en cinco puntos de la campaña 2: dos de aguas superficiales (sectores Lumaco y Padre las Casas) y dos pozos (sectores Lumaco y Curacautín).

El Fe excede el valor de la norma en casi la mitad de los puntos (245 muestras), mientras que el Mn en un 20% de los puntos (74 muestras).

La distribución espacial de los puntos excedidos (Figura 8-44) indica que el Fe está presente en concentraciones sobre la norma tanto en aguas superficiales como subterráneas, concentrándose en el sector occidental de la región. Esto se detecta en las aguas superficiales de las cuatro campañas.

Para el Mn (Figura 8-45) se reconocen las mayores concentraciones en los puntos superficiales cercanos a la costa y los sectores de Lumaco, Perquenco, Melipeuco y noroeste del lago Villarrica. También en los pozos profundos de la cuenca del Toltén.

La norma exige la ausencia de CF y CT para el uso potable del agua. Algunos parámetros microbiológicos fueron detectados en más de la mitad de los puntos, en particular coliformes fecales (CF: 359 muestras) y coliformes totales (CT: 399 muestras). La presencia de estos parámetros se reconoció tanto en puntos superficiales como en pozos (Figura 8-46).

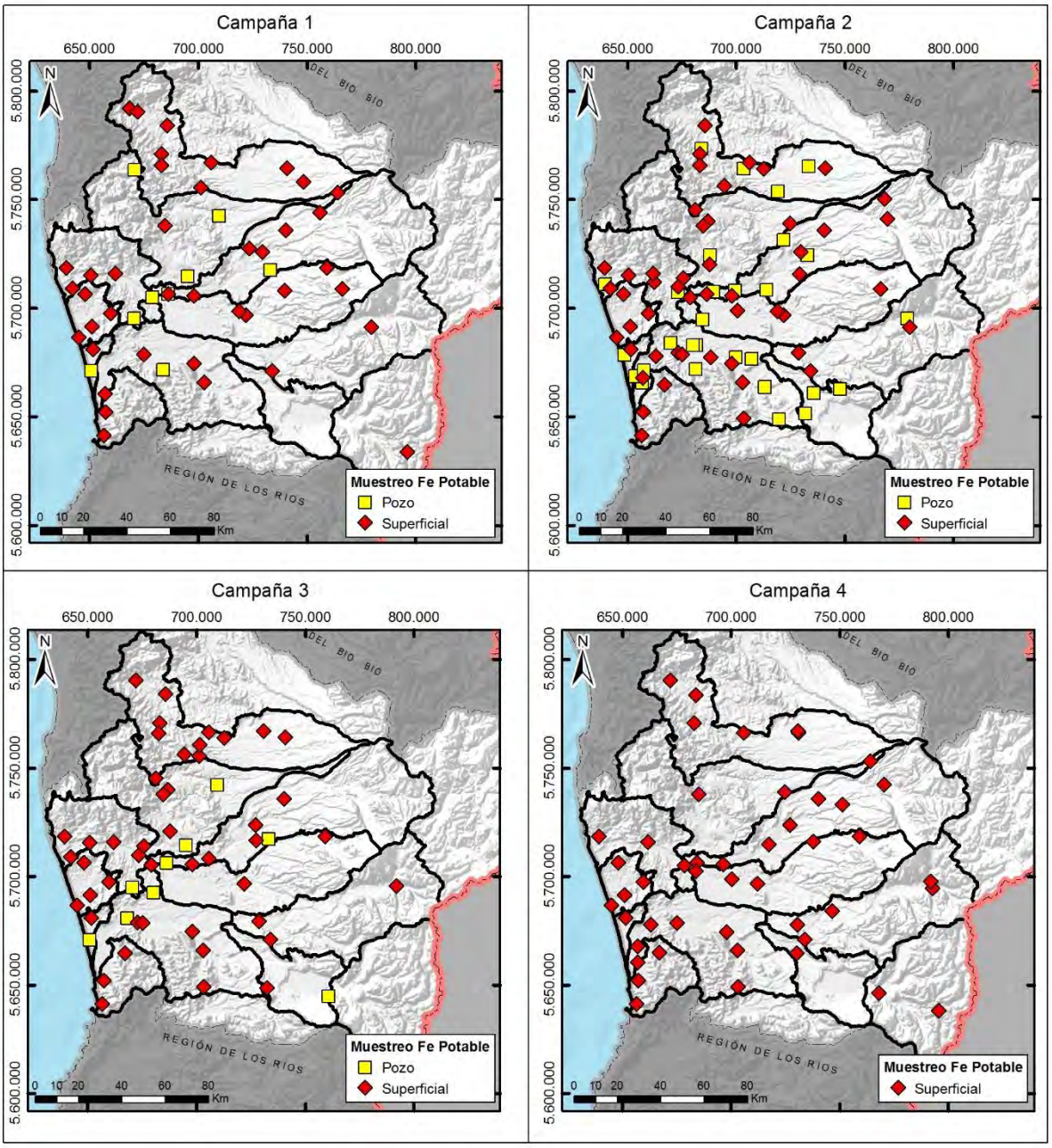


Figura 8-44: Puntos de muestreo que exceden Fe de la NCh 409.

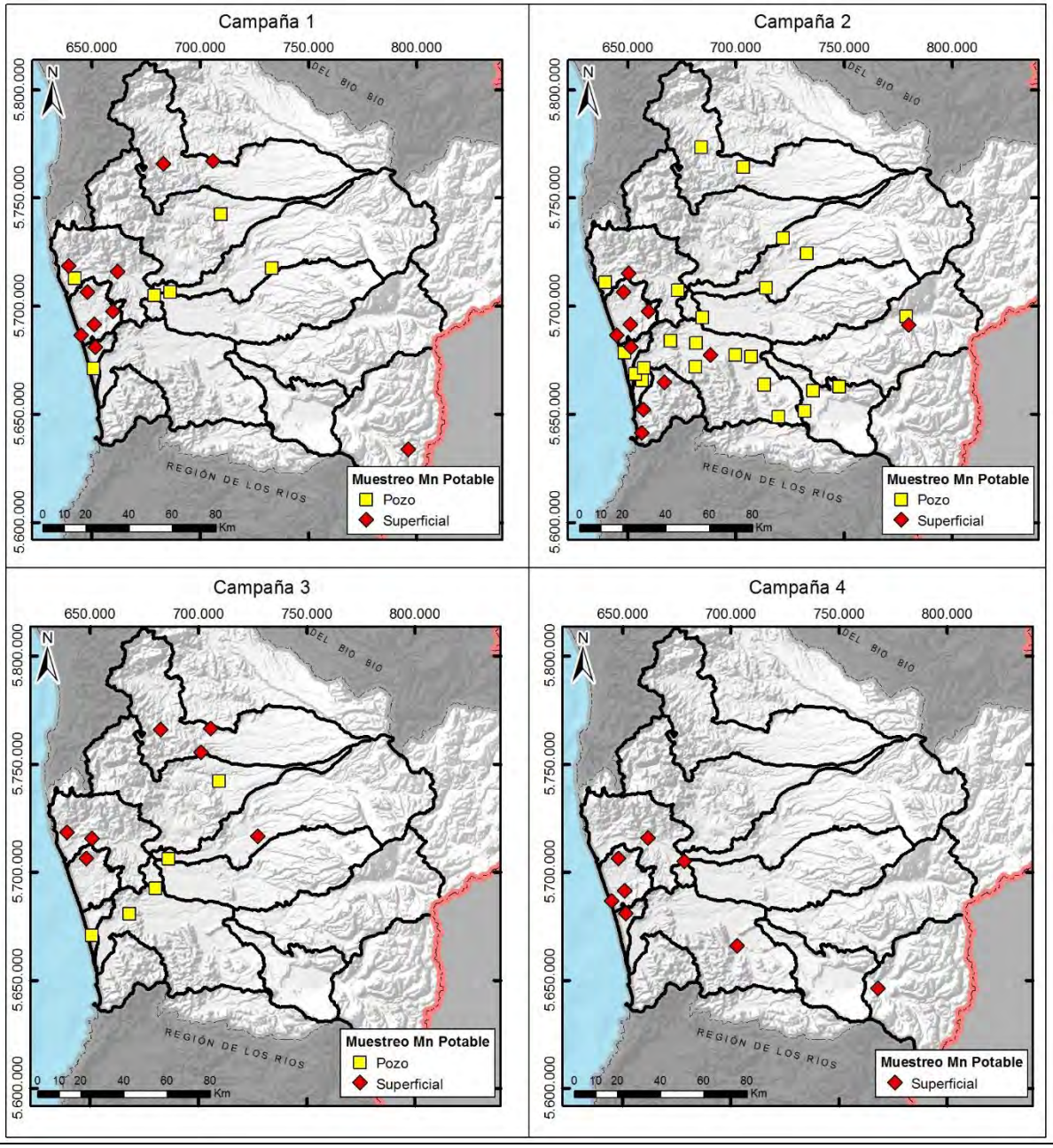


Figura 8-45: Puntos de muestreo que exceden Mn de la NCh 409.

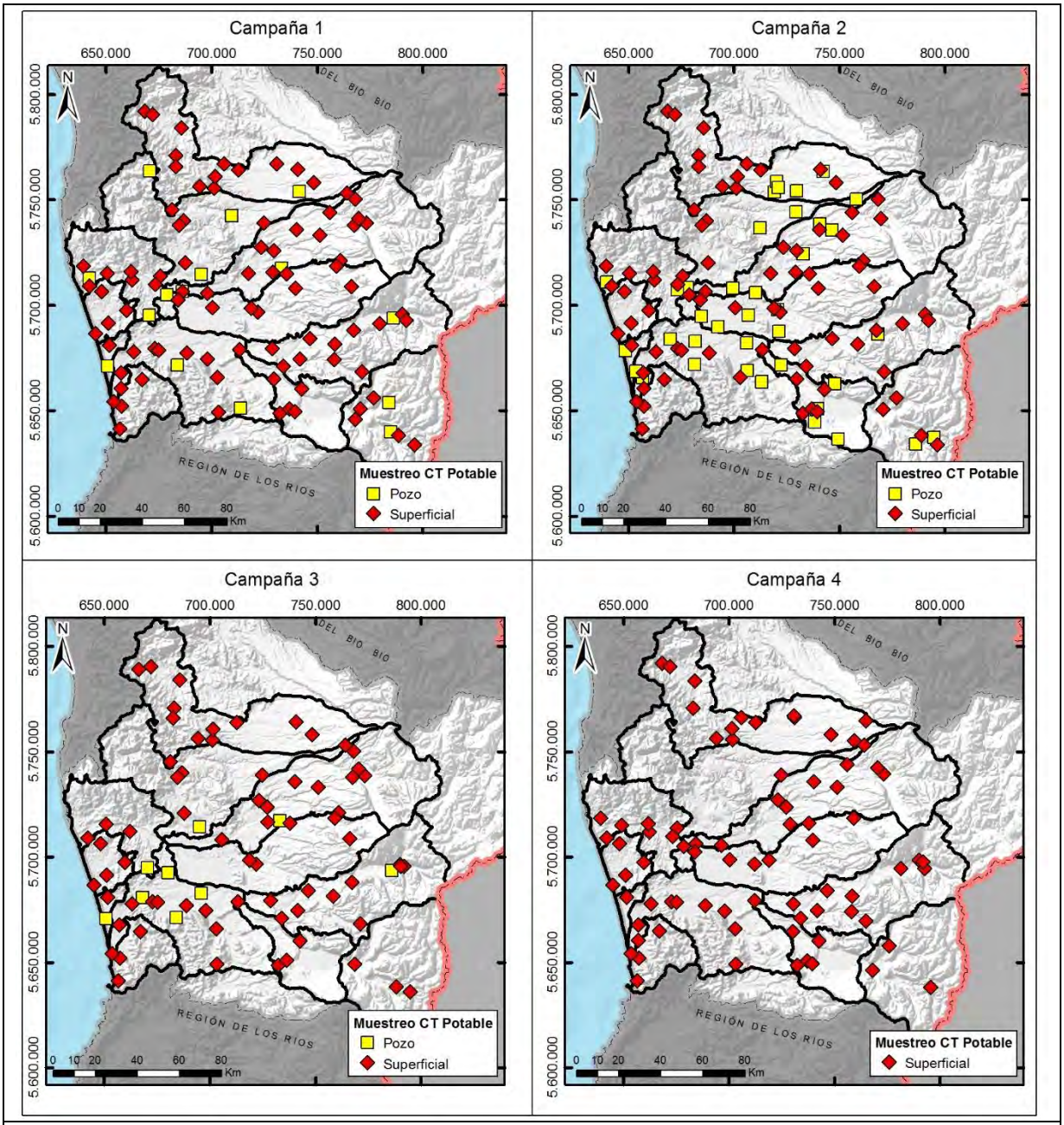


Figura 8-46: Puntos de muestreo que exceden coliformes totales CT de la NCh 409.

8.6 ESTIMACIÓN DE LA RECARGA UTILZIANDO CL ATMOSFÉRICO

Es posible estimar la recarga del acuífero conociendo la cantidad de Cl atmosférico que se deposita en el terreno cuando se conoce también el contenido de Cl presente en el agua de recarga. Este método es bastante simple y conocido, no obstante está asociado a ciertas incertidumbres que deben ser tomadas en cuenta y el resultado considerarse como un rango de referencia para la tasa de recarga. Para obtener el contenido de Cl en el agua de recarga se puede muestrear la parte superior del nivel freático (Custodio E. , 2010).

8.6.1 Marco teórico

Se considera que la precipitación constituye la principal fuente de recarga, que corresponde a la fracción de agua que no sufre evapotranspiración y se infiltra por la zona vadosa hasta el nivel freático. Este proceso involucra un lapso de tiempo en el que parte de la precipitación es almacenada por el suelo, evaporada o capturada por las plantas, mientras que el resto del agua llega hasta el agua subterránea.

La precipitación es una fuente de Cl que se encuentra disuelto en el agua y presente también en el polvo atmosférico. El Cl se comporta como un elemento conservativo, que permanece en el agua hasta concentraciones de 300 g/l, por lo que incluso en verano se encontrará disuelto en climas que no sean extremadamente áridos. Por eso se considera un trazador ideal, presente en concentraciones suficientes para ser detectado utilizando el método analítico adecuado.

Este método ha sido utilizado para estimar la recarga a largo plazo asumiendo los siguientes supuestos (Alcalá & Custodio, 2012):

- Precipitaciones promedio constantes, al igual que tasas de recarga y aporte de Cl constante.
- No hay otra fuente significativa de aporte de Cl al agua subterránea de origen natural o antrópico.
- El Cl que se almacena en la zona no saturada no cambia durante el período de balance ni se producen precipitados salinos
- La retención de Cl por parte de la materia orgánica no altera el cálculo de la recarga a largo plazo, aunque esto podría ser considerable dependiendo de los tipos de uso de suelo.
- El contenido de Cl en el nivel del agua subterráneo no sufre cambios significativos por difusión ni dispersión significativa. Además el intercambio aniónica del suelo es despreciable para el muestreo del nivel freático.
- El tiempo de percolación es relativamente corto a través de la zona vadosa, impidiendo así cambios por efecto del clima o cambios importantes en el uso de suelo, aunque esto puede no ser cierto para tiempos de percolación muy largos como puede ocurrir por ejemplo en zonas áridas donde el nivel freático está muy profundo.
- El número de años considerados es lo suficientemente largo para que los valores promedio no estén influenciados por períodos outliers.

La mayoría de estos supuestos pueden aplicarse a este estudio, guardando la proporción del tiempo de registro que en esta estimación sólo considera datos puntuales y no una serie de datos.

Se instalaron colectores de precipitación en 19 puntos de la región de la Araucanía para obtener muestras de lluvia y medir isótopos estables y concentración de Cl con el método de cromatografía iónica, cuyo LD es 0,2 mg/l.

El balance hídrico y de cloruros se estima mediante la relación:

$$P = R + ES - IES + \Delta S + CR + E$$

$$P \cdot C_P = R \cdot C_P + ES \cdot C_{ES} + IES \cdot C_{ESI} + \Delta SC + CR \cdot C_R + F$$

P precipitación medida en terreno

R recarga a través de la "root zone"

ES escorrentía superficial local

ESI escorrentía superficial proveniente de otras áreas que contribuye a la infiltración local

ΔS variación de humedad en la "root zone"

CR recarga directa a través de fracturas

E evapotranspiración, compuesta por vapor libre de Cl

C_P concentración de Cl en precipitaciones

C_R concentración de Cl promedio en el agua de recarga

C_{ES} concentración de Cl promedio en la escorrentía superficial local

C_{IES} concentración de Cl promedio en la escorrentía superficial externa

ΔSC aumento del almacenamiento

C_{CR} concentración de Cl promedio en el agua que pasa directo a través de fracturas

F otras fuentes de cloruro, como minerales o precipitados salinos en climas áridos. Se puede descartar.

Cuando el balance considera largos períodos de tiempo bajo condiciones climáticas y de cobertura vegetal estable, se cancelan los términos relacionados al suelo y la zona no saturada (escorrentía superficial proveniente de otras áreas, variación almacenamiento "root zone" y evapotranspiración).

Para el total de Cl depositado "A" se utiliza la expresión:

$$A = P \times C_P$$

A se refiere a la duración de los eventos de precipitación por intervalos de tiempo (diarios, mensuales).

$$R = \frac{\sum A_i - \sum(E_{Si} \times C_{ESi})}{\overline{C_R}}$$

$$\bar{R} = \sum_{.}^{n} A_i/(n \times \overline{C_R}$$

El valor de R se estima para condiciones en que el nivel freático del acuífero permite la presencia de una zona vadosa con espesor suficiente.

8.6.2 Metodología y resultados

Se instalaron 19 pluviómetros para tomar muestras de isótopos y Cl. Además se midió el volumen de agua caída en cada uno de ellos.

Las muestras recolectadas van desde los meses de agosto a octubre, con un período de recolección que va desde 12 a 82 días.

1. Con el volumen medido en cada colector y el área del embudo (0,01766 m^2) se calcula el volumen de precipitación (P) caída durante el período en que estuvo instalado el colector.
2. Con este valor y el Cl medido en cada muestra se calcula A (Tabla 8-4).
3. Para obtener el valor del Cl en el agua de recarga se utilizaron pozos someros ubicados cerca de los pluviómetros que tuvieran valores de Cl representativos del acuífero, i.e. sin interferencia de fuentes antrópicas y que estuvieron ranurados a una profundidad suficiente.
4. Se calcula la recarga (R) como la razón entre A y el Cl de los pozos someros obteniendo distintos valores.
5. Considerando que se trata de cálculos estimativos, se determinó el porcentaje de la precipitación que representa la recarga, obteniendo rangos entre 2% y 7%. En formaciones de baja permeabilidad tales como el basamento (PP-5 y PP-6) se obtuvieron tasas de 1-2%, mientras que en unidades permeables como los depósitos no consolidados actuales, se obtuvieron tasas de recarga de 13 a 22% (Tabla 8-5).

Tabla 8-4: Datos obtenidos de los colectores de precipitaciones

Station ID	Sample ID	Fecha instalación	Fecha retiro	Nº días	Volumen colector	Pp	Cl	A (Pp*Cl)
					m3	mm	mg/l	mm*(mg/l)
PP-1	PP-1-2	08/09/2014	20/10/2014	42	-	-	6,07	-
PP-2	PP-2-2	09/09/2014	03/10/2014	24	0,0010	56,63	0,84	47,57
PP-3	PP-3-2	25/09/2014	28/10/2014	33	0,0045	254,81	0,72	183,47
PP-4	PP-4-2	15/09/2014	28/10/2014	43	0,0050	283,13	1,26	356,74
PP-5	PP-5-2	09/09/2014	29/10/2014	50	0,0025	141,56	4,89	692,24
PP-6	PP-6-2	23/09/2014	11/10/2014	18	0,0008	45,30	0,71	32,16
PP-7	PP-7-2	10/09/2014	04/10/2014	24	0,0008	42,47	1,86	78,99
PP-8	PP-8-2	10/09/2014	04/10/2014	24	0,0012	67,95	0,58	39,41
PP-9	PP-9-2	10/09/2014	04/10/2014	24	0,0015	84,94	0,45	38,22
PP-10	PP-10-2	06/08/2014	28/10/2014	82	0,0070	396,38	8,72	3456,40

Station ID	Sample ID	Fecha instalación	Fecha retiro	Nº días	Volumen colector	Pp	Cl	A (Pp*Cl)
					m3	mm	mg/l	mm*(mg/l)
PP-11	PP-11-2	08/09/2014	29/10/2014	51	0,0015	84,94	4,41	374,58
PP-12	PP-12-2	23/09/2014	11/10/2014	18	0,0008	45,30	0,75	33,98
PP-13	PP-13-2	29/09/2014	11/10/2014	12	0,0006	33,98	0,47	15,97
PP-14	PP-14-2	09/09/2014	03/10/2014	24	0,0009	50,96	0,37	18,86
PP-15	PP-15-2	08/09/2014	20/10/2014	42	-	-	3,96	-
PP-16	PP-16-2	08/09/2014	20/10/2014	42	0,0023	130,24	3,61	470,16
PP-17	PP-17-2	09/09/2014	29/10/2014	50	0,0018	101,93	4,34	442,36
PP-18	PP-18-2	08/09/2014	20/10/2014	42	0,0035	198,19	2,1	416,19
PP-19	PP-19-2	23/09/2014	11/10/2014	18	0,0010	56,63	0,49	27,75

Tabla 8-5: Cálculo de recarga utilizando Cl en pozos someros cercanos de campaña 1

Station ID	Sample ID	Pozo somero	Unidad HG	Cl C1	A	R1 (A/Cl)	Pp/R
				mg/l	mm*(mg/l)	mm	
PP-1	PP-1-2	-	-	-	-	-	-
PP-2	PP-2-2	-	-	-	47,57	-	-
PP-3	PP-3-2	O-144	-	2,68	183,47	11,04	4%
PP-4	PP-4-2	O-227	-	2,95	356,74	19,50	7%
PP-5	PP-5-2	O-248	Basamento	40	692,24	2,79	2%
PP-6	PP-6-2	T-1	Basamento	16,3	32,16	0,32	1%
PP-7	PP-7-2	O-270	Dep. volc. sed.	2,6	78,99	4,90	12%
PP-8	PP-8-2	-	-	-	39,41	-	-
PP-9	PP-9-2	-	-	-	38,22	-	-
PP-10	PP-10-2	O-125	Dep. NC act.	6,52	3456,40	85,50	22%
PP-11	PP-11-2	P-30	Dep. NC act.	5,34	374,58	11,31	13%
PP-12	PP-12-2	O-247	Dep. volc. sed.	4,43	33,98	1,24	3%
PP-13	PP-13-2	O-49	Dep. volc. sed.	2,75	15,97	0,94	3%
PP-14	PP-14-2	O-243	Sec. volc.	3,45	18,86	0,88	2%
PP-15	PP-15-2	-	-	-	-	-	-
PP-16	PP-16-2	-	-	-	470,16	-	-
PP-17	PP-17-2	-	-	-	442,36	-	-
PP-18	PP-18-2	-	-	-	416,19	-	-
PP-19	PP-19-2	-	-	-	27,75	-	-

8.7 ANÁLISIS ISOTÓPICO

8.7.1 Metodología

Para capturar las precipitaciones se instalaron colectores de precipitaciones líquidas como el de la Figura 8-47. Cada colector tiene un bidón de 10 l de capacidad, un embudo de 15 cm de diámetro y una manguera conectada al embudo. El máximo a capturar por el bidón y el embudo es de cerca de 500 mm de precipitaciones. Para evitar la evaporación, que altera la composición isotópica original de las aguas de precipitación, se aplica una capa de vaselina líquida de 300 cc aproximadamente que flota por sobre el agua, evitando la evaporación de las mismas por el tiempo que se mantienen almacenadas esperando su recolección.

Figura 8-47: Colector de precipitaciones instalado en terreno.

Además se han tomado 19 muestras de precipitaciones para análisis de Cl con metodología cromatografía iónica que permite un límite de detección de 0,2 mg/l.

8.7.2 Resultados

En la Figura 8-48 se muestra la relación isotópica $\delta^{18}O$-$\delta^{2}H$ de todas las muestras obtenidas en este estudio durante los meses de agosto a octubre de 2014, donde se incluyen muestras de escorrentía, de pozos clasificados según su profundidad y de precipitaciones. Los períodos de acumulación del agua precipitada son variables, pero concentrados en los meses de septiembre y octubre de 2014 (Tabla 8-4), por lo que los resultados, análisis e interpretaciones acá presentados no consideran efectos de variación estacional de las precipitaciones. Se incluye a modo de referencia la línea de aguas meteóricas mundial (LAMM; $\delta^{2}H=8\delta^{18}O+10$; Craig, 1961).

Los valores de $\delta^{18}O$ están entre -10,7 ‰ y -3,8 ‰ y de $\delta^{2}H$ entre -72,1 ‰ y -26 ‰. Todas las aguas, independiente de su origen, se ubican muy cercanas a la LAMM, lo que indica que no ocurren procesos de fraccionamiento isotópico importantes posteriores a la precipitación, siendo la composición isotópica de las aguas representativa del agua de

recarga. Esto último es acorde a la baja salinidad y composición bicarbonatada, de origen atmosférico, de prácticamente la totalidad de las aguas de este estudio. Como primera aproximación a la composición isotópica de las lluvias locales se presenta una regresión lineal para los datos de precipitación (19 muestras) que entrega una recta: $\delta^2H=7,5\delta^{18}O+7,1$ con un $R^2=0,91$.

Los resultados de los análisis isotópicos de la campaña 4 (Figura 8-49), indican que la relación $\delta^{18}O$-δ^2H (‰) no varía mayormente para aguas superficiales en distintos períodos del año.

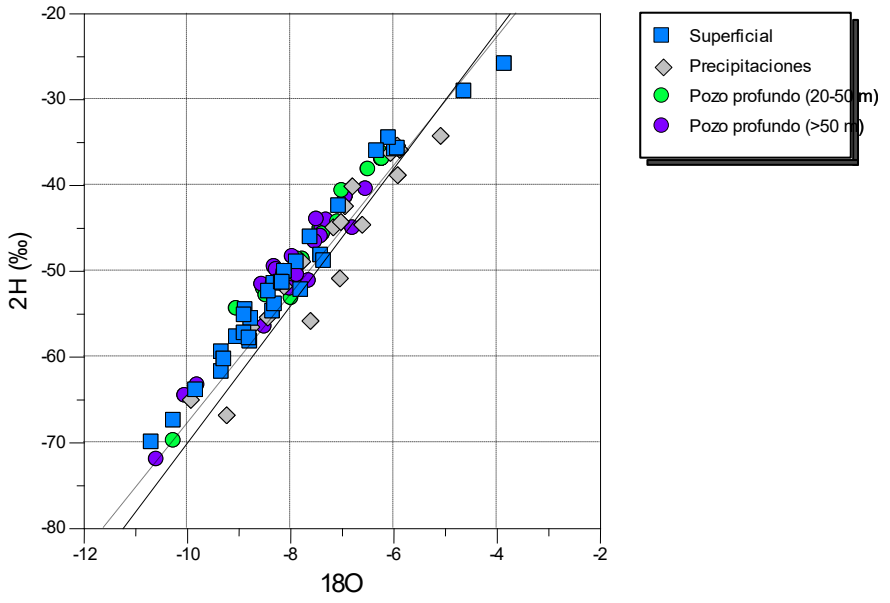


Figura 8-48: Relación isotópica δ18O-δ2H (‰) para muestras de precipitación, agua superficial y pozos profundos de campaña 2.

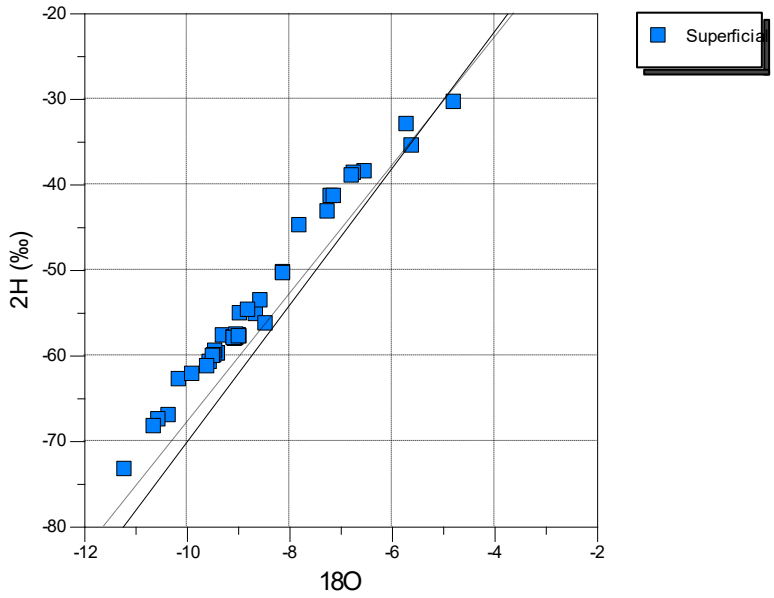


Figura 8-49: Relación isotópica δ18O-δ2H (‰) para muestras de agua superficial de campaña 4.

En la Figura 8-50 se muestra la relación entre la composición isotópica y la altitud de recolección de las muestras de precipitaciones. Se aprecia que existe una buena correlación entre ambos (R^2=0,7) mostrando que se produce un empobrecimiento isotópico (la composición isotópica se hace más ligera) con el aumento de la altitud. A partir de esta relación se puede obtener un gradiente isotópico de -0,55 ‰ cada 100 m para el $\delta^{18}O$ y de -4,4‰ cada 100 m para el $\delta^{2}H$, valores muy similares a los obtenidos por Ohlanders et al. (2013) en testigos de hielo en los Andes Centrales. La importancia de esta relación está en su utilidad en la determinación de las principales zonas de recarga del sistema de aguas subterráneas, así como superficiales.

En la Figura 8-51 se observa que una gran cantidad de las muestras obtenidas se acercan a la relación planteada, indicando que la infiltración y recarga al acuífero se produce localmente. Existen algunas muestras, principalmente de aguas superficiales que indicarían una recarga a altitudes mayores al punto donde fueron recogidas, lo que es esperable, y otras indicarían aportes del acuífero recargado a mayores altitudes. Un buen ejemplo se puede apreciar con las muestras de los ríos Allipén y Toltén, donde S-45 se encuentra en la cabecera, aguas abajo se encuentran S-50, S-55, S-59 y por último S-62 en la costa. La primera muestra (S-45) indicaría una recarga a una altitud media entre los 700 y 800 m s.n.m. y el resto de las muestras indicarían aportes adicionales de agua superficial o del acuífero recargadas a alturas menores. Respecto a los aportes de agua del acuífero, la muestra S-24 (175 m s.n.m.) es un buen ejemplo, ya que proviene de un afluente menor del río Cautín, el cual se forma debido al afloramiento de aguas del acuífero que habrían sido recargadas a una altitud media de 600 m s.n.m. Al comparar la muestra S-27 (60 m s.n.m.) con S-29 (270 m s.n.m.), ambas del río Cautín, se observa que la que se encuentra aguas abajo indica una recarga a mayor altitud, lo que se puede interpretar debido a un aporte importante de agua del acuífero al río (río ganador), donde la recarga media se habría producido a mayor altitud.

Respecto al agua subterránea, en pozos como el O-299, la recarga se habría producido a una altura media cercana a los 800 m s.n.m., similar al pozo O-186, mientras que el pozo O-222, coherente con su ubicación, a una altura media de 400 m.s.n.m. Al respecto es importante aclarar que conceptualmente la recarga, al tratarse de acuíferos libres, se produciría según un modelo de mezcla exponencial, donde en el punto de recolección de la muestra, en este caso pozos, se mezclan una serie de líneas de flujo recargadas a distinta altitud, tal como se muestra en el esquema de la Figura 8-52. Es por ello que en la caracterización se habla de zonas de recarga media.

El mayor enriquecimiento de las muestras S-74 y S-73 del lago Budi se interpretan producto de cierto grado de evaporación, ocurrido en el mismo lago o por la mezcla con agua de mar de composición isotópica más pesada.

Un aspecto relevante para darle validez a las expresiones presentadas y gradientes estimados corresponde al estudio de las variaciones estacionales de las precipitaciones, aspecto que no se ha abordado en este estudio, así como en el complemento de estaciones de precipitación en las zonas más elevadas (>600 m s.n.m.).

En la Figura 8-53 se presenta la ubicación de los puntos de muestreo isotópico en relación a las distintas bandas de altura.

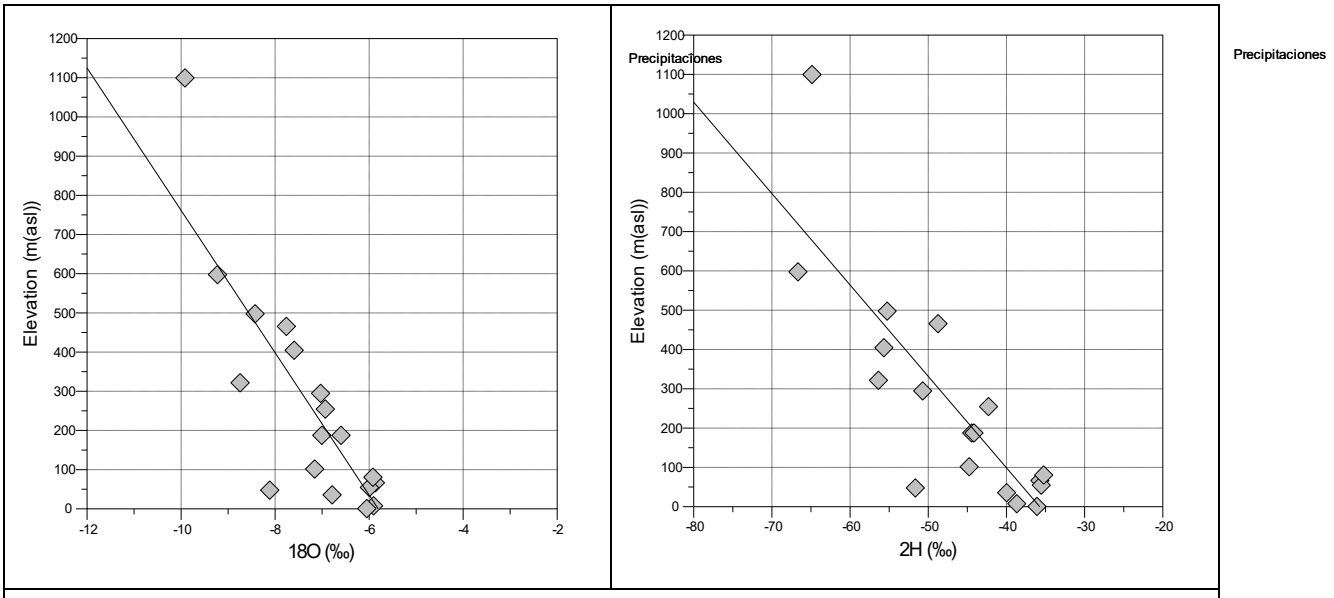


Figura 8-50: Gradiente isotópico ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) altitudinal obtenido de regresión lineal de muestras de precipitaciones.

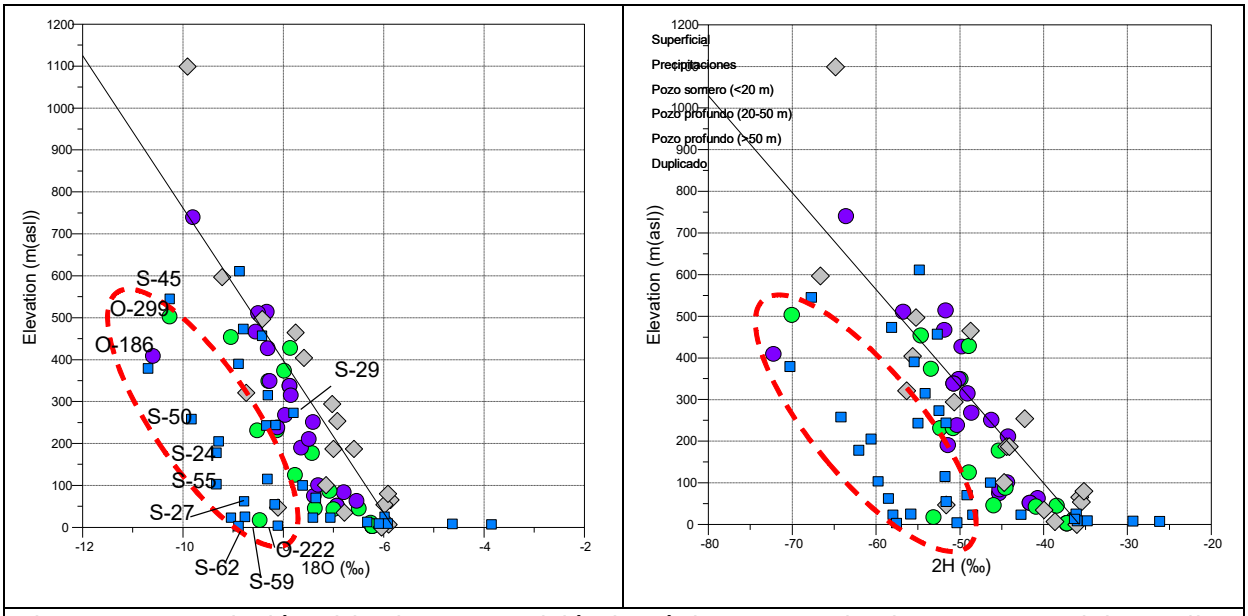
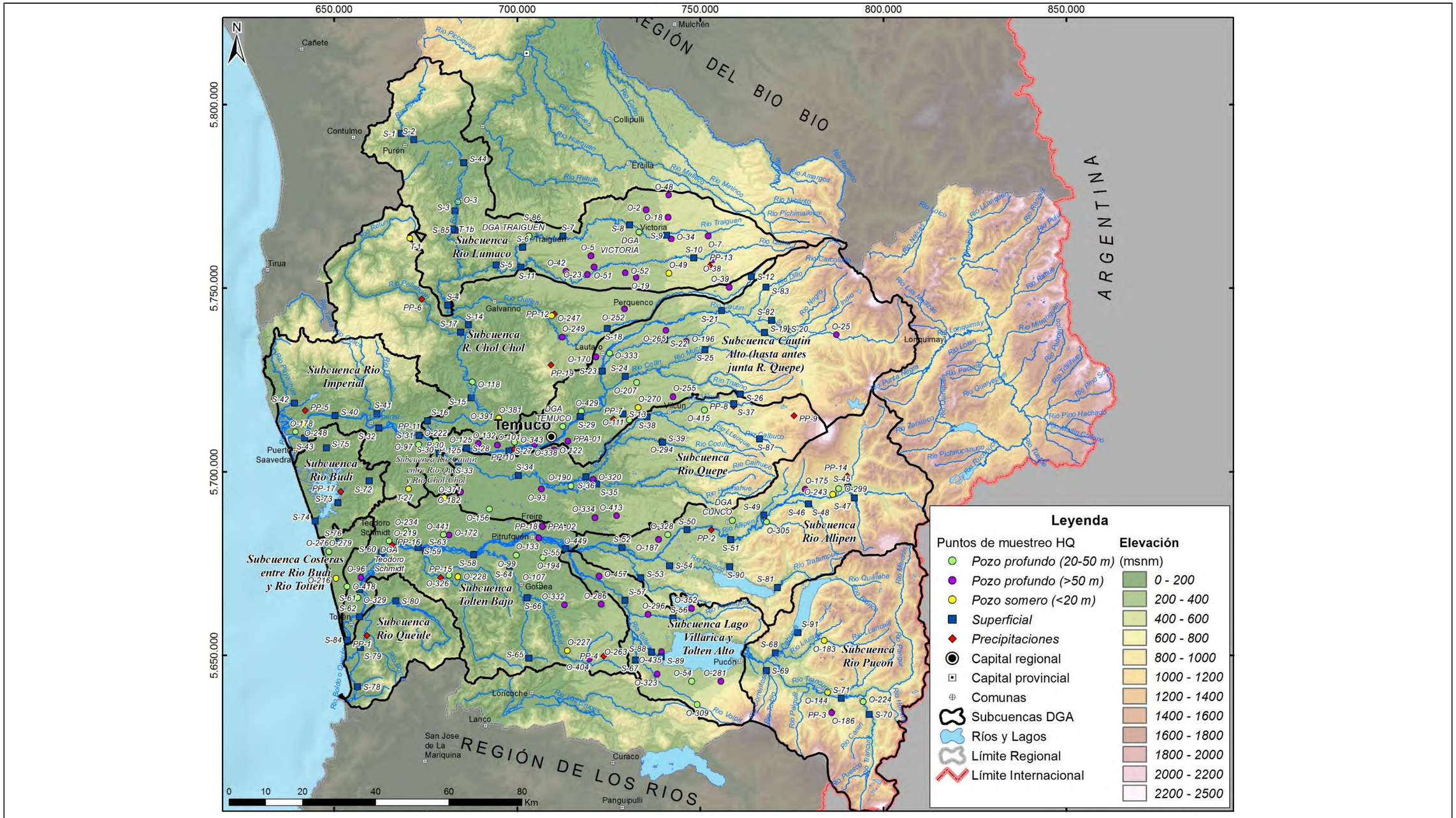


Figura 8-51: Relación altitud y composición isotópica para todas las muestras del estudio. La línea continua indica el gradiente isotópico ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) altitudinal. En línea segmentada roja se muestran las aguas que se habrían recargado a mayor altitud.

Figura 8-52: Esquema de modelo conceptual de flujo con mezcla exponencial.


650.000
700.000
750.000
800.000
850.000
5.800.000
5.750.000
5.700.000
5.650.000
N
REGIÓN DEL BIO BIO
ARGENTINA
REGIÓN DE LOS RIOS
Cañete
Mulchén
Collipulli
Ercilla
Contulmo
Purén
Tirua
Galvarino
Perquenco
Lautaro
Temuco
Victoria
Traiguén
Lumaco
Longuimay
Curacautín
Lonquimay
Vilcun
Cunco
Freire
Pitrufquén
Gorbea
Toltén
Pucón
Loncoche
Lanco
San Jose de La Mariquina
Curaco
Panguipulli
Puerto Saavedra
Teodoro Schmidt
Subcuenca Rio Imperial
Subcuenca Rio Budi
Subcuenca Costeras entre Rio Budi y Rio Toltén
Subcuenca R. Chol Chol
Subcuenca Rio Queule
Subcuenca Tolten Bajo
Subcuenca Rio Lumaco
Subcuenca Rio Traiguen entre Rio Quino y Rio Chol-Chol
Subcuenca Lago Villarica y Tolten Alto
Subcuenca Rio Quepe
Subcuenca Rio Allipen
Subcuenca Rio Pucon
Subcuenca Cautin Alto (hasta antes junta R. Quepe)
DGA TRAIGUEN
DGA VICTORIA
DGA TEMUCO
DGA CUNCO
Rio Picoiquen
Rio Purén
Rio Renaico
Rio Huequen
Rio Rehue
Rio Malleco
Rio Mininco
Rio Traiguen
Rio Lumaco
Rio Pellaifa
Rio Quillen
Rio Cautin
Rio Dillo
Rio Negro
Rio Indio
Rio Carcolmo
Rio Colpi
Rio Colin
Rio Muco
Rio Truful-Truful
Rio Calbuco
Rio Codihue
Rio Llaguepulli
Rio Huichahue
Rio Allipen
Rio Curaco
Rio Quillehe
Rio Lumaco
Rio Blanco
Rio Amargos
Rio Violeta
Rio Pichimallelca
Rio Bureo
Rio Nuble
Rio Laja
Rio Rucapillan
Rio Pulul
Rio Rahue
Rio Mirahuequen
Rio Pichicolo
Rio Trollhue
Rio Pino Solo
Rio Pino Hachado
Rio Malleo Chileno
Rio Zanjuco
Rio Pichirucanuco
Rio Bureuco
Rio Tureo
Rio Longuimay
Rio Lolen
Rio Parcuta
Rio Guayecuil
Rio Punta Negra
Rio Lumaco
Rio Pellaifa
Rio Pilmaiquen
Rio Toltén
Rio Allipen
Rio Trafampulli
Rio Quillehe
Rio Lanco
Rio Pangui
Rio Tranca
Rio Paguil
Rio Caren
Rio Puesco
Rio Voipir
Rio Loncoche
Rio Quepe
Rio Truful-Truful
Rio Colpi
Rio Colin
Rio Muco
Rio Codihue
Rio Llaguepulli
Rio Calbuco
Rio Huichahue
Rio Curaco
Rio Quillehe
Rio Lanco
Rio Pangui
Rio Tranca
Rio Paguil
Rio Caren
Rio Puesco
Rio Voipir
Rio Loncoche
Rio Quepe
Rio Toltén
Rio Allipen
Rio Trafampulli
Rio Quillehe
Rio Lumaco
Rio Blanco
Rio Amargos
Rio Violeta
Rio Pichimallelca
Rio Bureo
Rio Nuble
Rio Laja
Rio Rucapillan
Rio Pulul
Rio Rahue
Rio Mirahuequen
Rio Pichicolo
Rio Trollhue
Rio Pino Solo
Rio Pino Hachado
Rio Malleo Chileno
Rio Zanjuco
Rio Pichirucanuco
Rio Bureuco
Rio Tureo
Rio Longuimay
Rio Lolen
Rio Parcuta
Rio Guayecuil
Rio Punta Negra
Rio Lumaco
Rio Pellaifa
Rio Pilmaiquen
Rio Toltén
Rio Allipen
Rio Trafampulli

8.8 PROPUESTA NUEVAS ESTACIONES DE MONITOREO

La información recolectada en las campañas de muestreo hidroquímico e isotópico permite tener unas visión a nivel regional de la calidad química del agua en las cuencas de los ríos Imperial, Toltén y cuencas costeras incluyendo la del lago Budi. También permite reconocer tendencias en la distribución espacial de los datos, asociadas a la disponibilidad de puntos de muestreo, que facilita el reconocimiento de los sectores con escasa cobertura de información hidroquímica. Estas zonas son potencialmente interesantes para mejorar la caracterización hidrogeológica de la región y se consideran en esta propuesta.

Además se incluye como criterio de selección para las nuevas estaciones de monitoreo, aquellos sectores que por su relevancia para el modelo hidrogeológico, requieren de un mayor detalle en los datos allí disponibles.

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_4 y HCO_3) parámetros físico químicos (TDS, pH, alcalinidad) y datos in situ (CE, pH, Tº, OD).
- Parámetros que influyen en la calidad de las aguas según usos: potable y riego (parámetros considerados por NCh 1333 en Tabla 8-2 y para NCh 409 en Tabla 8-3).

Considerando la ubicación de los pozos de monitoreo DGA y la red de monitoreo de calidad de aguas superficiales, se sugiere la implementación de puntos de monitoreo subterráneo en 8 sectores de la región. Además se sugiere complementar la red de aguas superficiales en 5 puntos (Figura 8-54).

8.9 CONCLUSIONES

La composición química de las aguas superficiales y subterráneas de las cuencas estudiadas en la región de La Araucanía 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. En el interior de la región, no se aprecian diferencias importantes en la composición de las aguas ya que son 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 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.

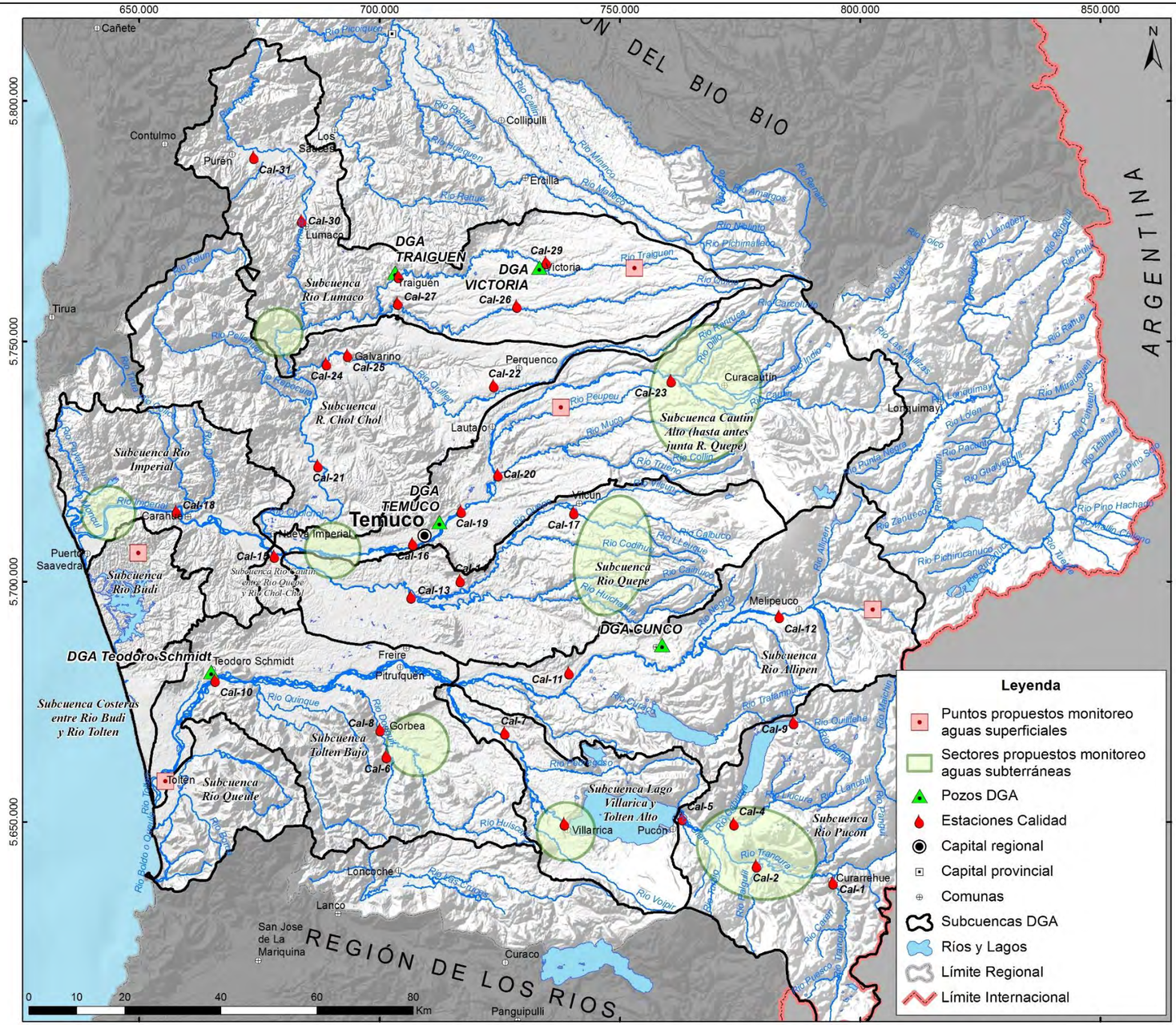


Figura 8-54: Sectores propuestos para ampliar red de monitoreo actual.

El origen de los iones cloruro y sodio que se manifiesta en los sectores costeros se atribuye a la influencia del aerosol marino, cuyo dominio se aprecia claramente en las aguas superficiales de las muestras de las cuencas costeras y de los ríos Budi y Queule, así como en la desembocadura del río Imperial. Este factor aporta mayores concentraciones de Cl y Na en la atmósfera y el medio ambiente, por lo que luego son incorporados a las aguas superficiales y subterráneas a través de las precipitaciones, lo que incidirá en el aumento de estos iones respecto al HCO_3 y Ca, que conforman la otra facies dominante. Este fenómeno se grafica en la Figura 8-55, donde el eje x representa las coordenadas UTM Este en m como un indicados de la cercanía al mar en las muestras cuya concentración de cloruro es más elevada. Se distingue un grupo de aguas superficiales que serían las más afectadas por el fenómeno.

Si bien no es clara una relación entre la composición de las aguas y la litología, se espera que ésta constituya un factor determinante en la composición de las aguas. La meteorización de silicatos aporta distintas proporciones de cationes. Es por ello que variaciones en las concentraciones relativas de Ca y Na también podrían estar influenciadas por este proceso.

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_2 del suelo.

Adicionalmente, se observa una buena correlación entre el Ca y el HCO_3 en el acuífero, de lo que preliminarmente se infiere que una parte de estos iones podría estar asociada a la disolución de carbonato de calcio.

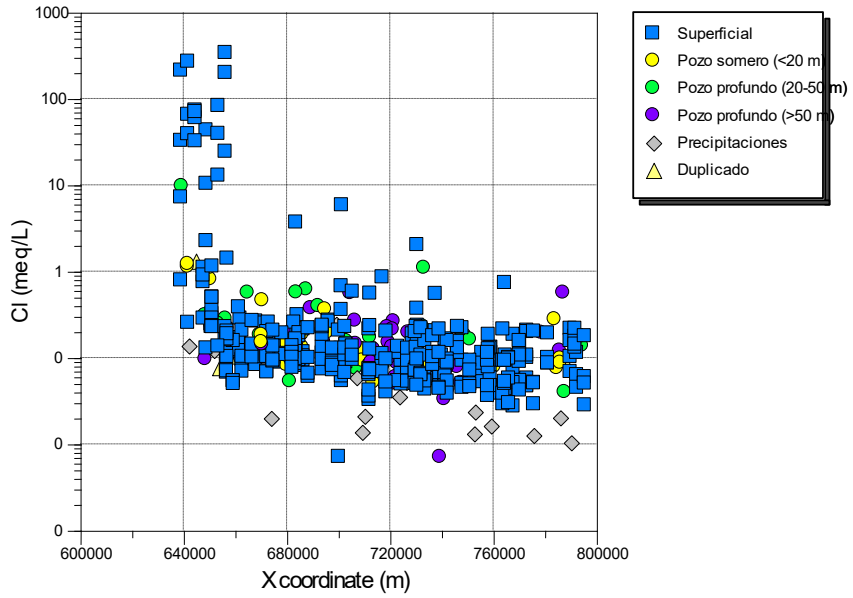


Figura 8-55: Efecto de la cercanía al mar en la salinidad de las muestras hidroquímicas.

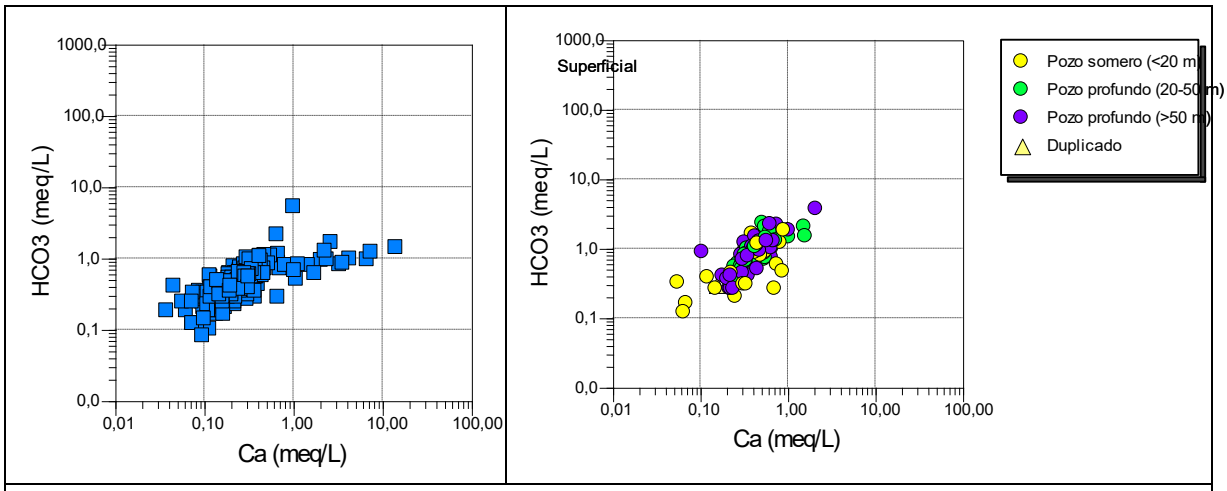


Figura 8-56: Relación Ca y HCO3 para aguas superficiales (izq.) y subterráneas (der.).

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 las siguientes excepciones:

- Los parámetros que exceden la norma de manera significativo son el Fe y en menor medida el Mn. La ubicación de los puntos que exceden el límite máximo para ambos se ubica preferentemente en la costa, por lo que podría asociarse al aporte de estos elementos producto de la lixiviación del basamento costero. No se asocia directamente con el aumento en la salinidad ya que la mayoría de estos puntos fueron muestreados en la campaña 2 (invierno).
- Algo diferente ocurre con los parámetros microbiológicos, ya que los CF y CT no muestran una distribución geográfica preferencial, sino que se presentan de forma homogénea por toda la región. Su origen se asocia a actividades como ganadería y centros poblados, y no guarda relación con las características geológicas del medio.

Mediante la estimación de la recarga se obtuvieron distintos rangos según la permeabilidad de cada tipo de unidad, resultando como promedio una tasa de recarga estimada entre 2 y 7% lo que es coherente con el valor estimado en el modelo.

Además se concluye que la recarga ocurre tanto localmente como en zonas más elevadas, ya que la correlación del $\delta^{18}O$ y el $\delta^{2}H$ (‰) con la altura, indica que un grupo de muestras se ubica bajo el gradiente isotópico de las lluvias por lo que se asocia con la razón isotópica de aguas precipitadas a mayor altura.

Finalmente se proponen ocho sectores para mejorar la cobertura de los puntos de medición de calidad y niveles de aguas subterráneas, junto con cinco estaciones de monitoreo de aguas superficiales. Se sugiere considerar los parámetros físico químicos y datos in situ, así como todos los elementos mayores (Na, Mg, Ca, Cl, SO_4 y HCO_3) con el fin de dar sustento a cualquier análisis hidroquímico básico. Según las conclusiones de este informe también se recomienda analizar especialmente Fe y Mn para el uso del agua y en lo posible los parámetros de calidad exigidos por las normas de agua potable y de riego.

9 CONCEPTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Este capítulo presenta la conceptualización hidrogeológica del área de estudio, la que se basa en las descripciones geológicas tanto de superficie, como de subsuperficie. La geología de superficie fue carcaterizada en base a las cartas geológicas disponibles, mientras que lageología de subsuperficie se analizó considerando las descripciones estratigráficas de captaciones de aguas subterráneas en la región.

Se incluye la descripción de las unidades hidrogeológicas conceptualizadas considerando su litología; además, se presenta la construcción del modelo hidrogeológico en 3D, generado en base a la geología de subsuperficie como de las campañas geofísicas (TEM y gravimetría). Se presenta la piezometría del área de estudio para captaciones someras (menor a 20 m de profundidad) y profundas (mayor a 20 m de profundidad), un resumen de las propiedades hidráulicas de cada unidad en base al análisis de pruebas de bombeo y una sisntesis hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas.

9.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

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, Depósitos Consolidados, Rocas Volcánicas, Secuencias Volcanosedimentarias, Depósitos no consolidados antiguos y Depósitos no consolidados Actuales (Figura 9-1). Los perfiles representados en la Figura 9-1 muestran de forma esquemática la geometría en subsuperficie de estas UH, para las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, respectivamente.

A continuación se presentan los criterios generales utilizados para agrupar las unidades geológicas, formando las unidades hidrogeológicas. La descripción detallada de éstas por cuenca, basada en la estratigrafía de pozos, se encuentra en el Anexo D.3.

9.1.1 Depósitos No Consolidados Actuales (UH 1)

Se agrupan en esta unidad 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). Esta unidad presentaría un espesor variable, desarrollándose principalmente en el valle y en los cauces de ríos y faldas de cerros.

Esta unidad hidrogeológica es el acuífero principal del área a estudiar, dado el carácter no consolidado de estos depósitos que ocupan las actuales superficies de erosión.

9.1.2 Depósitos No Consolidados Antiguos (UH 2)

Esta unidad hidrogeológica está conformada por depósitos no consolidados a semiconsolidados de origen glaciar y glaciofluvial, con edades que abarcan desde el Pleistoceno Medio a Pleistoceno Superior.

Se incluyen dentro de esta unidad los depósitos morrénicos y glaciofluviales de la glaciación Río Llico (Plm3, Plgf3), Santa María (Plm2, Plgf2) y los depósitos fluvioestuarinos (Plfe).

Esta unidad hidrogeológica se caracteriza por depósitos compuestos por gravas y arenas, con diferentes porcentajes de finos en la matriz. Se observan intercalaciones locales de limos y arcillas, lo que podría conferir a esta unidad hidrogeológica un carácter de acuífero 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, y ocupa gran parte de la cuenca costera entre río Budi y río Toltén, subyaciendo a la unidad hidrogeológica Depósitos No Consolidados. Esta unidad podría alcanzar espesores variables entre 50 y 200 m.

9.1.3 Depósitos Volcano-sedimentarios (UH 3)

Se agrupan dentro de esta unidad hidrogeológica a depósitos volcanosedimentarios, de carácter semi consolidados a consolidados, de 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.

Se incluye dentro de esta unidad hidrogeológica, depósitos del Abanico Volcanoclástico de Muco (PPlmu), 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 (PlHdp).

Superficialmente, esta unidad 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 (Figura 9-1).

9.1.4 Secuencias Volcánicas (UH 4)

Se integran en esta unidad hidrogeológica, lavas con intercalaciones de rocas volcanoclásticas, pertenecientes al período comprendido entre el Pleistoceno Inferior y Holoceno (Plv 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 bien, con distintas proporciones de arcilla. En ocasiones se describen niveles de lavas intercaladas. Sin embargo, en su mayor parte esta unidad corresponde a rocas.

9.1.5 Depósitos Consolidados (UH 5)

Se agrupan dentro de esta unidad hidrogeológica depósitos consolidados y antiguos que abarcan desde el Triásico hasta el Pleistoceno. Conforman esta unidad, rocas sedimentarias antiguas de las formaciones Llafquentué-Huimpil (Tr) y Nacientes del Bio

Bio (Jnb (lp)); tobas, brechas volcánicas y lavas andesíticas del Complejo Viscacha-Cumilao/Estratos de Relicura (KTvc); conglomerados y depósitos volcanoclásticos de la Formación Temuco (EMt); depósitos sedimentarios y volcánicos de la Formación Pilmahue (OMp); tobas, areniscas, brechas volcánicas y lavas andesíticas de la Formación Curamallín (OMcm); areniscas y lutitas fosilíferas marinas de los Estratos de Huinchahue y Formación Cholchol (Mch) y Conglomerados Raluncoyén y Paillal (PPl).

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 basamento e infrayacen a las unidades hidrogeológicas Depósitos Volcanosedimentarios, Depósitos No Consolidados Antiguos y Secuencias Volcánicas (Figura 9-1). 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 9-1).

En la unidad Conglomerados Ralucoyén-Paillal (PPl) (oeste de Temuco) se reconoce un depósito no consolidado que se caracteriza por una unidad superior compuesta por arenas y gravas y una unidad infrayaciente a la anterior conformada por arcillolita tobácea, toba fina y deleznable y areniscas muy arcillosas.

9.1.6 Basamento (UH 6)

Esta unidad hidrogeológica está formada principalmente por los Complejos Metamórficos del Paleozoico Serie Oriental (Pz4b) y Bahía Mansa (PzTrbm) 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).

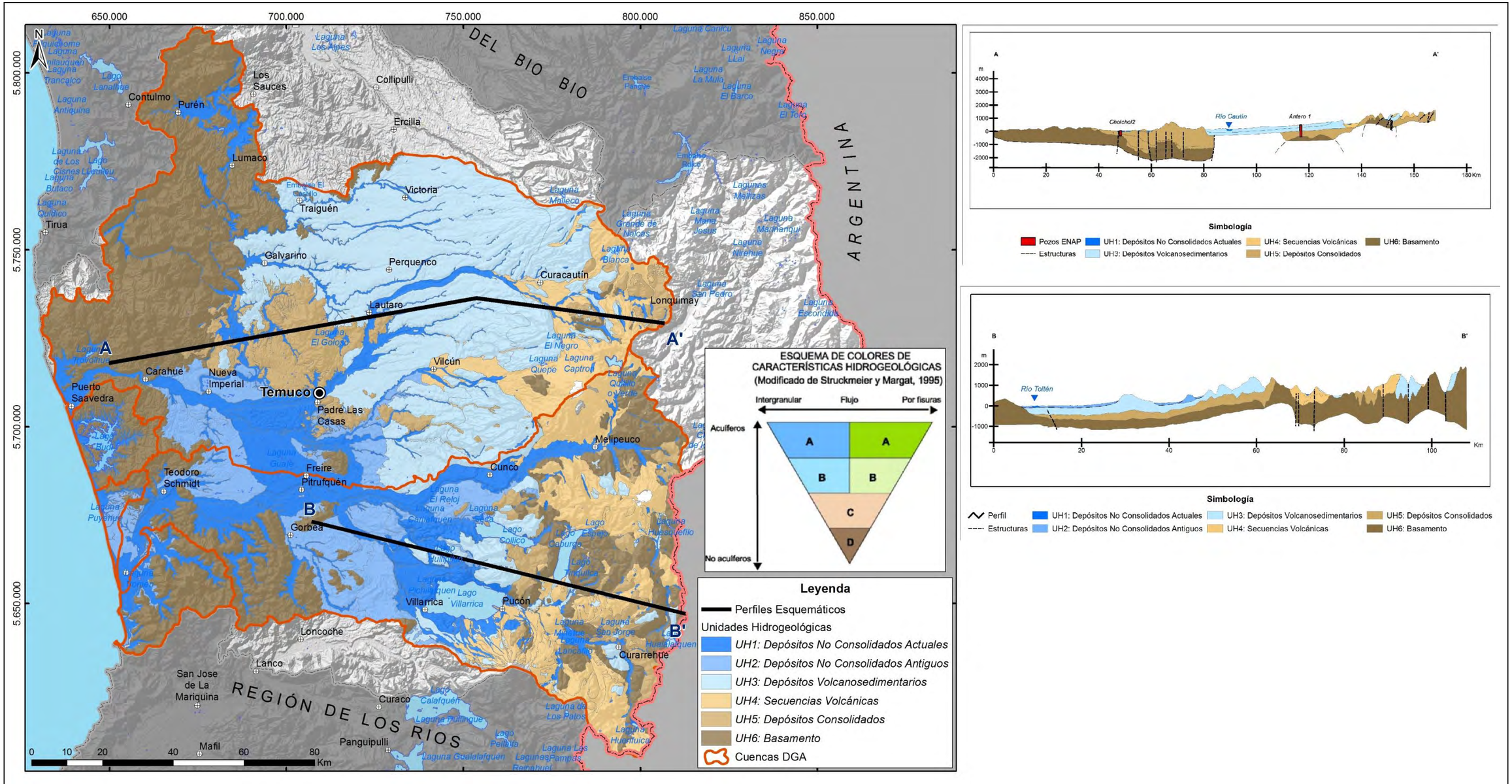


Figura 9-1: Mapa y Perfiles Hidrogeológicos de la zona de estudio

9.2 PROPIEDADES HIDRÁULICAS

El estudio de las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas (Transmisividad −T-, Conductividad hidráulica −K-, y almacenamiento −S-), incorpora los resultados de 75 pruebas de bombeo obtenidas de los expedientes DGA, y los resultados del análisis de 25 pruebas de bombeo efectuadas en la campaña de Pruebas de Bombeo que se llevó a cabo para este estudio. Los análisis de cada prueba de bombeo y el resumen de éstas se encuentran disponibles en el Anexo G.1.

En el Anexo G.2 se presenta la metodología general utilizada para el cálculo de los parámetros hidráulicos, junto con los inconvenientes encontrados y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

9.2.1 Análisis de Pruebas de Bombeo desde Expedientes

La revisión y análisis de pruebas de bombeo desde los expedientes de captaciones con derechos de agua se llevó a cabo para 75 pozos, cuya ubicación se muestra en la Figura 9-2 y el resumen de la estimación de los parámetros elásticos se muestran en la Tabla 9-1. En el Anexo G.1se presenta en detalle la ubicación de los puntos y los resultados de las propiedades hidráulicas calculadas. La transmisividad (T) y Permeabilidad (K) que se consideraron como representativas (seleccionado) considera variables como el mejor ajuste según la curva de prueba de gasto constante o de recuperación de la prueba de gasto constante, y/o que los valores sean consistentes con el tipo de acuífero.

Tabla 9-1: Pozos con pruebas de bombeo desde expedientes

ID_Map	Cuenca	UH	Fecha PGC	Q PBGC (L/s)	N.E. PGC(m)	N.D. PGC (m)	T seleccionado (m^2/d)	K seleccionado (m/d)
APR-14	Río Imperial	UH-1	dic-13	11	11	49.51	6.28	0.09
APR-15	Río Imperial	UH-1	oct-11	7	2	8.4	221.36	7.91
APR-3	Río Toltén	UH-1	nov-12	21	8	9.98	1581.12	27.26
APR-6	Río Imperial	UH-3	dic-12	3	15.37	82.27	2.81	0.06
APR-9	Río Toltén	UH-2	ene-12	33	5.3	15.2	434.81	7.5
O-105	Río Toltén	UH-1	dic-97	58	2	8.63	3845.63	99.24
O-110	Río Toltén	UH-2	sep-00	63	8.5	13.26	967.79	20.07
O-118	Río Imperial	UH-1	nov-00	22	12.41	19.72	496.92	18.01
O-119	Río Toltén	UH-1	nov-00	90	26.65	46.16	225.98	3.54
O-120	Río Toltén	UH-1	ene-01	50	13.66	14.6	810.9	45.05
O-127	Río Imperial	UH-1	oct-00	60	4.43	5.8	7905.6	309.17
O-139	Río Toltén	UH-1	oct-02	58	39.4	42.8	1344.6	41.25
O-140	Río Imperial	UH-1	nov-00	25	10.72	44.06	64.8	0.73
O-146	Río Toltén	UH-1	ene-00	9	47.7	53.4	158.11	6.25
O-148	Río Toltén	UH-1	ene-03	20	27.45	32.87	632.45	38.21
O-15	Río Imperial	UH-3	nov-04	60	21.14	30.35	247	2.3
O-161	Río Toltén	UH-2	nov-02	64	0	10.74	1270.51	35.29
O-167	Río Imperial	UH-1	ene-04	120	24.12	37.32	1028.08	13.55
O-172	Río Toltén	UH-2	ago-04	32	12.72	33.55	136.75	2.25
O-175	Río Toltén	UH-1	sep-06	120	2.5	0	831.76	30.25
O-178	Río Imperial	UH-1	ene-04	15	0	16.43	124.83	11.35
O-18	Río Imperial	UH-3	oct-05	64	29.12	85.01	123.82	1.51
O-186	Río Toltén	UH-4	may-05	32	8.5	21.84	280.88	2.52
O-193	Río Imperial	UH-5	-	32	24.5	75.4	74.41	0.74
O-198	Río Toltén	UH-2	abr-05	64	8.2	30.5	29.11	1.62

ID_Map	Cuenca	UH	Fecha PGC	Q PBGC (L/s)	N.E. PGC(m)	N.D. PGC (m)	T seleccionado (m^2/d)	K seleccionado (m/d)
O-234	Río Toltén	UH-1	abr-06	62	4.6	16.65	505.27	12.03
O-25	Río Imperial	UH-6	dic-05	64	0	67.1	59.59	1.42
O-257	Río Toltén	UH-2	ago-06	60	1.68	16.2	774.59	19.86
O-258	Río Toltén	UH-1	ago-06	90	18.87	28.05	1186	21.6
O-261	Río Imperial	UH-1	sep-06	64	27.38	40.5	331.75	24.57
O-264	Río Imperial	UH-3	ago-05	54	8.5	49.89	102.9	0.62
O-268	Río Toltén	UH-1	mar-07	50	0	31.65	194.78	6.49
O-272	Río Toltén	UH-2	jun-07	64	4.15	7.65	1105.03	52.62
O-273	Río Imperial	UH-3	ene-00	24	17.12	25.53	137.62	4.19
O-275	Río Imperial	UH-2	-	16	8.25	28.99	101.19	2.26
O-276	Río Toltén	UH-2		30			89.43	0.75
O-278	Río Imperial	UH-1	ago-07	60	1.5	12.5	935.73	20.79
O-279	Costeras entre río Budi y Toltén	UH-1	jul-05	12	2	24.36	111.61	2.79
O-28	Río Imperial	UH-3	jul-07	50	18	106.65	40	0.3
O-285	Río Toltén	UH-2	sep-07	25	0	17.74	164.7	5.31
O-286	Río Toltén	UH-2	dic-07	19	0	31.45	37.83	0.8
O-288	Río Toltén	UH-2	oct-05	20	4.5	52.18	85.95	2.39
O-29	Río Imperial	UH-4	sep-07	32	7.15	77.93	32.02	0.39
O-294	Río Imperial	UH-3	ago-07	52	4.4	26.68	256.93	6.33
O-30	Río Imperial	UH-3	-	49	0	0	64.57	1.54
O-304	Río Toltén	UH-2	jul-06	38	6.25	61.02	55.12	0.46
O-305	Río Toltén	UH-1	mar-06	65	3.64	11.7	596.95	15.56
O-31	Río Imperial	UH-3	jun-07	97	25.27	110.23	118	1.9
O-312	Río Imperial	UH-1	jun-08	5	1	8.5	65.88	2.64
O-313	Río Toltén	UH-1	oct-07	20	9.4	13.32	527.04	10.21
O-314	Río Imperial	UH-1	ago-08	110	24.28	35.36	617.51	10.48
O-315	Río Imperial	UH-1	ago-08	50	22.88	42.55	108.53	1.85
O-317	Río Imperial	UH-1	sep-08	64	20.7	47.33	58.49	0.73
O-32	Río Imperial	UH-3	nov-06	97	18.01	110.23	43.58	0.89
O-323	Río Toltén	UH-3	may-09	8	7.93	57.52	12.65	0.15
O-328	Río Toltén	UH-1	sep-08	55	10	20.3	1884	57.1
O-34	Río Imperial	UH-3	ago-07	135	29.3	70.61	393.58	7.03
O-340	Río Imperial	UH-1	abr-09	60	3	17	536.95	13.1
O-344	Río Imperial	UH-1	jul-09	35	6.3	78.38	60.58	4.33
O-39	Río Imperial	UH-3	abr-09	5	2.3	38.15	12.73	0.25
O-407	Río Imperial	UH-1	jul-09	54	2.6	3.33	3455.76	100.46
O-41	Río Imperial	UH-3	jul-09	62	10.8	15.6	5002.78	50.53
O-418	Costeras entre río Budi y Toltén	UH-2	may-09	60	6.3	17.3	108.81	3.02
O-42	Río Imperial	UH-3	abr-08	65	35.96	70.94	174.33	3.71
O-439	Río Toltén	UH-1	jun-10	6	7.72	45.7	10.95	0.19
O-448	Río Toltén	UH-1	ene-11	6	8	21	74.05	2.79
O-451	Río Imperial	UH-1	nov-02	11	1.8	20.33	33.16	0.27
O-46	Río Imperial	UH-3	ene-10	60	0.25	5.43	3476.82	124.17
O-460	Río Imperial	UH-4	ene-00	24	8.2	40.05	164.99	3.53
O-50	Río Imperial	UH-3	jun-11	50	42.69	60.86	290.96	16.16
O-60	Río Imperial	UH-3	mar-99	35	12.9	66.23	75.97	0.65
O-74	Río Imperial	UH-1	dic-94	64	6.61	59.92	95	1.3
O-91	Río Toltén	UH-4	jun-00	100	5.27	6.22	3870.75	146.07
O-97	Río Imperial	UH-1	abr-99	41	3.6	8.28	1465.24	40.25
O-99	Río Toltén	UH-1	jun-99	27	3.1	7.55	382.34	15.93

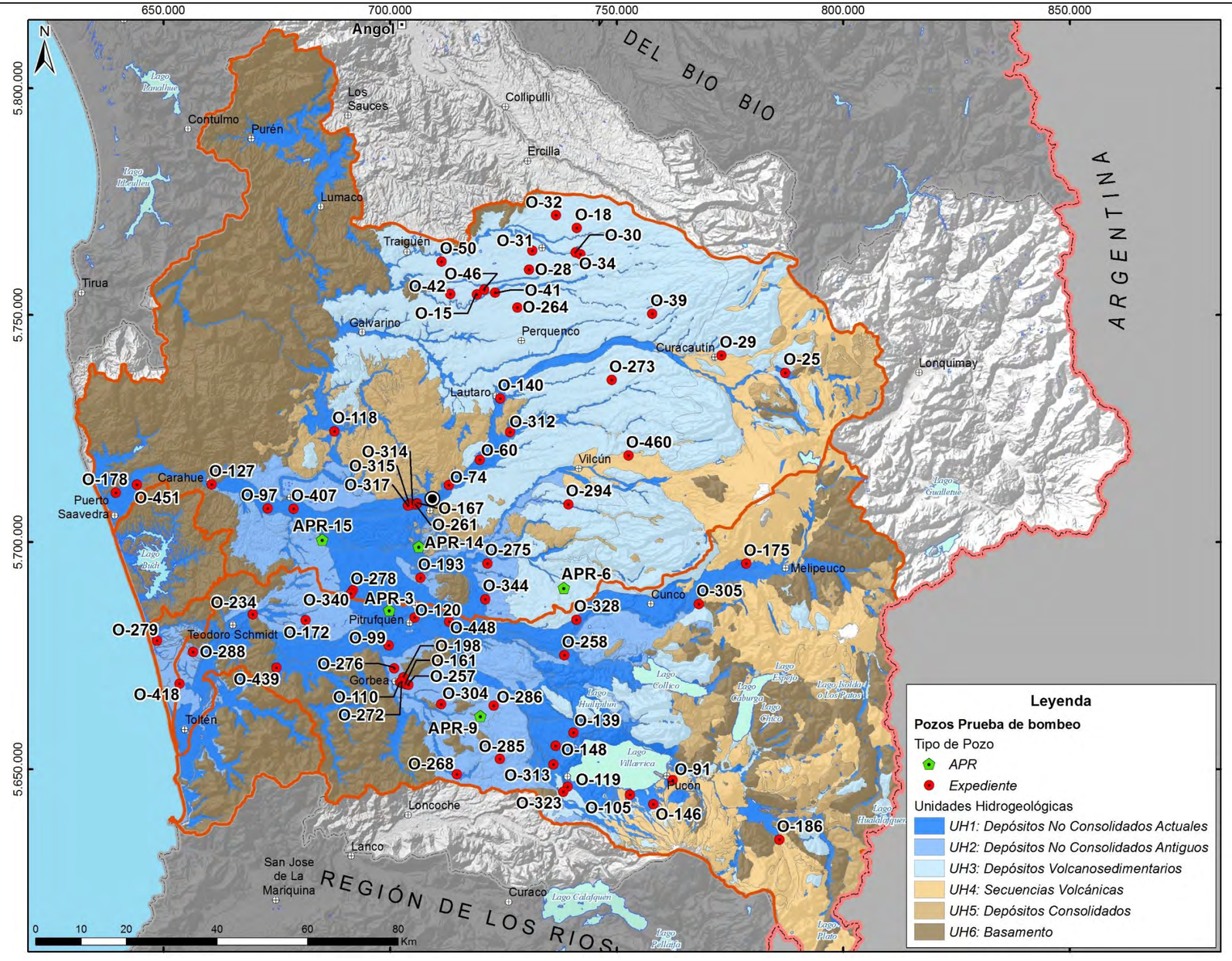


Figura 9-2: Ubicación de pozos para las pruebas de bombeo en pozos en el área de estudio

9.2.2 Campañas de Pruebas de Bombeo

Durante los meses de Septiembre y Octubre de 2014 se efectuaron 25 pruebas de bombeo en las cuencas del rio Imperial y Toltén. El objetivo de estas pruebas de bombeo es determinar parámetros elásticos de los acuíferos, para apoyar la construcción y calibración del modelo numérico. Las pruebas de bombeo fueron realizadas por la epresa perforista CChP, y supervisadas por Arcadis. La Tabla 9-2 muestra las coordenadas y características de los pozos donde se efectuaron las pruebas de bombeo. La Figura 9-3 muestra su distribución espacial.

Tabla 9-2: Pozos con pruebas de bombeo realizadas en Campaña de terreno

Pozo	Cuenca	UTM N (WGS84 18S)	UTM E (WGS84 18S)	Prof. (m)	Ranurado Desde (prof)	Ranurado Hasta (prof)
O-38	Río Imperial	5757647	753238	112.00	50.00	109.00
O-111	Río Imperial	5713832	730363	42.00	12.00	40.00
O-265	Río Imperial	5738521	740574	75.00	30.00	66.00
O-281	Río Toltén	5642932	755545	73.00	61.00	73.00
O-296	Río Toltén	5661213	735646	79.00	18.00	75.00
O-309	Río Toltén	5636588	749101	46.00	6.00	40.00
O-435	Río Toltén	5651027	739427	67.00	61.00	67.00
O-457	Río Toltén	5671590	722254	78.00	42.00	78.00
O-18	Río Imperial	5769216	741189	119.00	25.00	119.00
O-101	Río Imperial	5707147	694564	66.00	16.50	43.00
O-122	Río Imperial	5705791	709994	53.00	36.00	53.00
O-170	Río Imperial	5731321	721507	120.00	61.00	109.00
O-172	Río Toltén	5682779	681362	73.50	51.50	73.50
O-255	Río Imperial	5720496	742504	51.00	21.00	51.00
O-299	Río Toltén	5695406	787776	50.00	29.00	48.00
O-326	Río Toltén	5671879	681293	35.00	12.00	34.50
O-329	Río Toltén	5665763	656414	40.00	6.00	40.00
Cunco_CChP	Río Toltén	5686796	758719	28.51	7.00	26.00
Teodoro Schmidth_CChP	Río Toltén	5681177	667916	28.51	7.00	25.00
Temuco_CChP	Río Imperial	5712327	712410	30.50	9.00	27.00
Traiguén_CChP	Río Imperial	5764255	703174	27.53	6.00	24.00
Victoria_CChP	Río Imperial	5765304	733228	30.58	9.00	27.00
PPA-1	Río Imperial	5708395	713825	100.0	65.85	98.85
PPA-2	Río Toltén	5685141	706872	150.0	52.9	147
PPA-4	Río Imperial	5707115	678535	100.0	65	100

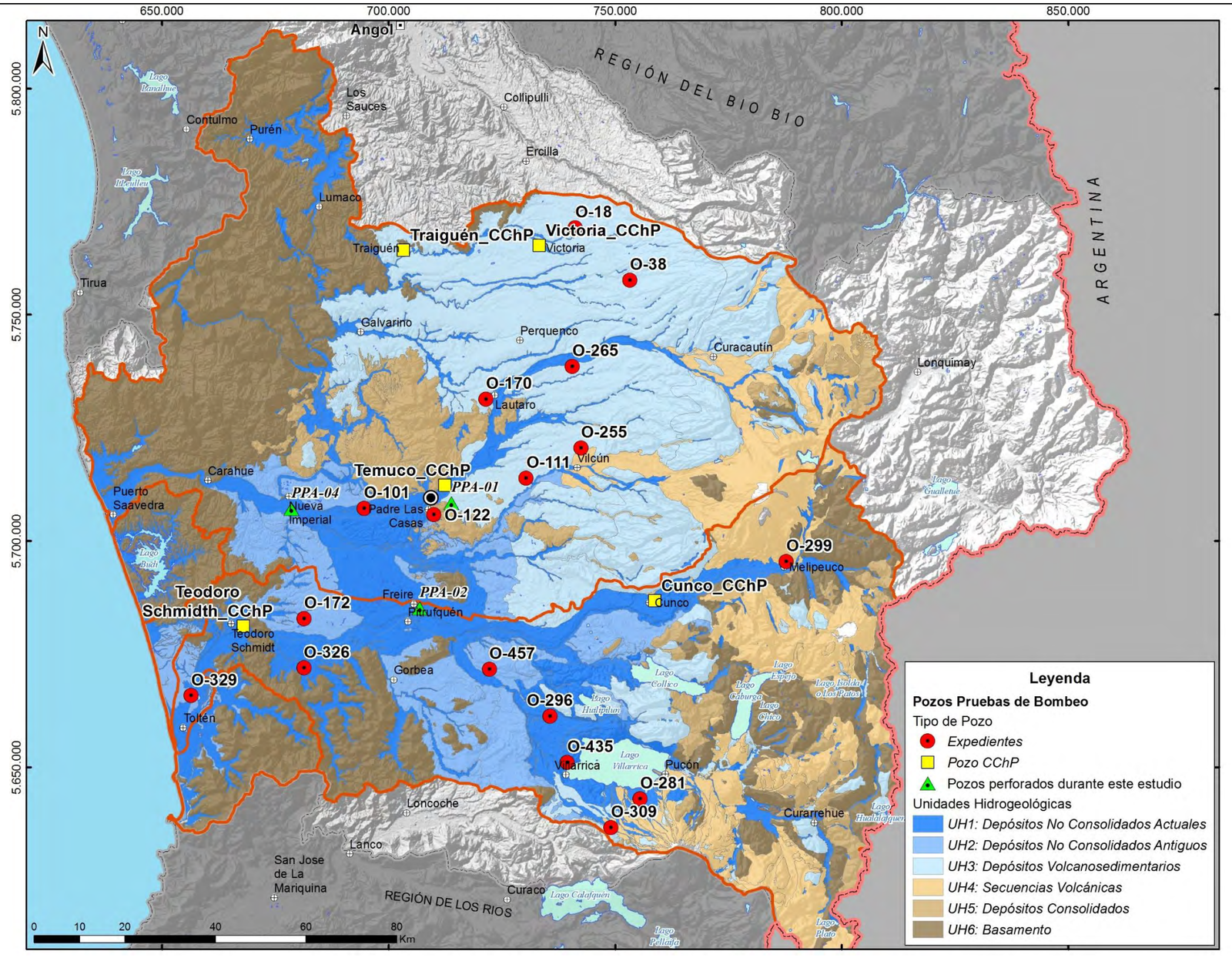


Figura 9-3: Ubicación de pozos con pruebas de bombeo efectuadas para este estudio

9.2.2.1 Ejecución de Pruebas de Bombeo

Las pruebas de bombeo consistieron en una prueba de gasto variable (PGV) de 3 etapas, en general, con dos horas de duración cada una (ej. pozo O-38,Figura 9-4). Luego se registró la recuperación del nivel freático. Mediante el análisis del comportamiento del acuífero durante la PGV se determinó el caudal adecuado para la realización de la prueba de gasto constante (PGC), una vez que se había recuperado el nivel freático. La duración de cada prueba de bombeo, considerando para ello tanto la PGV como PGC y sus respectivas recuperaciones. A modo de ejemplo, la Figura 9-5 presenta los resultados de la PGC del pozo O-38.

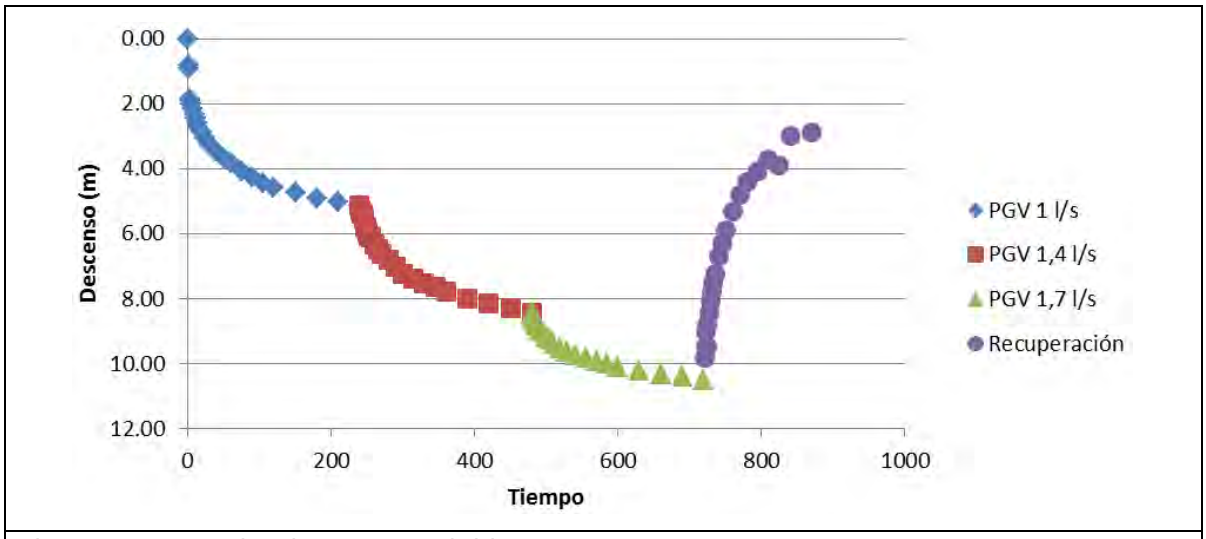


Figura 9-4: Prueba de gasto variable pozo O-38

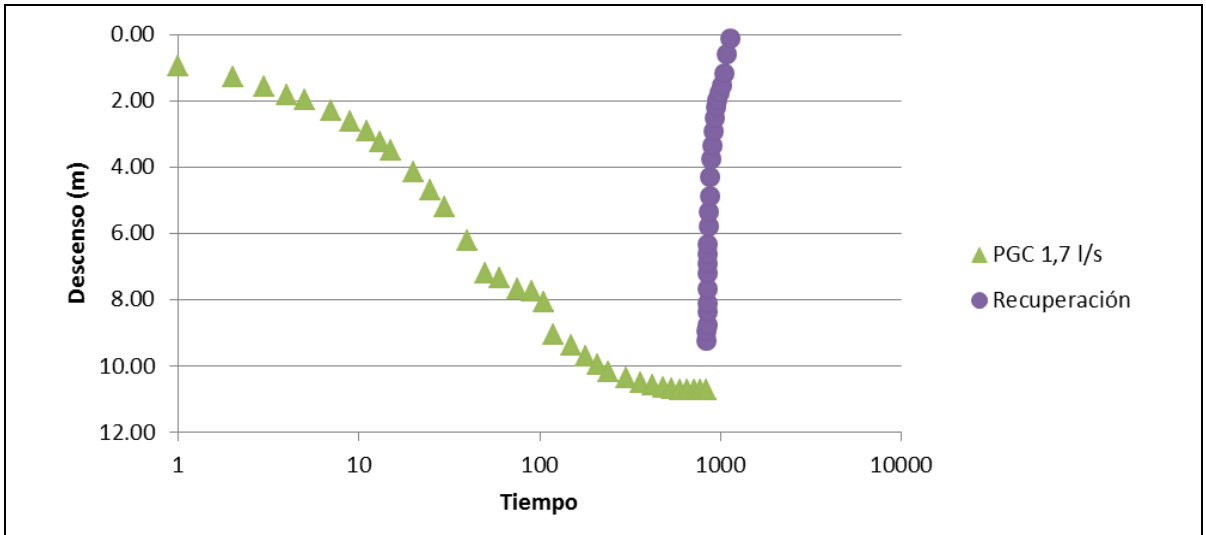


Figura 9-5: Prueba de gasto constante pozo O-38

Una vez realizadas las pruebas se procedió al análisis de éstas. Mediante el método de Jacob se estimaron la transitividad, permeabilidad y almacenamiento, tanto para los datos de las PGC como para la recuperación de éstas. La Figura 9-6 muestra un ejemplo del ajuste realizado para la estimación de parámetros elásticos. En general los resultados obtenidos de la PGC son consistentes con los parámetros obtenidos del registro de la recuperación de niveles. La Tabla 9-3, presenta un resumen de la estimación de los parámetros elásticos para las 25 pruebas de bombeo realizadas.

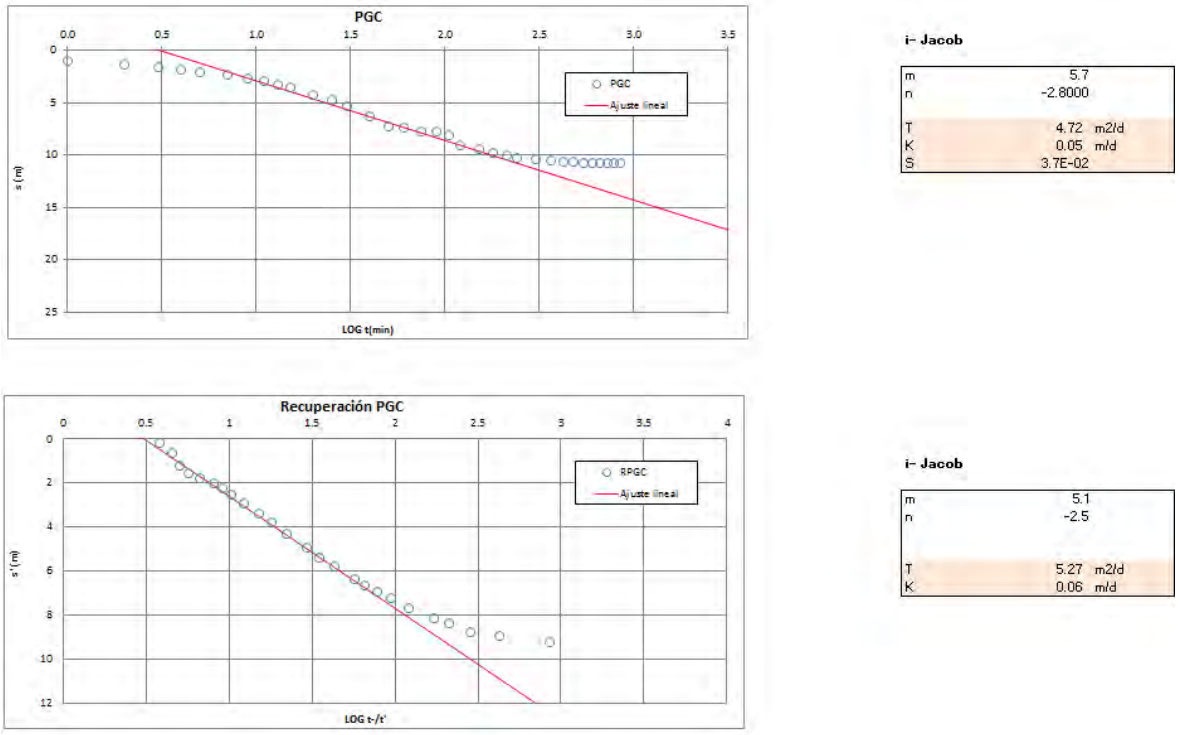


Figura 9-6: Ejemplo de ajuste de prueba de bombeo de gasto constante y de recuperación pozo O-38. Método de Jacob.

Tabla 9-3: Resumen de la estimación de los parámetros elásticos

Pozo	UH	Fecha PGC	Q PBGC (L/s)	N.E. PGC (m)	N.D. PGC (m)	T (m^2/d) PGC	K (m/d) PGC	S PGC	T (m^2/d) RGC	K (m/d) RGC	T seleccionado (m^2/d)	K seleccionado (m/d)
O-38	UH-3	sep/2014	1,7	22,91	33,63	4,72	0,05	3,7E-02	5,27	0,06	5,27	0,06
O-111	UH-3	oct/2014	18,0	17,14	20,97	1016,43	40,89	1,0E-12	4065,74	163,55	1016,43	40,89
O-265	UH-3	sep/2014	6,5	5,17	17,83	44,68	0,63	2,3E-04	22,84	0,32	22,84	0,32
O-281	UH-1	sep/2014	1,3	34,54	35,87	102,77	2,74	8,2E-06	186,86	4,99	186,86	4,99
O-296	UH-1	sep/2014	30,0	13,59	36,69	395,28	6,04	1,4E-17	385,64	5,89	395,28	6,04
O-309	UH-1	sep/2014	20,0	2,03	9,97	131,76	3,00	3,1E-03	1054,08	24,00	131,76	3,00
O-435	UH-1	sep/2014	3,8	30,09	31,00	166,90	4,51	1,5E-01	120,17	3,25	120,17	3,25
O-457	UH-2	oct/2014	12,0	44,81	52,79	189,73	5,53	1,9E-06	158,11	4,61	158,11	4,61
O-18	UH-3	oct/2014	20,2	18,51	66,71	13,14	0,13	1,4E-02	58,07	0,58	58,07	0,58
O-101	UH-1	oct/2014	10,5	13,28	35,50	39,53	1,33	3,0E-05	51,88	1,74	51,88	1,74
O-122	UH-5	oct/2014	2,6	4,70	18,31	11,75	0,24	5,6E-03	12,46	0,26	12,46	0,26
O-170	UH-3	oct/2014	1,8	20,19	40,85	11,86	0,12	4,4E-08	14,23	0,14	14,23	0,14
O-172	UH-2	oct/2014	15,0	14,09	42,36	107,80	1,81	8,4E-12	94,87	1,59	94,87	1,59
O-255	UH-3	oct/2014	12,0	0,00	15,64	316,22	6,20	1,1E-24	135,52	2,66	316,22	6,20
O-299	UH-4	oct/2014	17,0	11,20	30,61	158,11	4,08	6,4E-12	527,04	13,58	158,11	4,08
O-326	UH-1	oct/2014	18,0	3,38	7,31	569,20	17,70	3,7E-06	711,50	22,12	711,50	22,12
O-329	UH-2	oct/2014	22,0	6,64	23,18	139,14	4,04	4,7E-05	139,14	4,04	139,14	4,04
Cunco_CChP	UH-1	oct/2014	7,4	5,30	6,49	390,01	16,90	9,8E-04	531,83	23,04	390,01	16,90
Teodoro Schmidth_CChP	UH-1	oct/2014	15,0	4,45	18,35	592,92	24,32	4,7E-32	592,92	24,32	592,92	24,32
Temuco_CChP	UH-1	oct/2014	5,0	12,07	18,75	31,62	1,95	1,4E-02	32,94	2,03	31,62	1,95
Traiguén_CChP	UH-3	sep/2014	0,3	4,91	10,20	2,75	0,13	6,0E-03	1,83	0,09	1,83	0,09
Victoria_CChP	UH-3	sep/2014	0,8	14,43	22,41	25,52	1,49	2,6E-15	2,84	0,17	2,84	0,17
PPA-1	UH-3	dic/2014	4,4	17,61	76,62	11,40	0,13	2,5E-09	9,4	0,11	9,4	0,11
PPA-2	UH-2	dic/2014	22,0	14,08	19,68	434,8	3,2	3,0E-01	579,8	4,26	579,8	4,26
PPA-4	UH-1	sep/2015	13,2	3,70	5,75	3478,46	36,12	1,9E-27	2319	24,08	2319	24,08

9.2.3 Propiedades Hidráulicas

A continuación, se muestran los rangos de permeabilidad (K: m/d), transmisividad (T: m^2/d) y caudal específico (q: L/s/m) para las cuencas de los ríos Imperial (Tabla 9-4) y Toltén (Tabla 9-5) subdivididos por unidad hidrogeológica. La Figura 9-8 muestra la distribución superficial de las unidades hidrogeológicas definidas, en donde se presenta además los valores de permeabilidad hidráulica (K) de 97 análisis de pruebas de bombeo realizadas.

Para la cuenca del río Imperial (Tabla 9-4), las unidades UH 1 y UH 3 son las que presentan mayor cantidad de datos de pruebas de bombeo. En UH 1 presenta un alto rango en sus propiedades hidráulicas, demostrando la gran heterogeneidad de esta unidad, y promediando K: 28 m/d, T: 843 m^2/d y q: 8,3 L/s/m. En UH 3 el rango de variabilidad entre el mínimo y máximo es igualmente alto, y el promedio de las propiedades hidráulicas es K: 6 m/d, T: 354 m^2/d y q: 2,3 L/s/m. Además, se cuenta con el análisis de pruebas de bombeo en las unidades UH 4, 5 y 6; si bien sus parámetros son bajos respecto de lo observado en las unidades de relleno sedimentario UH 1, 2 y 3, son valores que podrían considerarse de cierta capacidad acuífera en un medio fracturado. Sin embargo, la cantidad de datos hidráulicos de estas unidades rocosas son escasos como para asignarles una capacidad acuífera a la escala regional en la que se trabajó, y por tanto es más lógico y conservador considerar a estas unidades como poco transmisivas.

Tabla 9-4: Propiedades Hidráulicas para pozos en la cuenca del río Imperial

Imperial		**T (m^2/d)**			**K (m/d)**			**q (L/s/m)**		
Unidades	**datos**	**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

(*) se deja fuera del análisis el pozo O-46 cuyos valores son K: 146 m/d, T: 3870 m^2/d y q: 12 L/s/m

Para la cuenca del río Toltén (Tabla 9-5), las unidades UH 1 y UH 2 son las que presentan mayor cantidad de datos de pruebas de bombeo. En UH 1 presenta valores de K y T promediando 21 m/d, 721 m^2/d respectivamente, y un valor de q de 7 L/s/m, valores similares a lo observado en la cuenca del río Imperial. En UH 2 se observan valores más bajos que UH 1, con K: 11 m/d, T: 370 m^2/d y q: 4 L/s/m, aunque similares a lo observado en UH 3 en la cuenca del río Imperial. Además se cuenta con el análisis de tres pruebas de bombeo en UH 4 reflejando la alta variabilidad del medio en las secuencias volcánicas.

Tabla 9-5: Propiedades Hidráulicas para pozos en la cuenca del río Toltén

Toltén		T (m^2/d)			K (m/d)			q (L/s/m)		
Unidades	**datos**	**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

El histograma de la Figura 9-7 muestra las distribuciones de conductividades hidráulicas de UH-1, UH-2 y UH-3. En ella se puede observar que la mayor parte de estos valores se concentran en rangos que no superan los dos órdenes de magnitud para cada unidad, y que estos rangos son prácticamente los mismos para las unidades UH-2 y UH-3, mientras que la UH-1 presenta valores de conductividad hidráulica mayores que las otras dos unidades. En esta figura no se han incluido la información referente a las UH-4, UH-5 y UH-6 por presentar un bajo número de datos, lo cual es, estadísticamente, poco representativo.

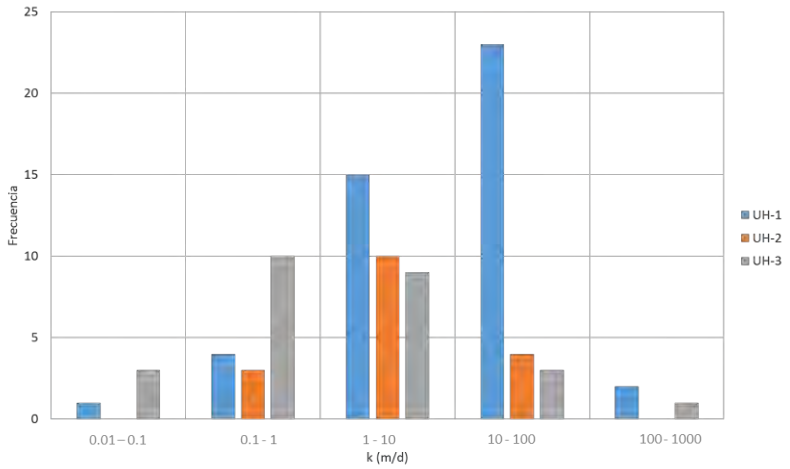


Figura 9-7: Histograma de conductividades hidráulicas (k) de UH-1, UH-2 y UH-3 para toda el área de estudio

Con el objetivo de visualizar espacialmente variaciones de transmisividad, se interpolaron los valores en el relleno de toda el área de estudio. Los mayores valores de transmisividad en la cuenca del río Imperial (Figura 9-9) se observan al suroeste de Victoria y en torno a las ciudad de Nueva Imperial y Carahue. Para la cuenca del río Toltén, los mayores valores de transmisividad se observan en torno al lago Villarrica, al oeste de Cunco, al oeste de Freire y en Gorbea.

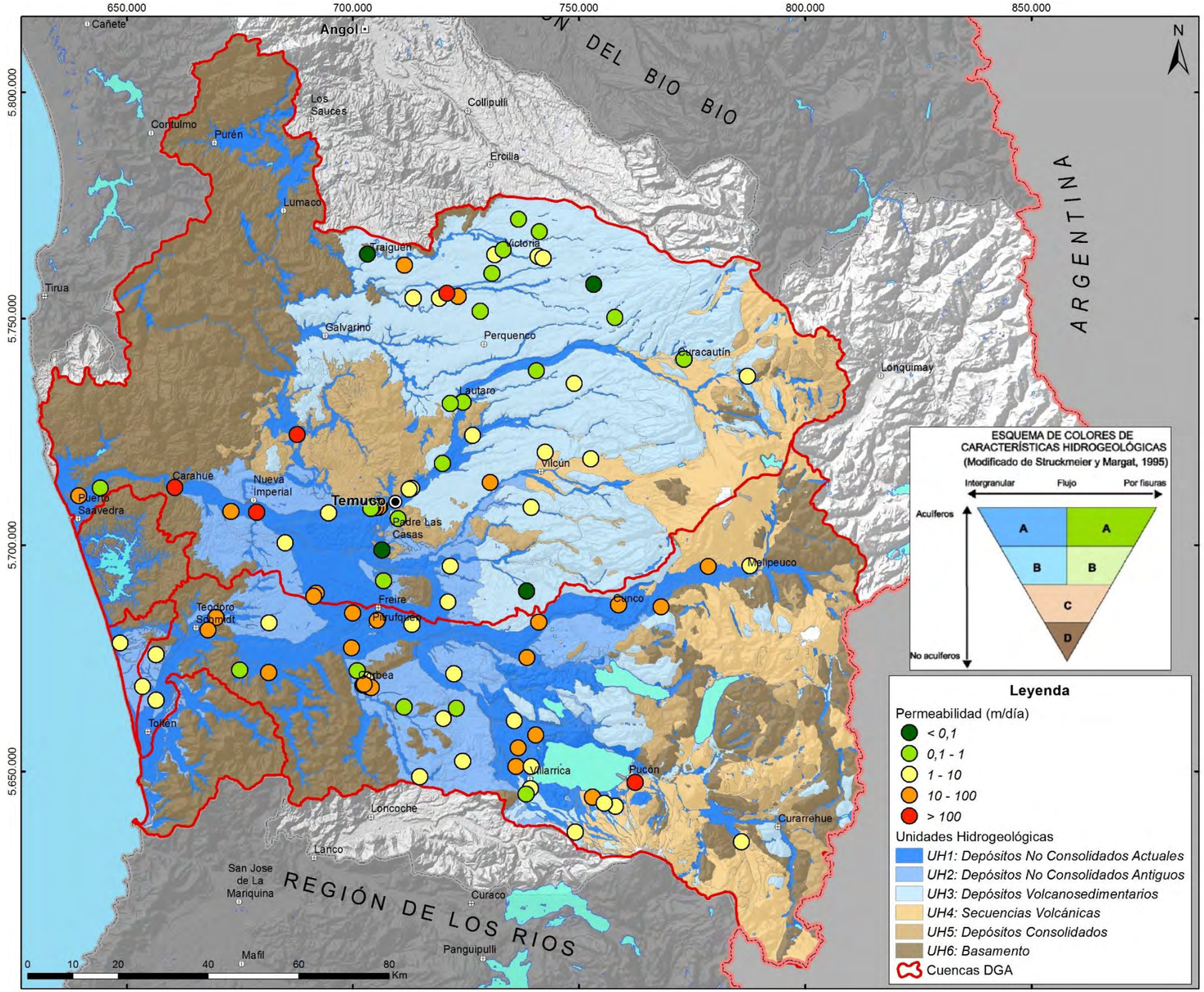


Figura 9-8: Distribución espacial de la permeabilidad en el área de estudio

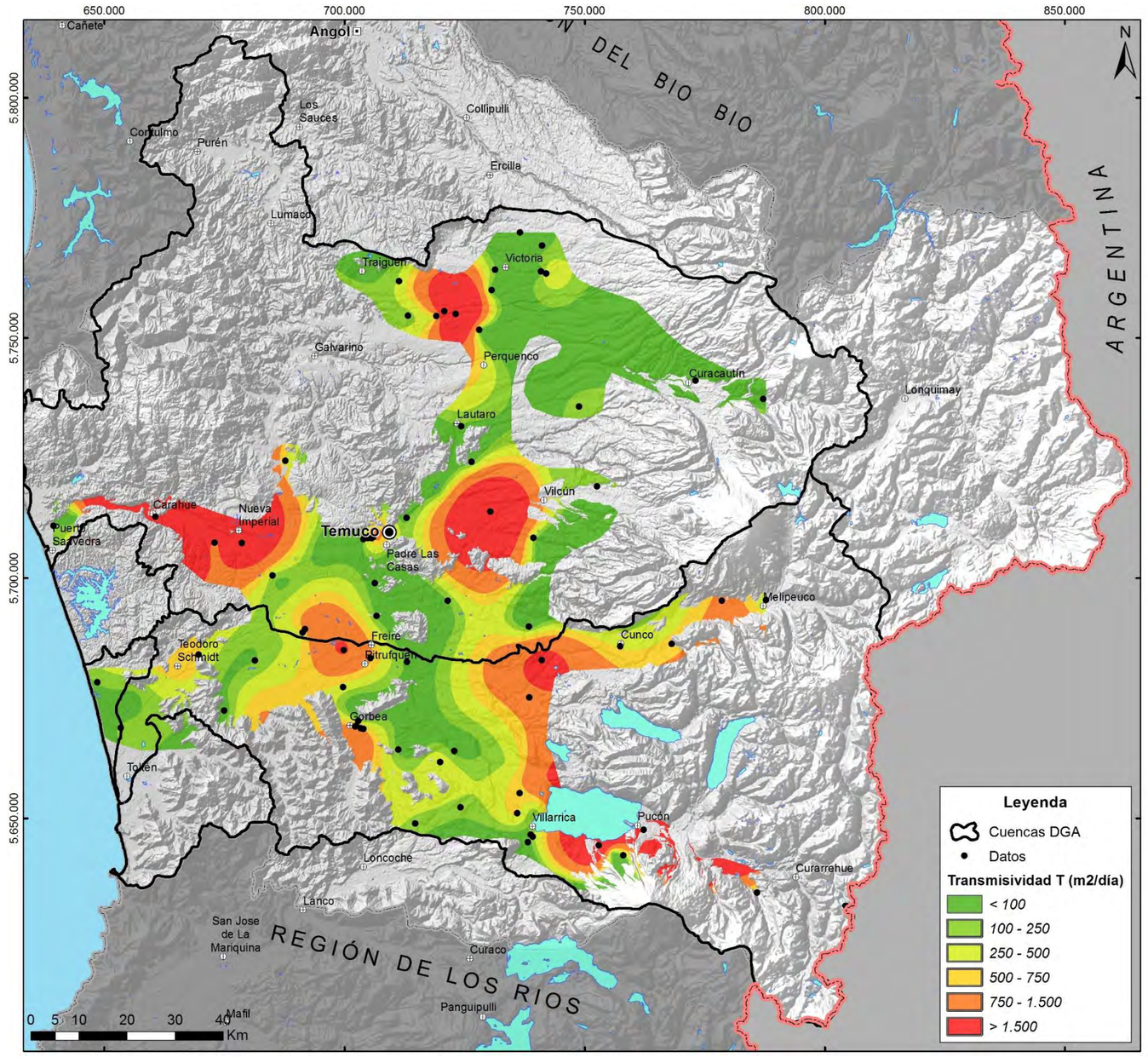


Figura 9-9: Distribución espacial de la transmisividad en el área de estudio

9.3 NIVELES DE 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 estimar la cota topográfica de los puntos catastrados, se utilizó como referencia la elevación entregada por una imagen STRM, de 90 m de resolución. Importante es recalcar que los niveles medidos en terreno fueron realizadas entre los meses de marzo y julio (2014). Con el objetivo de visualizar el comportamiento del acuífero en profundidad, se subdividieron los pozos según tipo. Se tiene:

1. Pozos Profundos: son 159 captaciones que presentan más de 20 m de profundidad, hasta los 180 m de profundidad.
2. Pozos Someros: son 1.398 captaciones que presentan menos de 20 m de profundidad.

A continuación se presenta las zonas de isoprofundidades de la napa subterránea y las superficies piezométricas para los pozos profundos y someros. En el Anexo D.3 se encuentra la descripción en detalle la superficie piezométrica para cada subcuenca.

9.3.1 Isoprofundidades de Aguas Subterráneas

9.3.1.1 Pozos Profundos

Los niveles registrados en las captaciones profundas (Figura 9-10) varían entre 0,4 y 80 m de profundidad. Más de la mitad de los niveles medidos presentan profundidades someras (hasta los 10 m), zonas que en general, corresponden a áreas cercanas al basamento hidrogeológico. En particular, se observa una zona de menor profundidad en los niveles en el sector de Victoria al este de Temuco.

Existen zonas en que los niveles son más profundos, como ocurre en Traiguén (> 60 m de profundidad), Perquenco (40-50 m de profundidad) al este y oeste de Freire (40-50 m de profundidad).

9.3.1.2 Pozos Someros

En general, los niveles registrados en las captaciones someras (Figura 9-11) varían entre 0 y 18 m de profundidad. La mayoría de los niveles medidos tienen un rango de profundidad de 0 a 3 m, las que están asociadas, principalmente, a depósitos de cursos de aguas superficiales. Localmente hay captaciones con niveles más profundos; en la cuenca del río Imperial, esto se observa en los alrededores de Victoria (0-12 m), al oeste de Vilcún (0-15 m), y en torno a Temuco (0-12 m). En tanto, en la cuenca del río Toltén los valores más profundos se observan a la salida del lago Colico (18 m), en Villarrica (3-12 m), al este de Pitrufquén (6-18 m), y alrededor de Teodoro Smith (0-15 m).

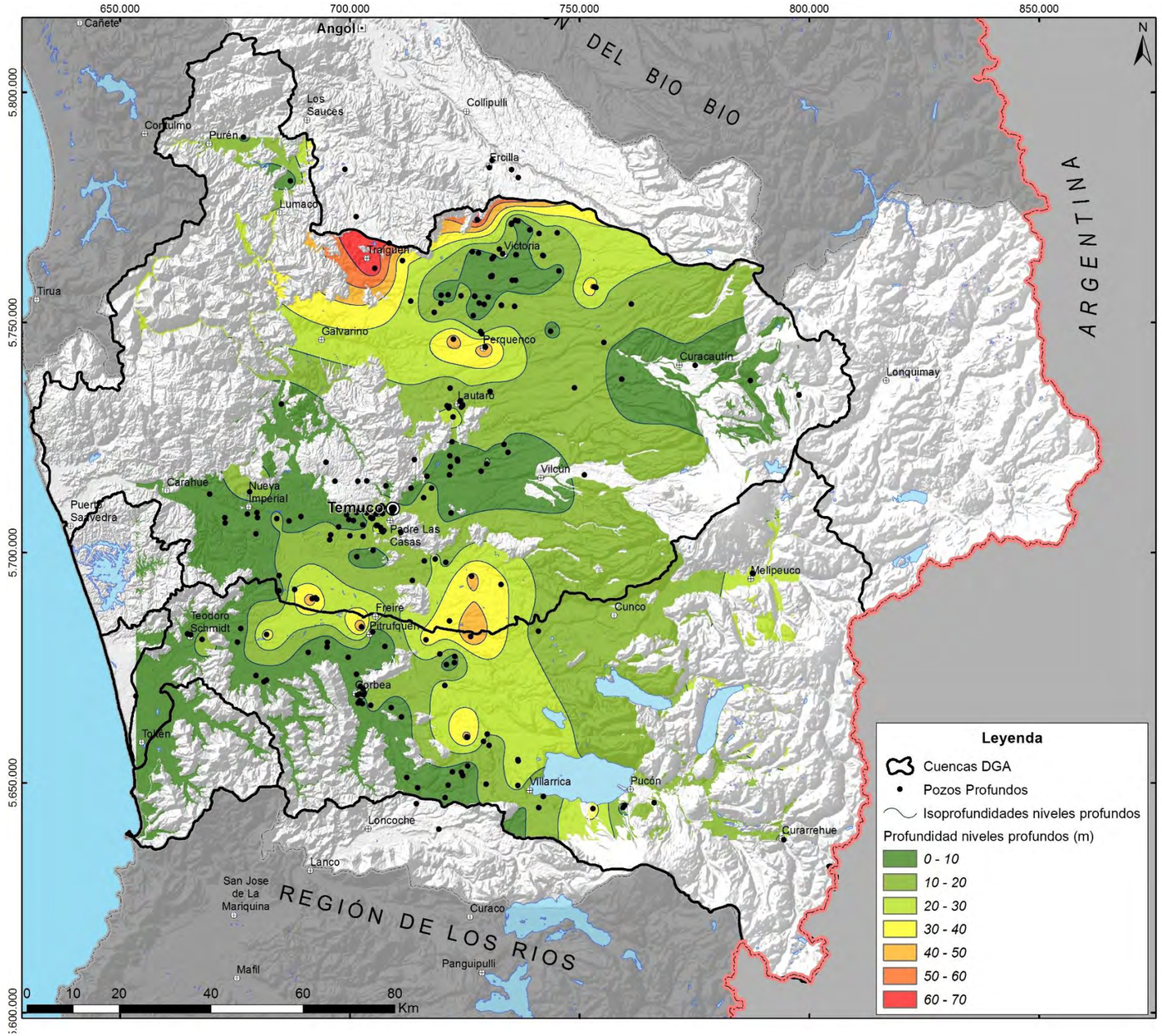


Figura 9-10: Mapa de Isoprofundidades del agua subterránea para pozos profundos

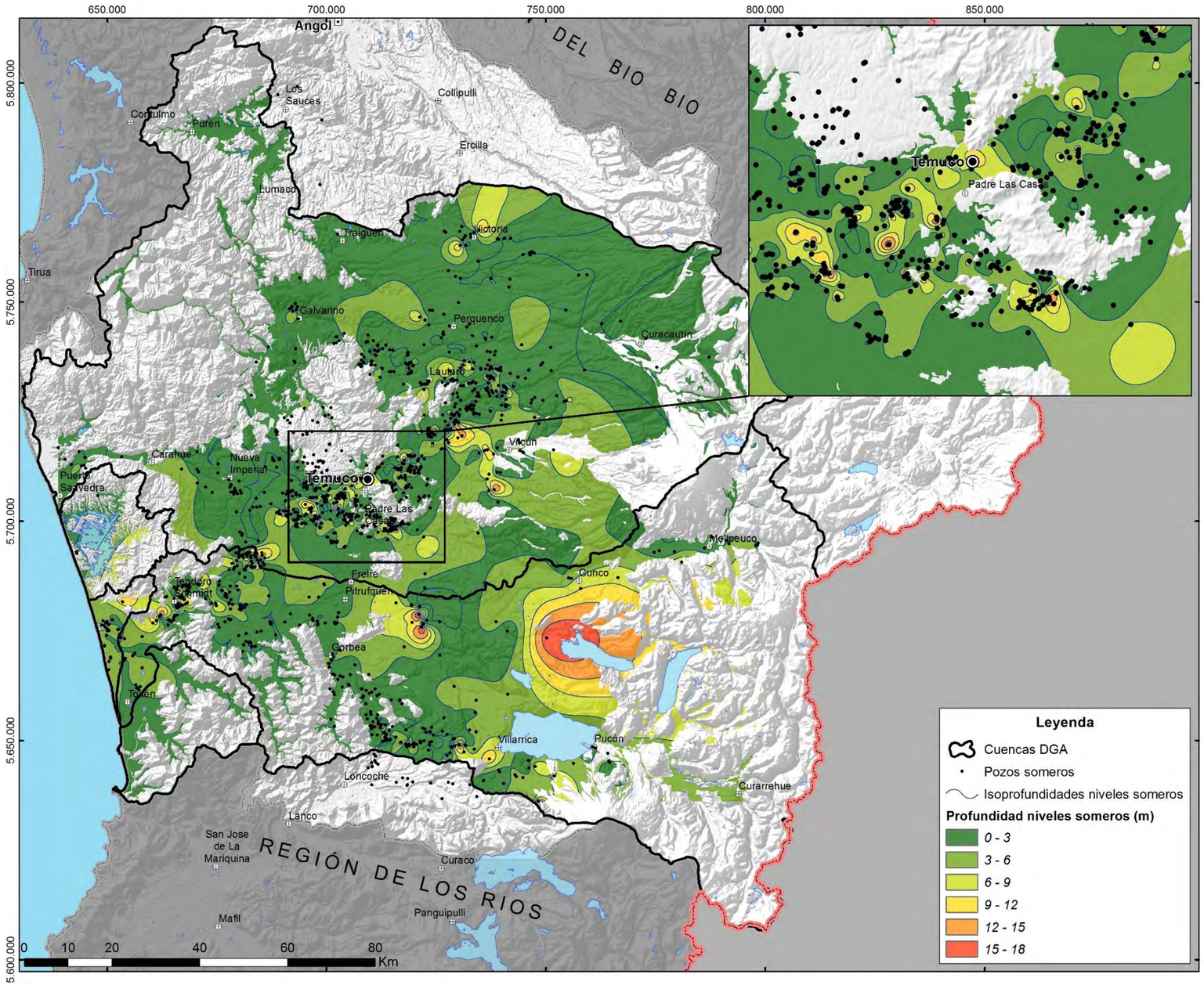


Figura 9-11: Mapa de Isoprofundidades del agua subterránea para pozos Someros

9.3.2 Superficie Piezométrica

9.3.2.1 Pozos Profundos

La Figura 9-12 muestra la superficie piezométrica realizada 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 9-12 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 a Imperial, y luego uno saliente desde Imperial al Toltén.

En la cuenca del río Toltén, el río homónimo 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.

9.3.2.2 Pozos Someros

La Figura 9-13 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 es recalcar que la forma de las isopiezas son similares a las curvas topográficas, dado que la mitad de las captaciones presentan profundidades menor a 5 m. La Figura 9-13 no muestra la interacción entre las cuencas de los ríos Imperial y Toltén, tal como fue observada en los pozos profundos.

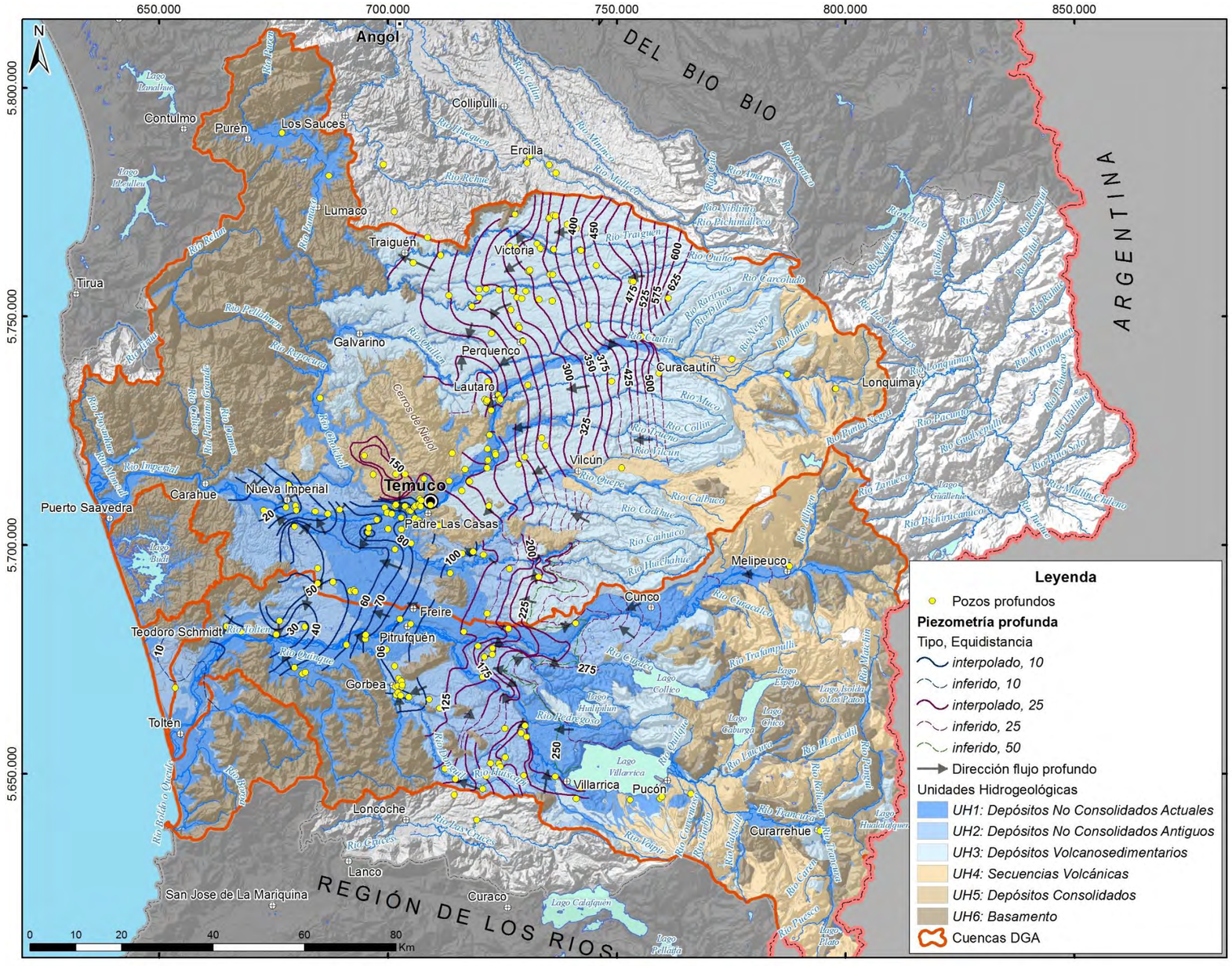


Figura 9-12: Superficie Piezométrica para pozos Profundos

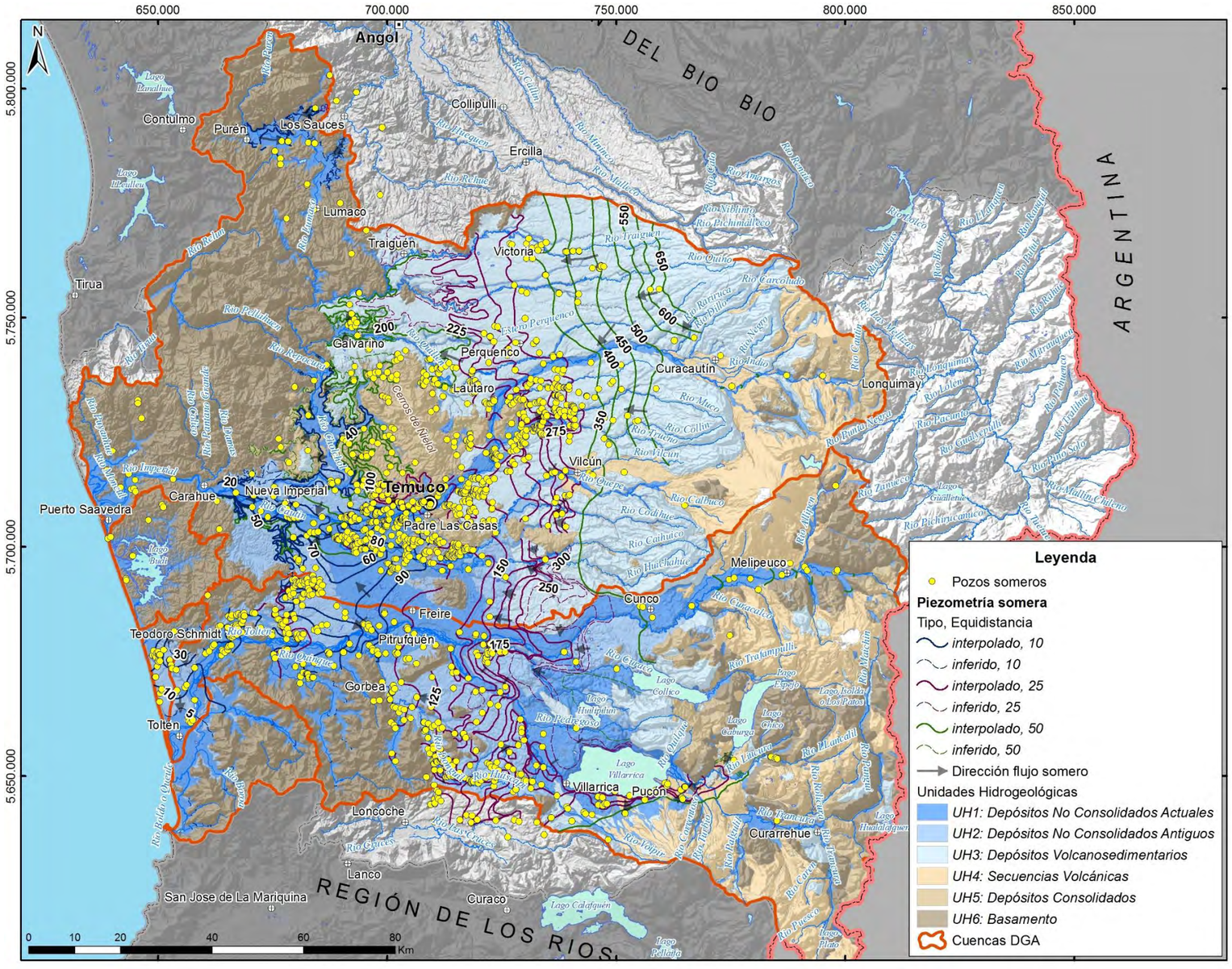


Figura 9-13: Superficie Piezométrica para pozos Someros

9.4 HIDROQUÍMICA

La composición química de las aguas superficiales y subterráneas de las cuencas estudiadas en la región de La Araucanía 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. En el interior de la región, no se aprecian diferencias importantes en la composición de las aguas ya que son 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.

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. Además, se concluye que la recarga ocurre tanto localmente como en zonas más elevadas, ya que la correlación del $\delta^{18}O$ y el $\delta^{2}H$ (‰) con la altura, indica que un grupo de muestras se ubica bajo el gradiente isotópico de las lluvias por lo que se asocia con la razón isotópica de aguas precipitadas a mayor altura.

9.5 MODELO HIDROLÓGICO 3D

Con las unidades hidrogeológicas ya definidas, se construyó un modelo hidrogeológico en 3D utilizando el software Leapfrog Hydro. Para este modelo se utilizó fundamentalmente la información geológica subsuperficial, que corresponde a la estratigrafía de los pozos perforados en el área, y cuya descripción se encuentra en los expedientes de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas recopilados. Sin embargo, para conocer la geometría en profundidad de las unidades hidrogeológicas definidas, se utilizó la información geofísica que se obtuvo de la zona de estudio, que se resume a continuación.

9.5.1 Interpretación de perfiles TEM en el Modelo Hidrogeológico

Tanto los resultados gravimétricos como los de transiente electromagnético (TEM) fueron utilizados para la estimación de las geometrías de las unidades hidrogeológicas definidas. A continuación, se presenta la interpretación de los perfiles TEM representativos, cuya ubicación se muestra en la Figura 9-14.

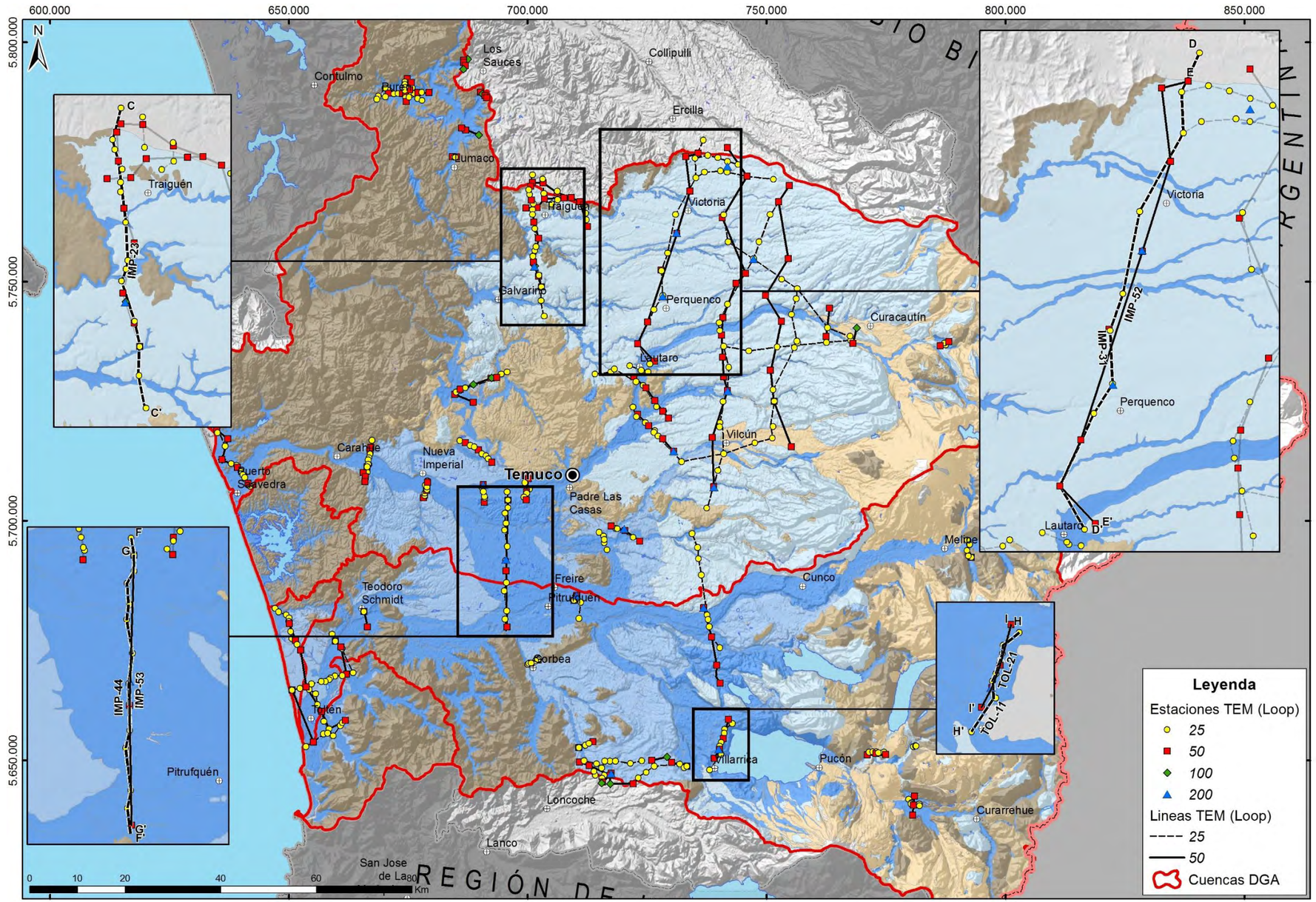


Figura 9-14: Planta de Ubicación de Perfiles TEM

Traiguén

En la zona de Traiguén, las estaciones TEM de 25 m de loop muestran una zona de baja resistividad que comienza a los 50-60 m de profundidad, como se puede inferir del perfil IMP-23 de la Figura 9-15. Éste, ubicado sobre depósitos volcanosedimentarios (UH3), presenta una capa superficial menos resistiva hasta los 50-60 m de profundidad, seguida de la capa de baja resisitividad ya nombrada; sin embargo, los perfiles TEM de 25 m de loop están diseñados para explorar los primeros 75 m de profundidad, y por ende bajo ésta se produce una pérdida de señal, la que baja la confiabilidad de sus resultados.

Lautaro-Victoria

Las estaciones de 25 m de loop en este sector muestran un nivel de baja resistividad, que comienza cercano a los 30 m de profundidad, tal como se observa en el perfil IMP-31 (Figura 9-16). Este perfil, ubicado sobre los depósitos volcanosedimentarios de la UH3 y en parte sobre los depósitos no consolidados actuales de la UH1, muestra un resistividades relativamente altas, con una reducción de la resistividad en profundidad, lo cual ocurre de forma homogénea a lo largo de todo el perfil. Este brusco descenso de la resisitividad coincide, al igual que en el perfil IMP-21, con una pérdida de señal a profundidades mayores a 75 m. De todos modos, en la Figura 9-16 se observa una continua capa de altas resistividades relativas, que se correlaciona con el relleno sedimentario de UH3.

Las estaciones de 50 m de loop, observadas en el perfil IMP-52 (Figura 9-17), muy cercano al perfil IMP-31, muestra una mayor variabilidad de las resistividades que éste. En general, este perfil presenta un nivel menos resistivo que comienza bajo los 100 m profundidad. Al igual a lo observado en el perfil IMP-31, este perfil presenta una capa de al menos 100 m, que se correlaciona con los rellenos sedimentarios de la UH3 y la UH1.

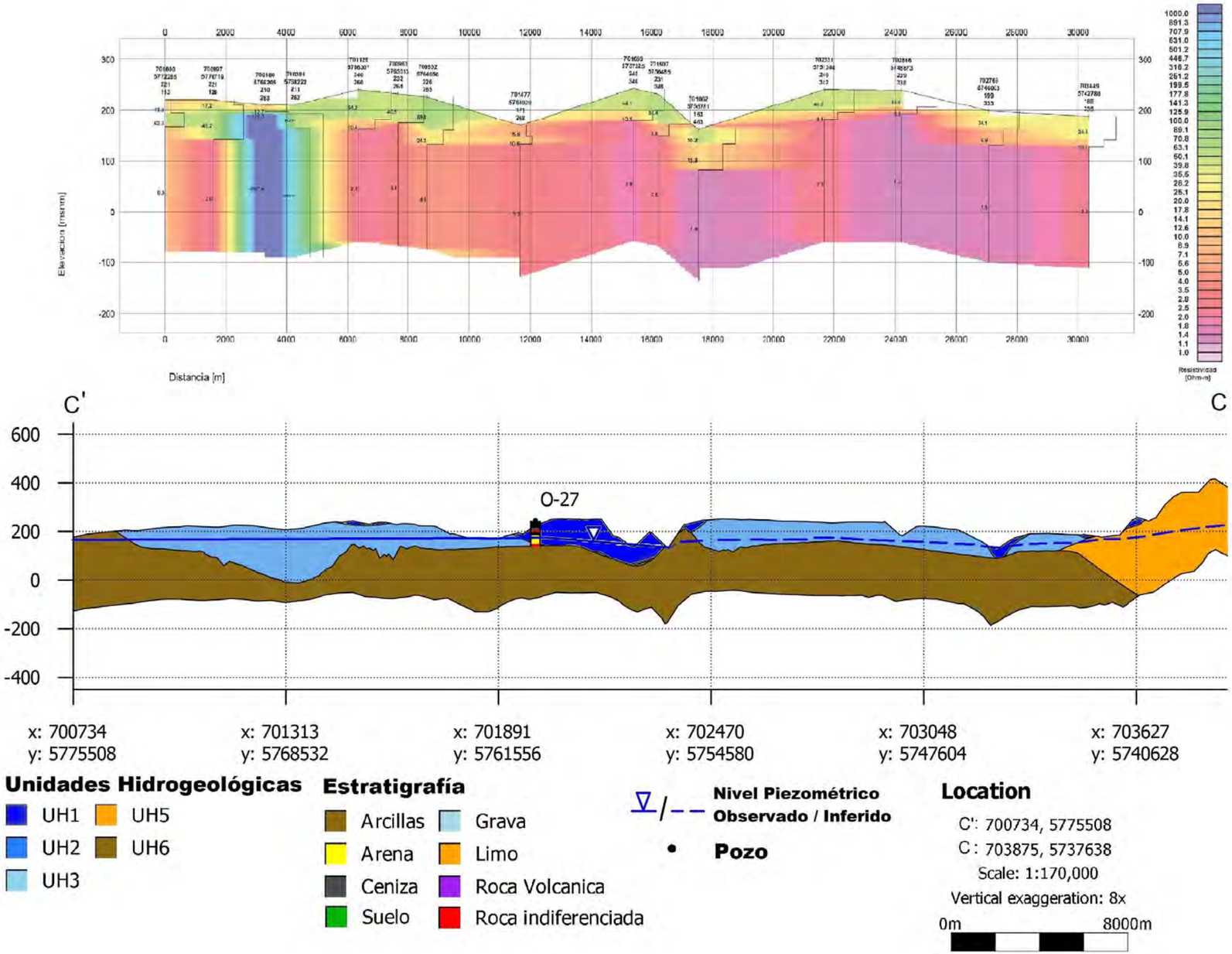


Figura 9-15: Perfil Resistivo IMP-23, zona de Traiguén

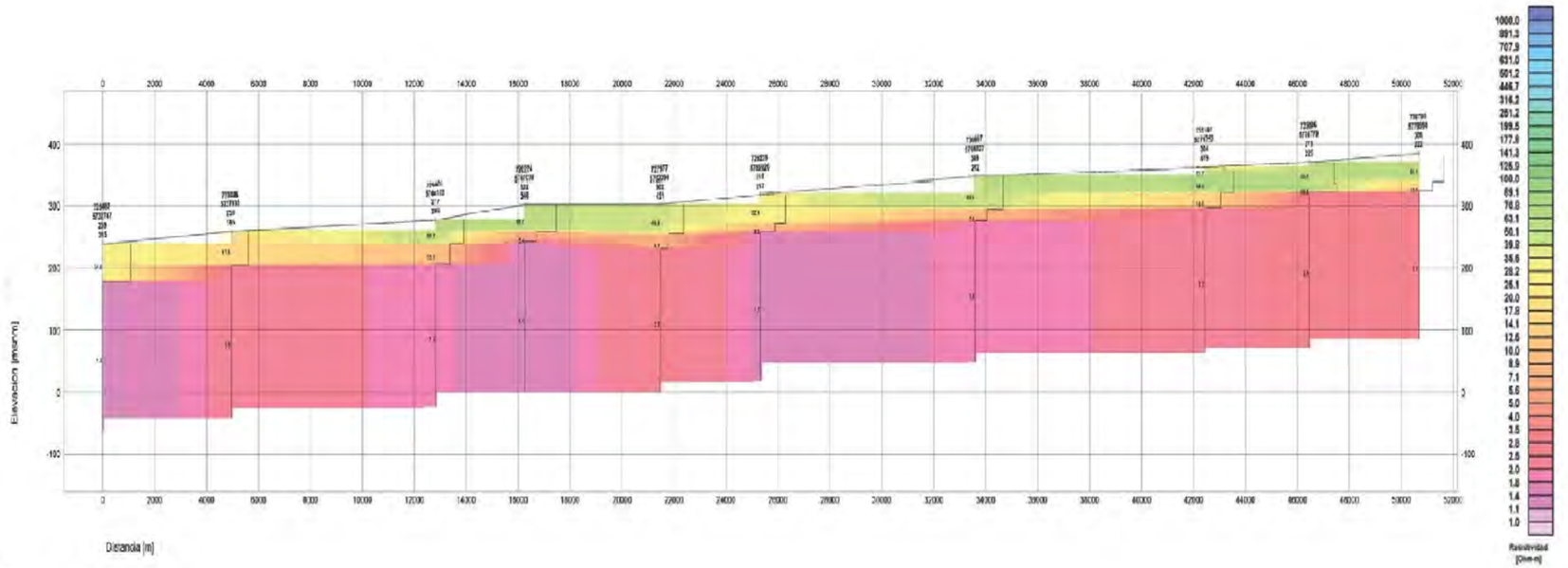


Figura 9-16: Perfil Resistivo IMP-31, zona de Lautaro-Victoria

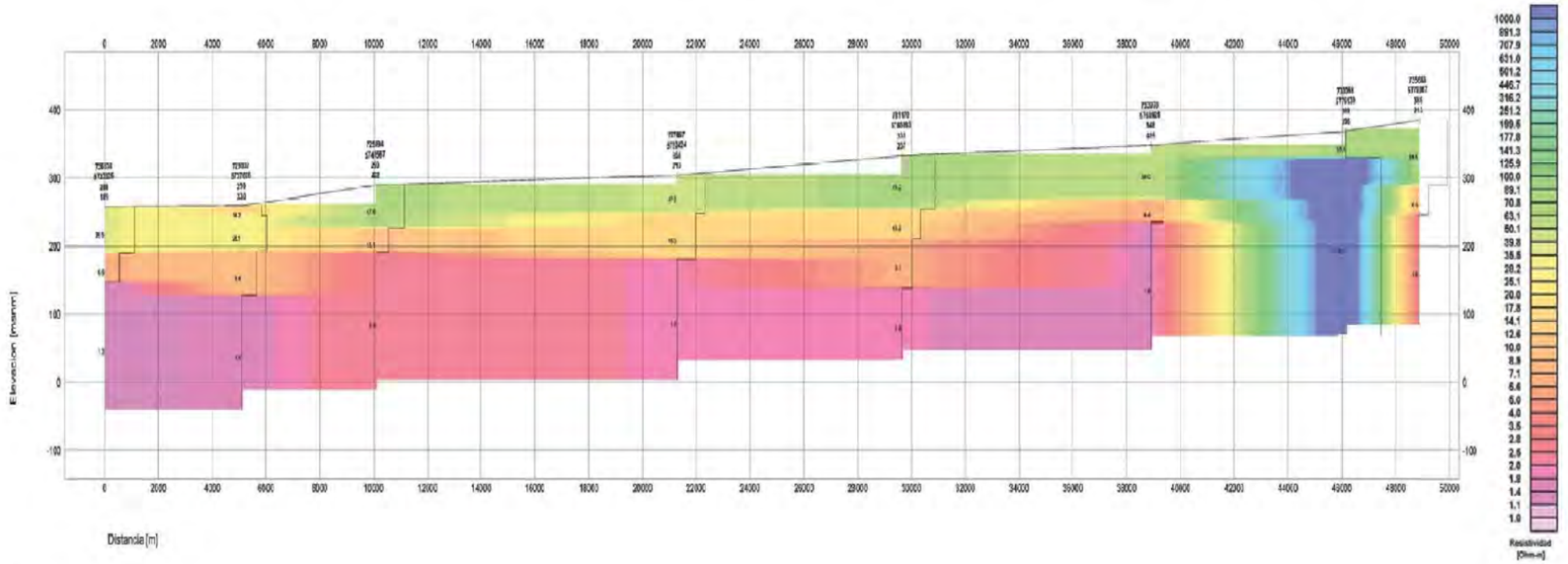


Figura 9-17: Perfil Resistivo IMP-52, zona de Lautaro-Victoria

Labranza

El perfil IMP-44 está ubicado sobre depósitos glaciofluviales (no consolidados) de la UH1 (Figura 9-18). Está conformado por estaciones de 25 m de loop y presenta una capa de resistividades relativamente medias a altas en su parte más somera, disminuyendo a una zona de baja resistividad que comienza aproximadamente a los 40-50 m de profundidad en su extremo norte, y a los 100 m en su zona sur. La capa de baja resisitividad se correlaciona en esta zona con los depósitos no consolidados actuales y antiguos de las UH1 y UH2.

El perfil IMP-53, ubicado en la misma traza del perfil IMP-44, está conformado por estaciones de 50 m de loop, lo que sugiere mayor confiabilidad de sus resultados a una profundidad mayor a 75 m (Figura 9-19). En este perfil se observa la capa superficial de relleno sedimentario de las UH1 y UH2, seguido de una zona de relativamente menor resistividad a profundidades mayores a 100 m, mayor que la indicada en el perfil IMP-44.

Villarrica

A continuación se muestran dos perfiles ubicados en la desembocadura del lago Villarrica, que cruzan depósitos morrénicos de las UH 1 y 2. El perfil TOL-11, interpretado en estaciones de 25 m de loop, muestra amplios rangos de resistividades, como se exhibe en la Figura 9-20. En general, este perfil muestra una capa de relativamente altas a medias resistividades hacia su techo, que se correlaciona con el relleno sedimentario de UH 1 y UH2, de un espesor mayor a 100m. Bajo ésta, se observa una capa de baja resisitividad hacia su extremo sur, mientras que hacia su extremo norte se exhiben altas resistividades. Sin embargo, los 25 m de loop de este TEM no permiten asignar una confiabilidad alta a profundidades mayores a 75m.

Similar a lo observado en el perfil TOL-11, el perfil TOL-21 muestra, en su techo, una capa de resistividad relativamente alta, que se correlaciona con el relleno sedimentario de las UH 1 y 2 (Figura 9-21). Luego, a una profundidad mayor a 150 m, que corresponde aproximadamente al límite de confiabilidad alta para un perfil TEM con loop de 50 m, se observa un brusco descenso de resistividades. Esto se debe posiblemente a una pérdida de señal en profundidad.

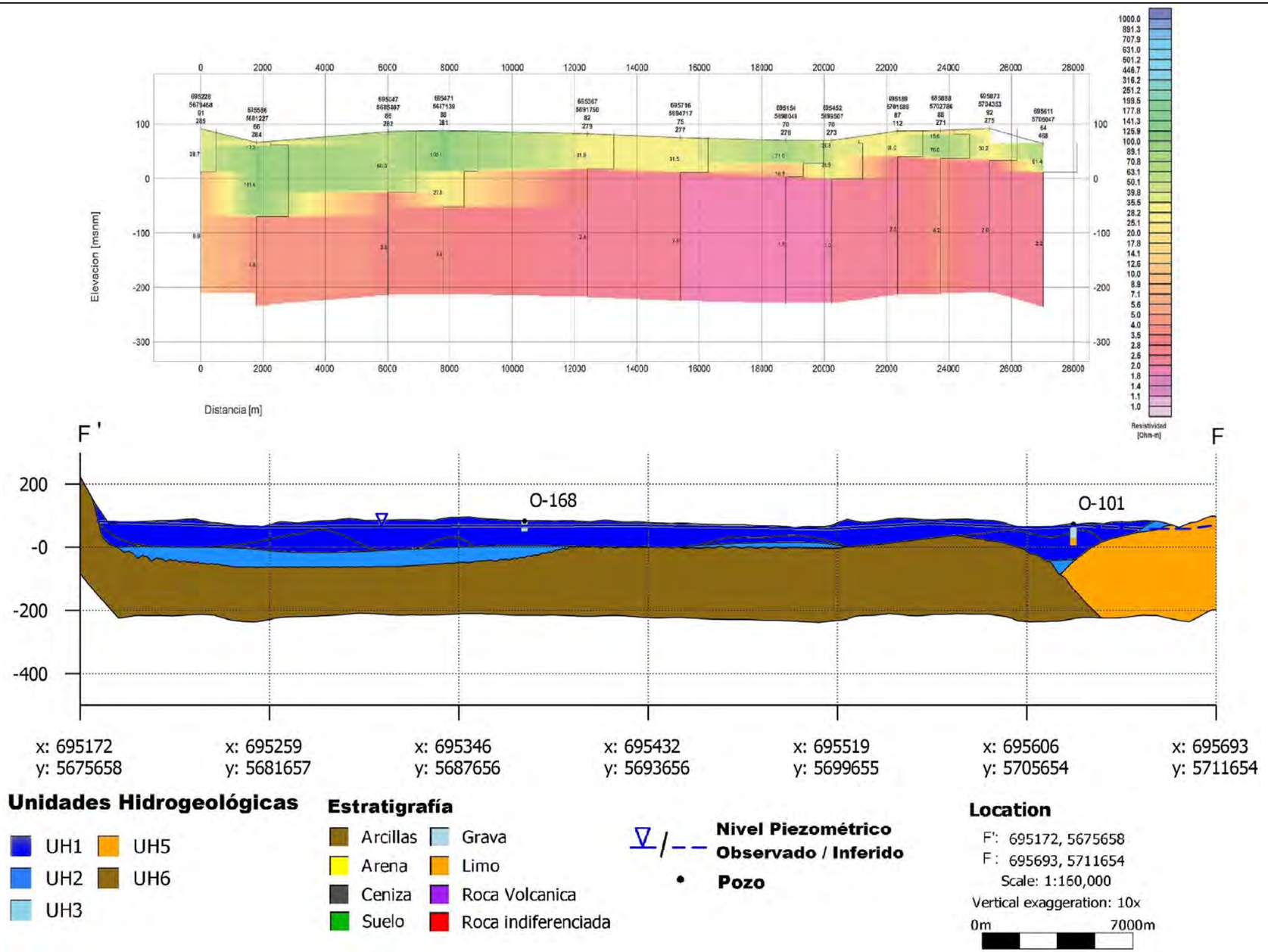


Figura 9-18: Perfil Resistivo IMP-44, zona de Labranza

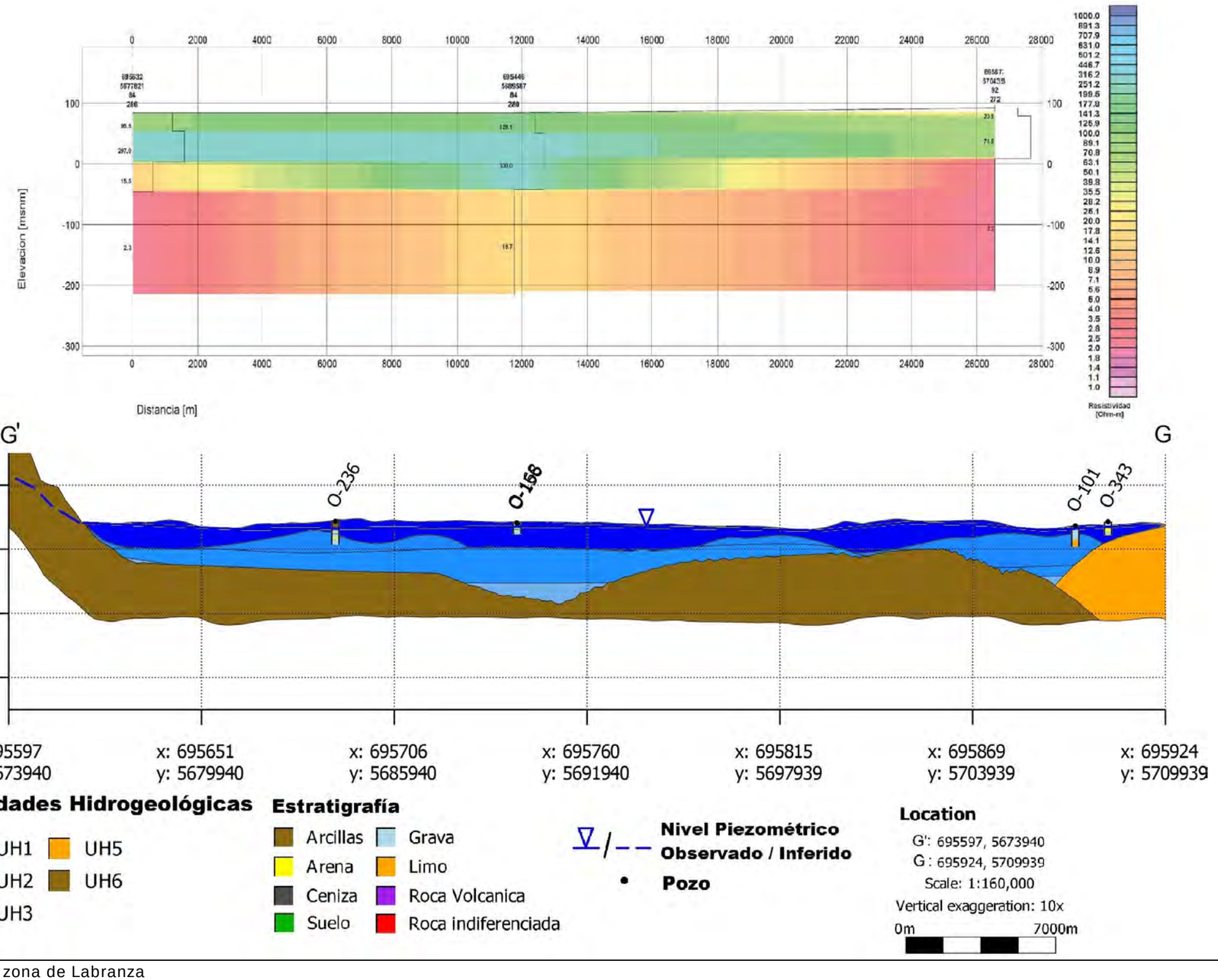


Figura 9-19: Perfil Resistivo IMP-53, zona de Labranza

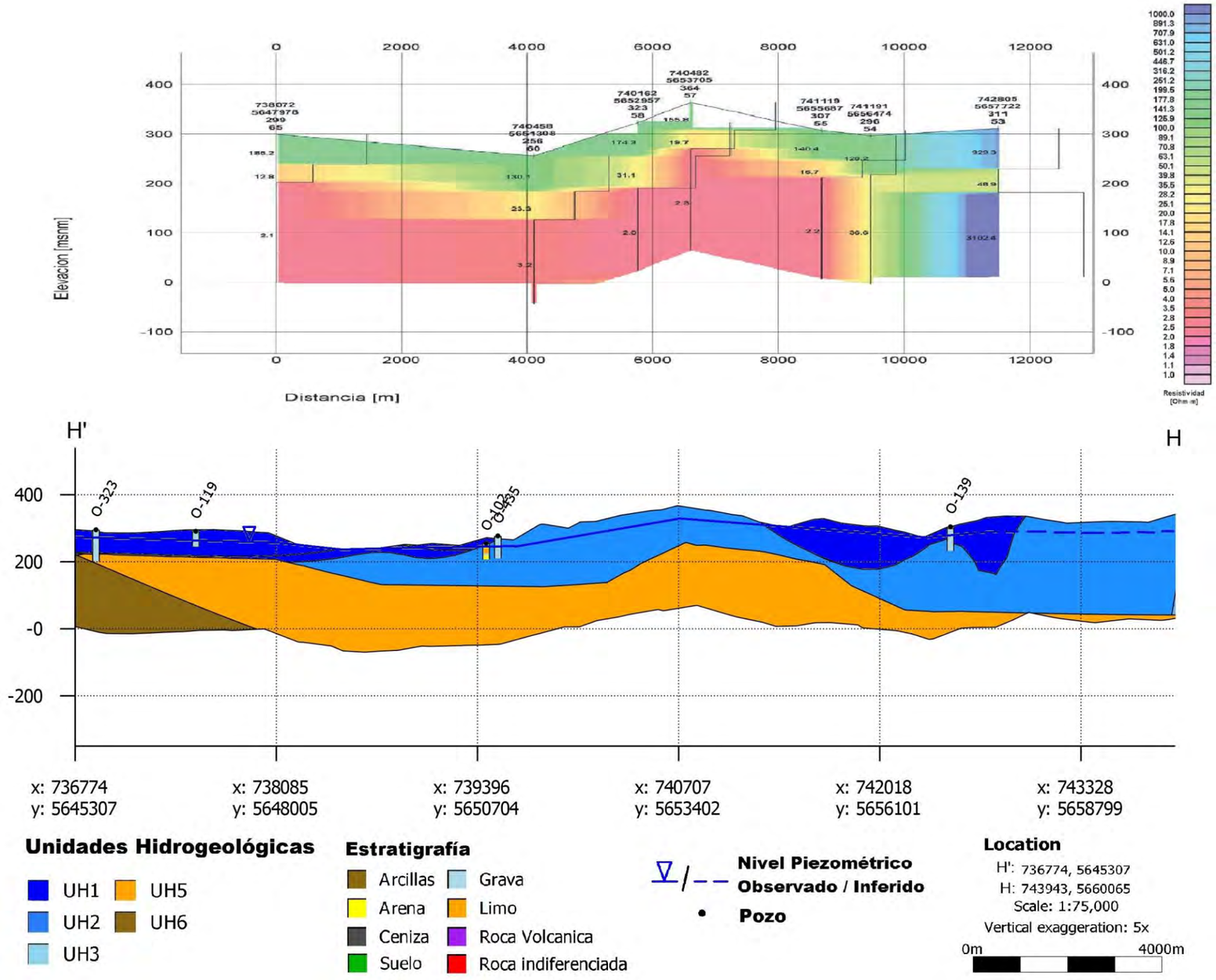


Figura 9-20: Perfil Resistivo TOL-11, zona de Villarrica

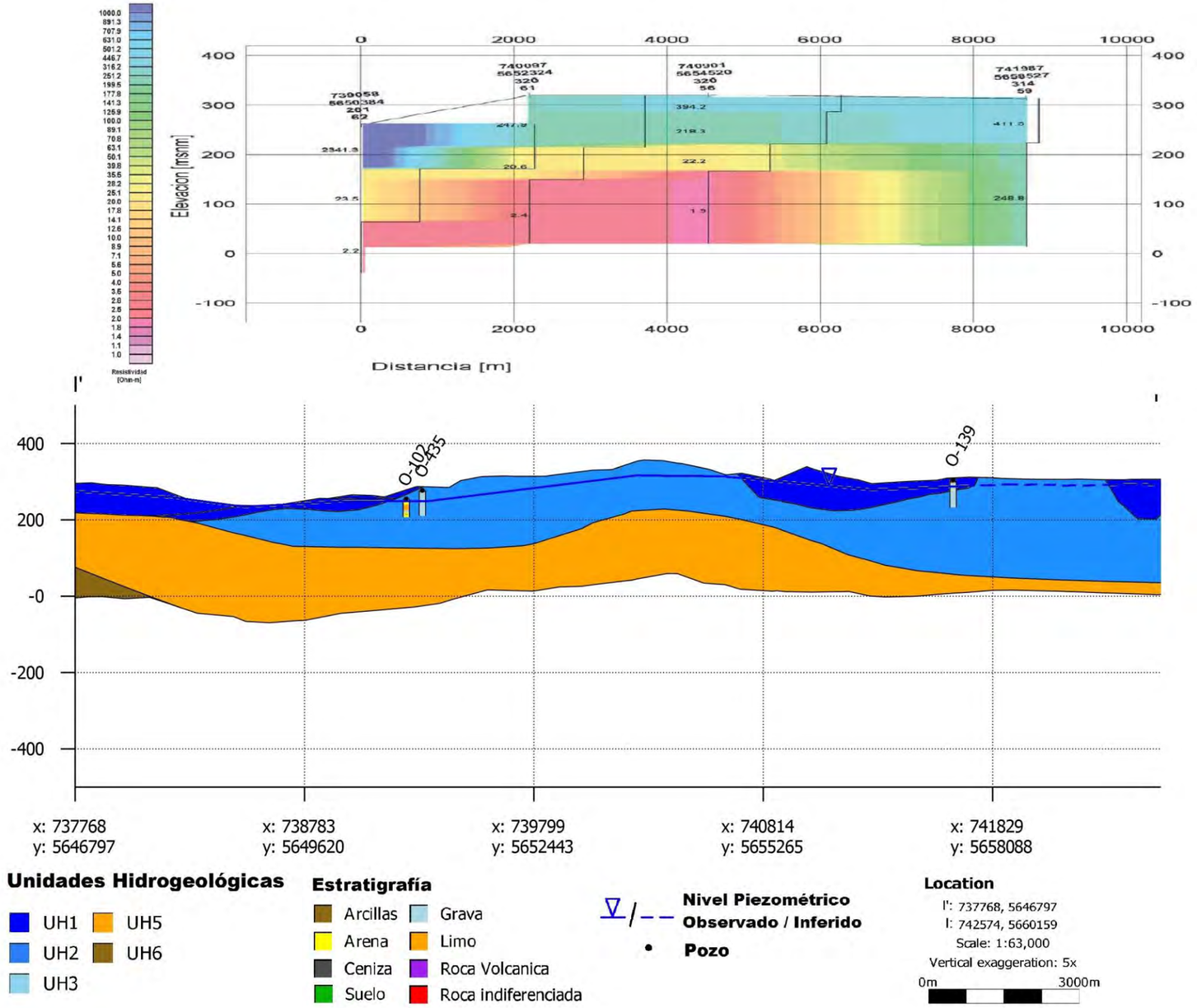


Figura 9-21: Perfil Resistivo TOL-21, zona de Villarrica

9.5.2 Construcción del Modelo Hidrogeológico 3D

La información de geología superficial, geología subsuperficial y la información geofísica, fue analizada mediante el software Leapfrog Hydro, con el que se construyó un modelo geológico e hidrogeológico en 3D, cuyo objetivo es obtener una geometría del sistema hidrogeológico regional para el modelo numérico de funcionamiento acuífero de las cuencas (presentado mas adelante en el informe). Es por esto que se privilegió realizar un trabajo de detalle en la zona central de las cuenca de los ríos Imperial y Toltén (zona activa del modelo numérico), mientras que hacia los márgenes (zonas inactivas o fuera del modelo numérico) no se realizó un control detallado; por tanto, aparecen "aflorando" unidades de relleno que no necesariamente existen en superficie (ej. Cordillera de Los Andes).

Las principales fuentes de información corresponden a los contactos hidrogeológicos superficiales, a los pozos que tengan una profundidad tal que permitan observar algún contacto entre dos unidades, y a la información gravimétrica y perfiles TEM. Las geometrías de las seis unidades hidrogeológicas definidas fueron construidas mediante interpolaciones realizadas con dicha información primaria y secundaria. Cabe destacar que la mayoría de los pozos recopilados a partir de los expedientes no poseen una profundidad que permita observar algún contacto entre unidades, por lo que ellos son útiles en caso que se requiera realizar un modelo local.

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, como se puede observar en la Figura 9-22. En ésta se aprecia que a la máxima profundidad que se observa la UH6 es aproximadamente 1500 mbnm, 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. Cabe destacar que la gran mayoría de los pozos recopilados no logran cortar al basamento, a excepción de los pozos de ENAP. por lo que la información geofísica es trascendente a la hora de construir su geometría.

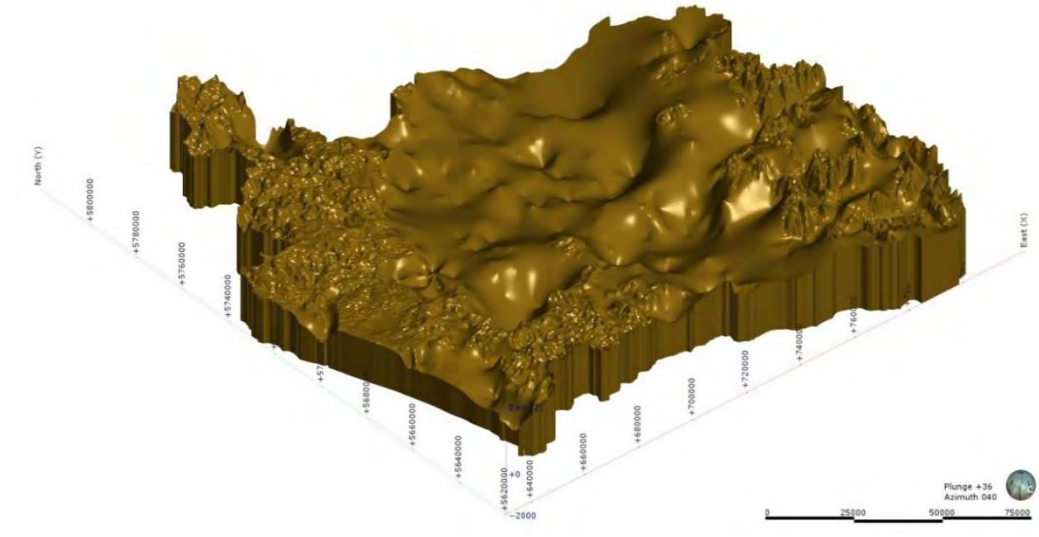


Figura 9-22: Vista en 3D del volumen de la UH6

Sobre el basamento se localiza la UH5, que corresponde a los depósitos consolidados indiferenciados (Figura 9-23). 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.

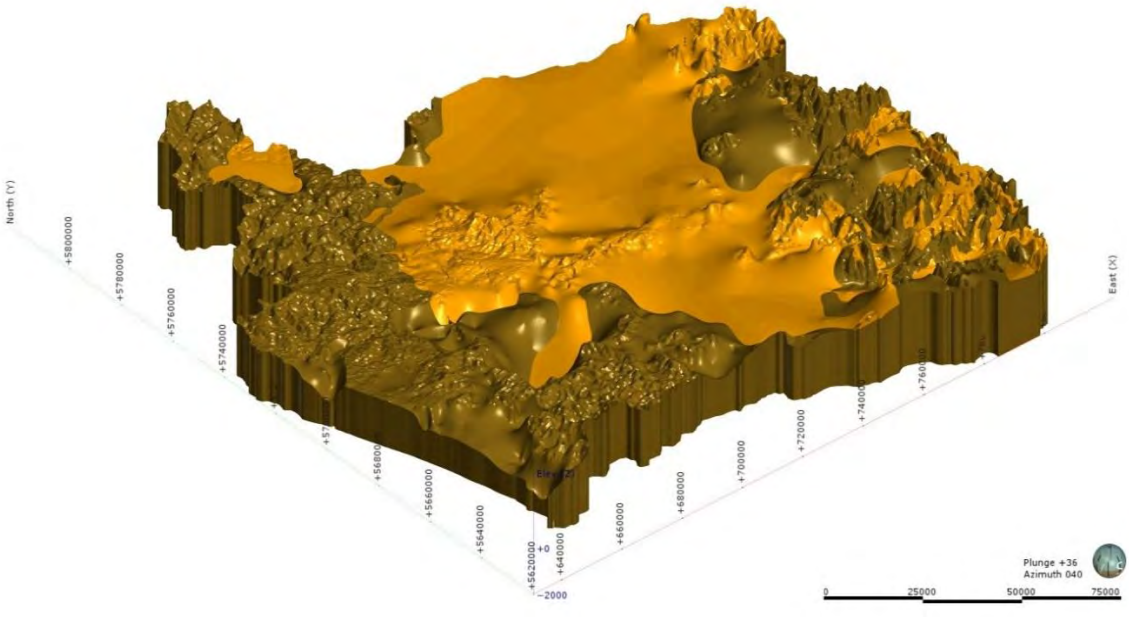


Figura 9-23: Vista en 3D del volumen de la UH5

La UH4, que representa a las secuencias volcánicas, limita su extensión al sector oriental de la zona de estudio, como puede apreciarse en la Figura 9-24. Esta unidad se deposita sobre UH5 y UH6, y subyace en partes a las unidades UH3 y UH2. Su potencia máxima, 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 de la región.

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 (Figura 9-25); sin embargo, 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 tanto de la información de pozos perforados en ella, como 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), como se observa en la Figura 9-26. 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 (Figura 9-27). La potencia máxima de éstos es cercana a los 100 m en la zona media de la cuenca del Río Toltén.

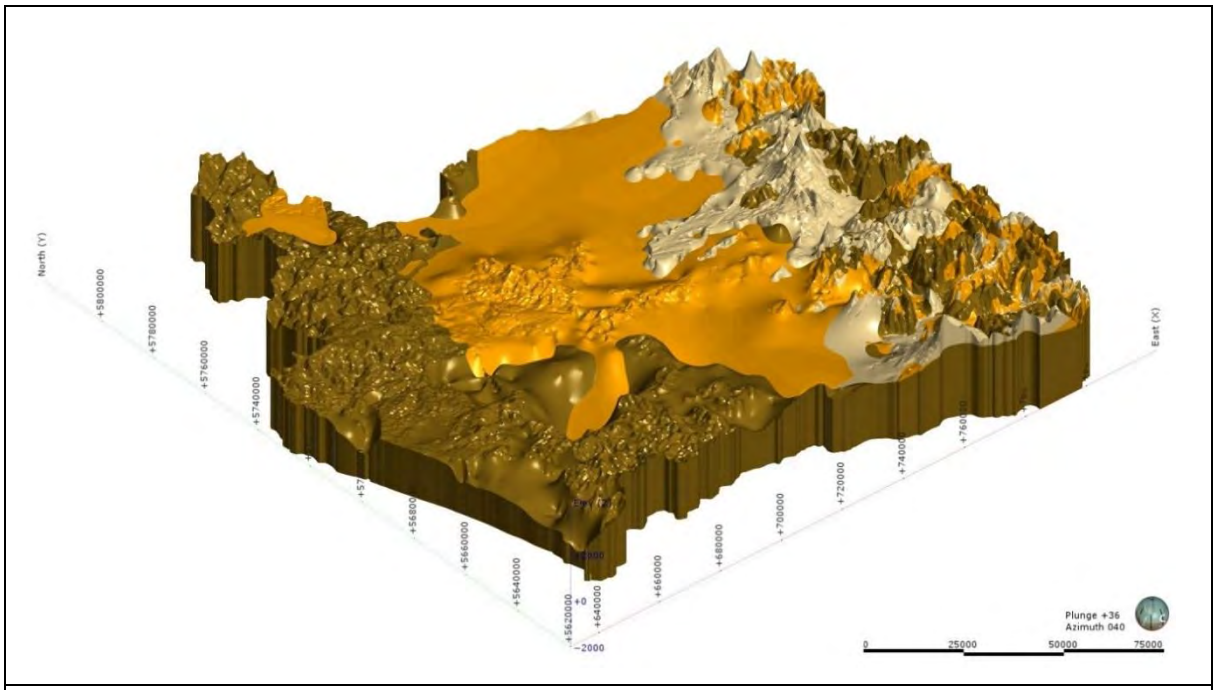


Figura 9-24: Vista en 3D del volumen de la UH4

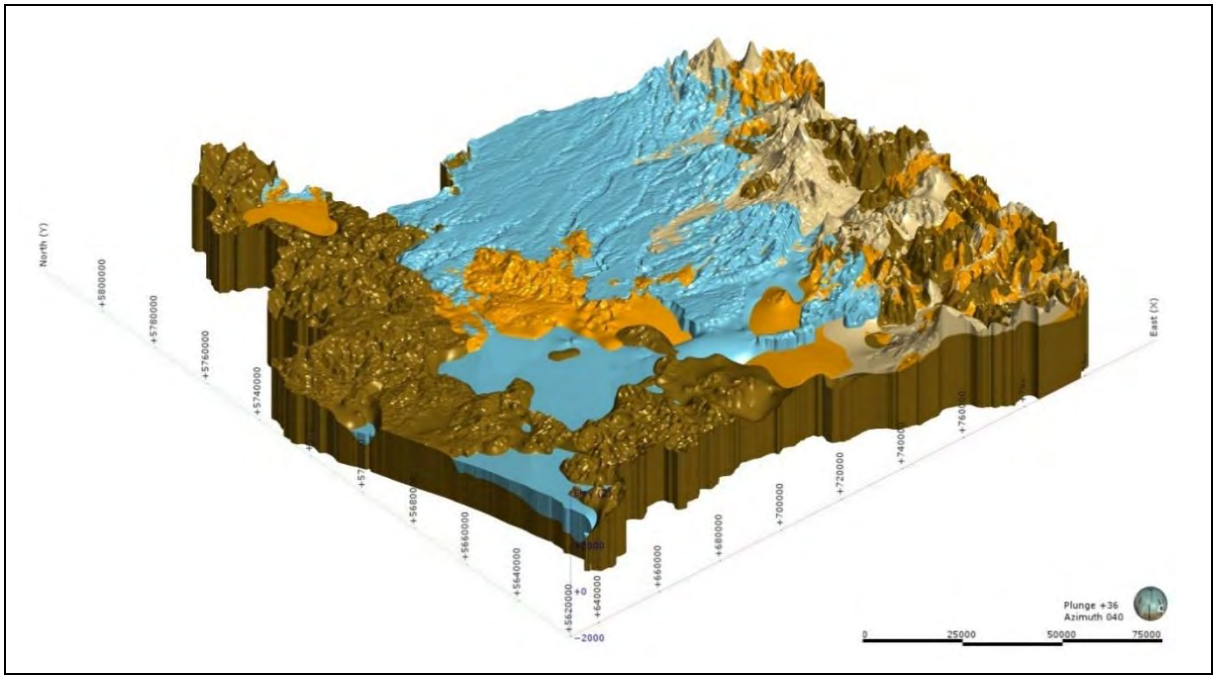


Figura 9-25: Vista en 3D del volumen de la UH3

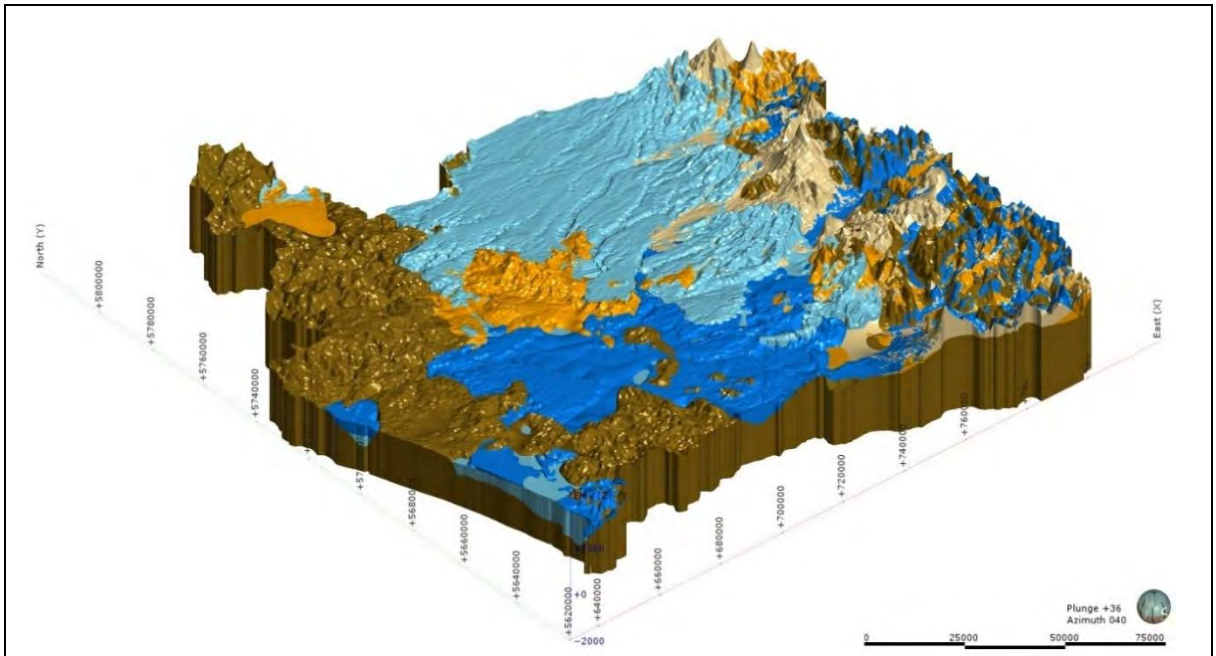


Figura 9-26: Vista en 3D del volumen de la UH2

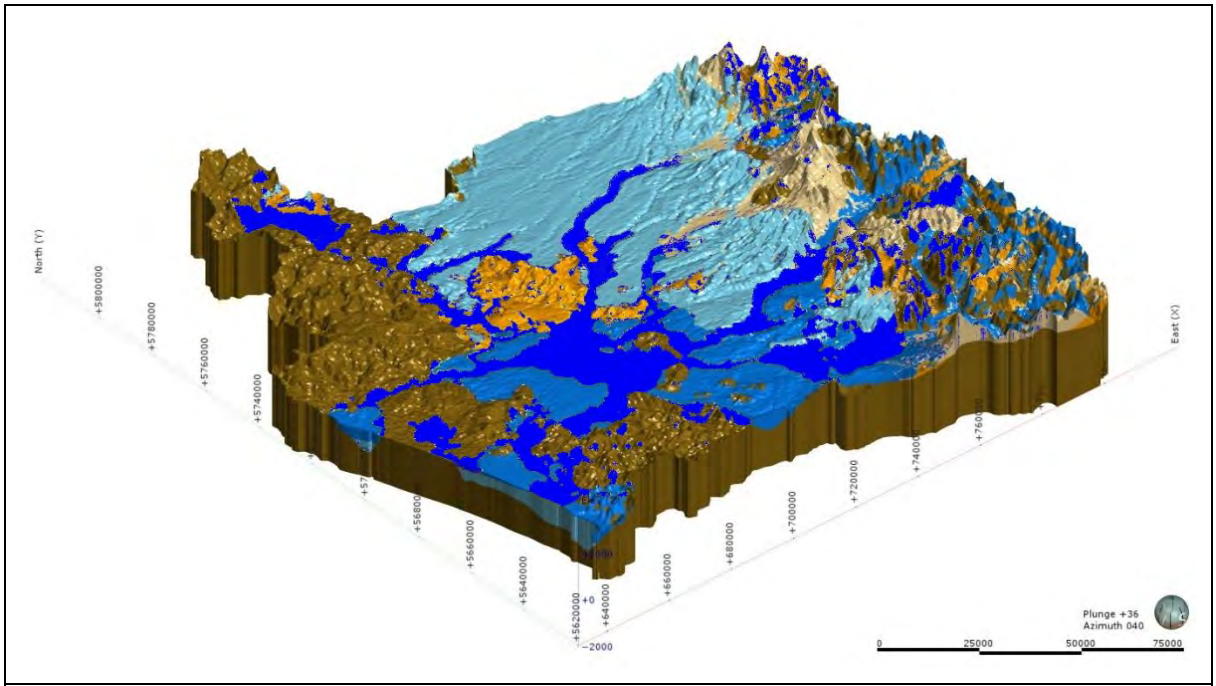


Figura 9-27: Vista en 3D del volumen de la UH1

9.5.3 Síntesis y traspaso al modelo numérico

Según la información hidráulica analizada, sumado a las descripciones geológicas de las unidades hidrogeológicas definidas, es posible reconocer similitudes en los comportamientos hidráulicos de dos o más unidades. La Figura 9-7 muestra que, al menos estadísticamente, la unidad UH2 y UH3 presentan un patrón similar en cuanto a su conductividad hidráulica. Además, debido a la imposibilidad de definir con claridad en profundidad los contactos entre ellas, sumado a la similitud granulométrica entre ambas, permite la unión de estas dos unidades. Similar al caso anterior, la falta de información hidráulica de las unidades UH4, UH5 y UH6, sumado a sus similitudes en cuanto al tipo de porosidad que poseen (las tres son rocosas con porosidad secundaria), también permiten su fusión en aras de facilitar el entendimiento del modelo conceptual de la región.

Por ende, las 6 unidades hidrogeológicas que fueron el foco del modelo conceptual se reducen a 3, con el fin último de permitir su modelación numérica con una dificultad menor que si se modelaran las 6 unidades. 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 9-28 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 del agua subterránea en algunos sectores de la región. Estas capas de menor granulometría no tendrían continuidad lateral, según lo observado en el análisis estratigráfico de los pozos recopilados. Esta diferenciación hidráulica podría incluso afectar a una misma unidad hidrogeológica, debido a la gran heterogeneidad observada en ellas.

Una vez que se tienen las geometrías de las unidades hidrogeológicas seleccionadas para su inclusión en el modelo numérico, se crean grillas de distintas magnitudes mediante el uso del mismo software Leapfrog Hydro, las que son exportadas al software de modelación numérica de flujos.

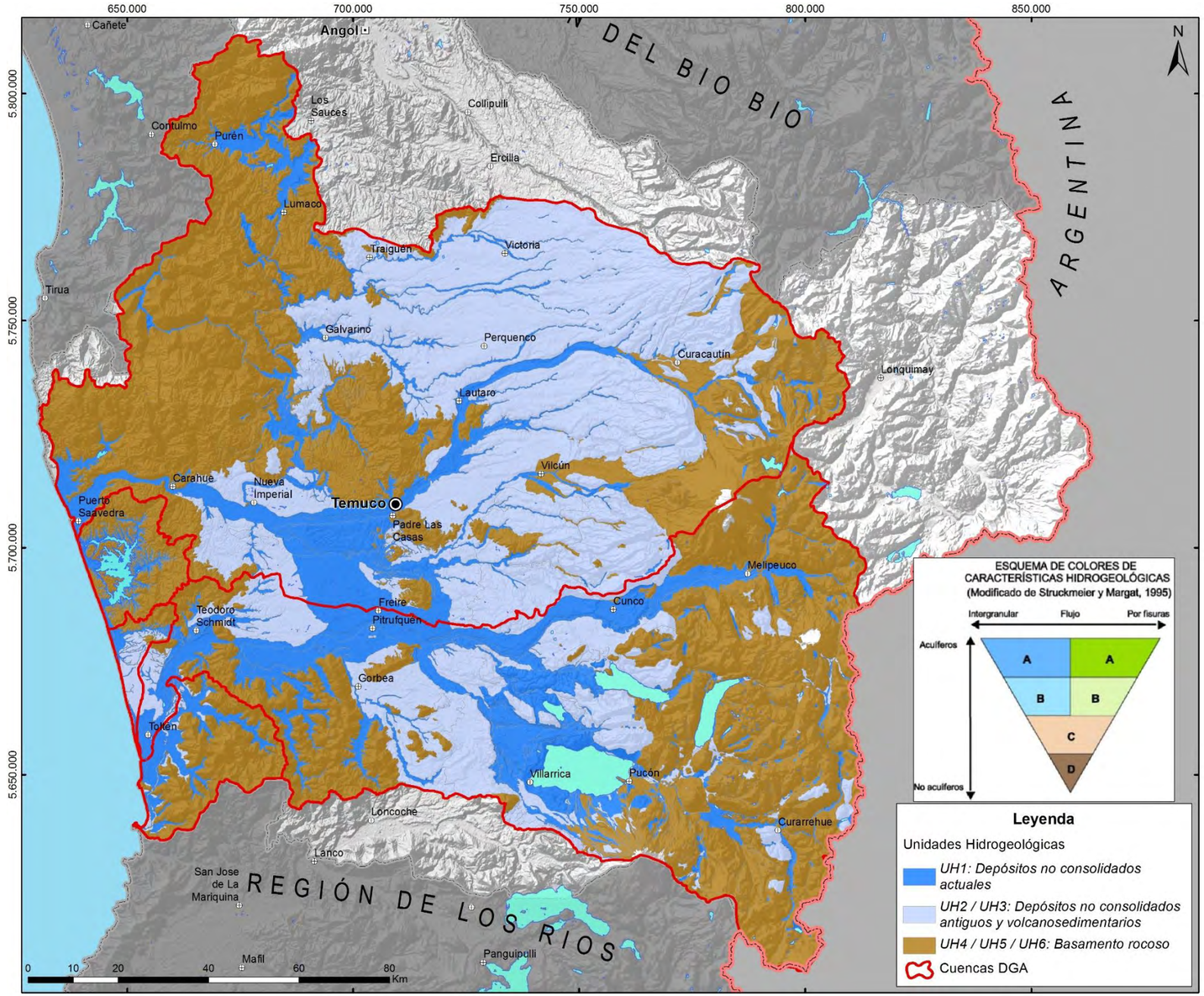


Figura 9-28: Distribución de las unidades hidrogeológicas que se utilizarán en el modelo numérico de flujos

9.6 BALANCE HIDROGEOLÓGICO

En esta sección se presenta el balance hidrogeológico conceptual que define el sistema hídrico estudiado. El balance será utilizado para definir los distintos flujos de entrada y salida del modelo numérico construido.

Este análisis pretende que a partir del balance hidrológico presentado, estimar la disponibilidad de agua subterránea y su interacción con el sistema superficial.

El balance hidrogeológico, y considerando que el modelo numérico será calibrado en régimen permanente, se realiza considerando el promedio en el largo plazo de cada variable involucrada, y está acotado al dominio definido para el modelo numérico.

El balance hidrogeológico se realiza en el volumen subterráneo, que a su vez está formado por un volumen subsuperficial y por el acuífero del sistema.

Tras la infiltración de las aguas superficiales provenientes de la precipitación, ingresan al volumen subsuperficial desde el cual una parte escurre como flujo base hacia el río, y otra parte percola al acuífero como recarga.

Los ingresos al sistema subterráneo están compuestos por los flujos pasantes provenientes desde el acuífero aguas arriba que ingresan al dominio del modelo, la infiltración de precipitaciones de las cuales un porcentaje escurre al río como flujo subsuperficial y otro porcentaje percola hacia el acuífero, y las infiltraciones provenientes de cursos superficiales. Las salidas corresponden al flujo subterráneo a la salida del dominio del modelo y las descargas a cursos superficiales.

Además, este balance pretende comprender y cuantificar las interacciones entre el río y acuífero.

A continuación se detallan y cuantifican las variables que participan en el sistema.

9.6.1 Ingresos

Infiltraciones desde cursos superficiales en cabecera de cuenca

Para el cálculo de las infiltraciones al acuífero desde los cursos superficiales es importante estimar las pérdidas o ganancias en las que incurren estos cursos superficiales a lo largo de la cuenca. Para ello se debe estimar el flujo inicial en los cursos superficiales, los cuales se representan a través de 15 puntos en donde se han calculado los flujos superficiales principales generados aguas arriba. Estos puntos se presentan en la Figura 9-29. Para la estimación de estos flujos en los puntos de interés, se utilizó la metodología descrita en la sección 5 para la separación del hidrograma. En aquellos puntos de interés en donde no existe estación fluviométrica, se utilizó la transposición de caudales (sección 5) para la generación de las series de caudales.

Como flujo representativo del largo plazo, se consideró el promedio del flujo base de la serie histórica registrada o generada. El flujo base es la parte del flujo superficial que está directamente relacionada la interacción río acuífero debido a que es menos dependiente de eventos instantáneos como la precipitación.

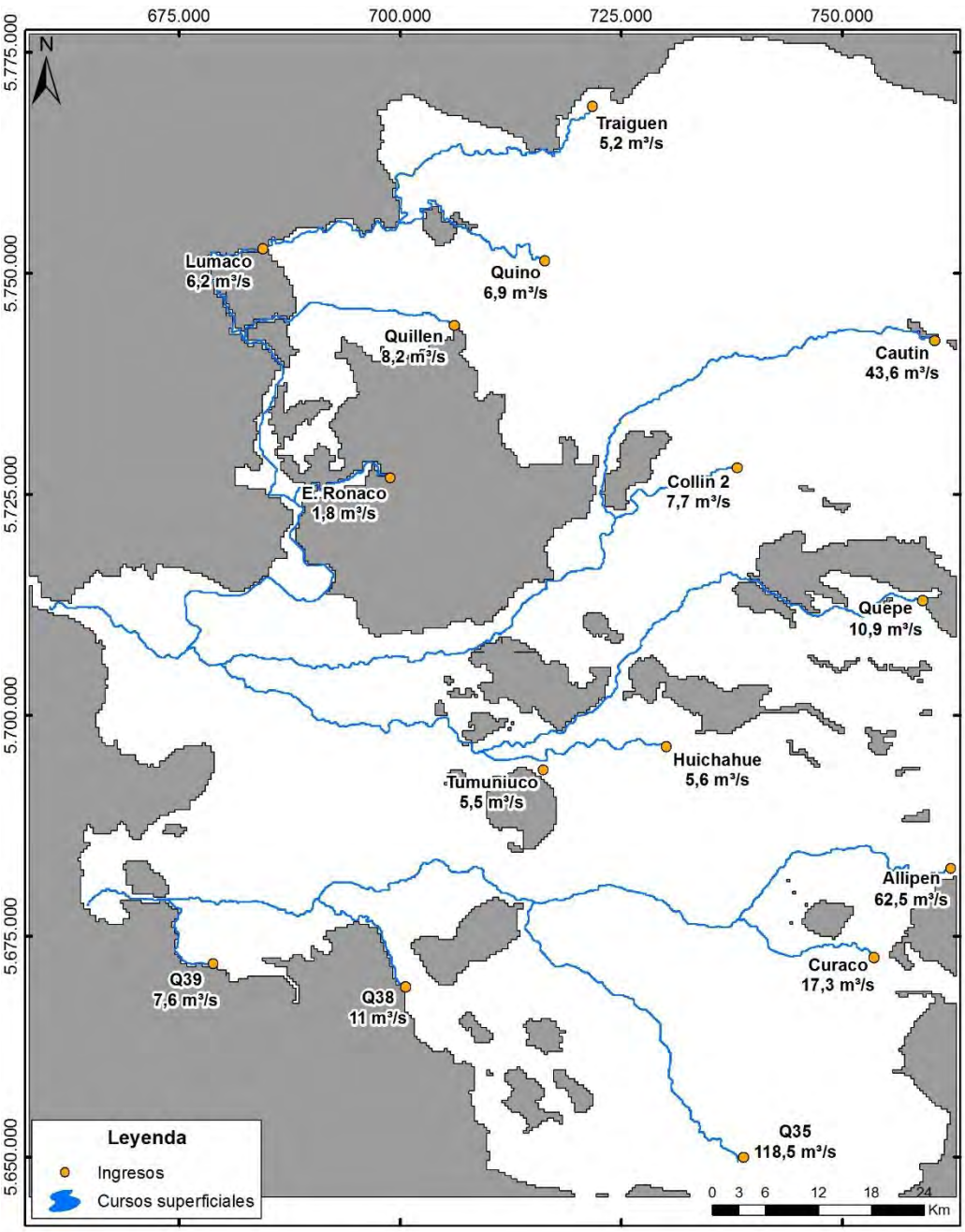


Figura 9-29: Ingreso desde cursos superficiales

Infiltración de precipitaciones

A partir del balance hidrológico presentado en la sección 5, se asumió que las precipitaciones que infiltran hacia el volumen subterráneo, se almacenan en un volumen subsuperficial. Desde este volumen puede escurrir subsuperficialmente y volver al río en forma de flujo base, o percolar hacia el acuífero como recarga.

Ambas variables son estimadas para la totalidad del área de estudio, que incluye las cuencas de los río Imperial y Toltén. En esta sección, se estiman estas variables generadas solamente en el dominio del modelo. Para ello se asume como una producción homogénea en superficie, por lo que para calcular el escurrimiento subsuperficial y la recarga al acuífero es necesario recalcular las superficies de cada zona de riego que se encuentran dentro del dominio. Los resultados se presentan en la Tabla 9-6. A partir de este análisis se estima que los escurrimientos su subperficiales generados dentro del dominio del modelo es de 90 m^3/s, mientras que la recarga al acuífero es igual a 23,5 m^3/s. Cabe mencionar que en el largo plazo el ingreso de las precipitaciones a volumen subterráneo que se salen de éste en forma de volumen subsuperficial, no afecta en sí el balance hidrogeológico, pero permite explicar parte del aumento del flujo base entre la entrada y salida del dominio.

Tabla 9-6: Volumen subsuperficial y recarga regenerada por precipitaciones en las zonas de riego incluidas en el dominio del modelo.

Cuenca	Zona riego	Área km^2	Vol. Subsuperficial m^3/s	Recarga m^3/s
Imperial	ZR I01	55,4	0,2	0,0
	ZR I02	335,2	1,1	0,3
	ZR I03	337,8	3,1	0,8
	ZR I04	355,2	1,7	0,4
	ZR I05	400,8	3,4	0,8
	ZR I06	237,1	1,0	0,3
	ZR I07	302,2	2,0	0,5
	ZR I08	20,8	0,3	0,1
	ZR I09	453,0	3,1	0,8
	ZR I10	330,4	2,7	0,7
	ZR I11	378,9	4,2	1,1
	ZR I12	371,1	3,8	0,9
	ZR I13	744,4	5,3	1,4
	ZR I14	751,5	3,2	0,8
	ZR I15	293,8	1,7	0,4
	ZR I16	780,2	2,8	0,7
	ZR I17	656,9	2,6	0,7
	ZR I18	691,3	3,1	0,8
	ZR I19	669,8	1,0	0,2
	ZR I20	553,9	2,1	0,5
Toltén	ZT01	0,0	0,0	0,0
	ZT02	358,1	3,5	0,9
	ZT03	309,5	3,9	1,3
	ZT04	123,4	2,0	0,6
	ZT05	543,8	6,1	2,0
	ZT06	352,9	3,4	0,9
	ZT07	703,4	7,8	2,0
	ZT08	400,6	3,3	0,9
	ZT09	721,9	7,2	1,8
	ZT10	587,3	3,3	0,8
	ZT11	129,8	0,7	0,2
	Total	**12.950,4**	**89,8**	**23,5**

Recarga Lateral

Como recarga lateral se considera la recarga por precipitaciones en aquellas zonas de riego que fluyen hacia el dominio del modelo. Estas zonas de riego corresponden a ZI01, ZI08, ZI09, ZI10, ZI11, ZI12, ZI18, en la cuenca del río Imperial; y ZT01, ZT02 y ZT03 en el río Toltén. La estimación de la recarga lateral se presenta en la Tabla 9-7, y equivale a 12,2 m^3/s, 7,1 m^3/s en Imperial y 5,1 m^3/s en Toltén.

Tabla 9-7: Recarga lateral por precipitaciones al dominio del modelo.

Zona riego	**Recarga Lateral m^3/s**
ZI01	0,58
ZI08	4,13
ZI09	0,14
ZI10	0,16
ZI11	1,66
ZI12	0,16
ZI18	0,25
ZT01	2,95
ZT02	0,79
ZT03	1,39
Total	**12,2**

9.6.2 Salidas

Como salidas de agua desde el volumen subterráneo se consideran los flujos bases a la salida del dominio las cuales se consideran los escurrimientos de la unión de los ríos Cholchol y Cautín por la cuenca del Imperial, y el escurrimiento del río Toltén por la cuenca homónima. Por la cercanía al límite del modelo, estos escurrimientos se asumen representados por los flujos bases estimados en las estaciones Q19, Q28 y Q40 respectivamente. Estos valores son iguales a 44,4 m^3/s en Q19, 102,6 m^3/s en Q28, y 262,0 m^3/s en Q40, dando un total de 409,0 m^3/s.

9.6.3 Interacción río-acuífero

Otra componente importante de conocer para la estimación del balance hidrogeológico del sistema es la comprensión y cuantificación de la interacción entre el río y el acuífero. Si bien este es uno de los objetivos de la implementación del modelo numérico, el balance hidrológico estimado a partir de la aplicación del modelo desarrollado en ExtendSim permite una conceptualización preliminar de esta variable.

En el modelo de simulación hidrológico, la variable η del balance hidrológico corresponde a las pérdidas o ganancia del río en donde se encuentran las interacciones río-acuífero, y aquellas variables no consideradas, como por ejemplo flujos

superficiales desde cuencas de cabeceras menores. Por lo tanto, si los flujos superficiales no incluidos son despreciables, el parámetro sería representado por esta interacción, siendo el caso extremo.

En la cuenca del río Imperial del balance hidrológico se obtiene que el parámetro η tiene un valor neto igual a -37,7 m^3/s lo que indica que el sistema tiene una ganancia igual a 37,7 m^3/s no consideradas, que correspondería al aporte del acuífero al río. En general se obtiene que a lo largo de la cuenca, el acuífero aporta al río o se encuentra en relativo equilibrio, salvo en la parte media del río Cautín (zona de riego ZI09) que sería un tramo en que el río recarga al acuífero. Este análisis es coherente con el análisis piezométrico presentado en la Figura 9-12, donde se caracteriza la cuenca en que predomina la interacción desde el acuífero hacia los ríos, salvo en el tramo del río Cautín donde esta interacción no existiría. Es importante mencionar que, para este análisis, sí se consideró en el balance neto lo ocurrido fuera del dominio del modelo, ya que el sistema funciona como unidades de riego en serie donde pérdidas y ganancias del sistema podría estar representando una condición no sólo local, si no que agrupe el comportamiento de unidades antecesoras y sucesoras. Este supuesto podría sobrestimar la interacción río-acuífero en algunos tramos por lo que deberá ser revisado durante la implementación del modelo numérico.

En la cuenca del río Toltén, del balance hidrológico se obtiene que en el tramo del río Allipén el acuífero genera un aporte de 30,5 m^3/s al río, mientras que en la parte alta del Toltén se encontraría en equilibrio. Previo al paso del río Toltén por la cordillera se encuentra un tramo del río que infiltra agua hacia el acuífero, con un valor de 20 m^3/s. Esto da un aporte neto en cuenca de 10,5 m^3/s desde el acuífero al río. Esto es coherente con el mapa piezométrico presentado en la Figura 9-12, salvo para el tramo del río Toltén alto donde se observa un aporte desde el acuífero al río que no se refleja en el balance hidrológico.

En total, se obtiene un valor neto máximo de interacción desde el acuífero hacia el río de 48,2 m^3/s, si se considera la superficie completa de ambas cuencas estudiadas y que toda la variable de ganancias o pérdidas del sistema están explicados por esta interacción.

Es importante destacar, que la cuantificación de la interacción río-acuífero es muy sensible al supuesto que incluye las pérdidas o ganancias fuera del modelo. Si no se asume esto, y se evalúa al interacción sólo con las zonas de riego dentro del modelo (se excluye las zonas de riego ZI01, ZI08 y ZT01), se obtiene un aporte desde el acuífero al río de 12 m^3/s.

El análisis de la interacción río-acuífero es uno de los objetivos del modelo numérico por lo que este valor deberá ser ajustado en esa etapa, dentro del rango presentado.

9.6.4 Resumen balance hidrogeológico

A modo de resumen, en la Tabla 9-8 se presenta un balance hidrogeológico. Este resumen presenta sólo los flujos de entrada y salida hacia el acuífero, por lo que no considera la interacción con el volumen subsuperficial. Se incluye además los caudales bombeados desde el volumen subterraneo, igual a 5 m^3/s.

Tabla 9-8: Resumen balance hidrogeológico (m^3/s)

Ingresos	Recarga por precipitaciones	23,5
	Desde cursos superficiales	25,0
	Recarga lateral	12,2
Salidas	A cursos superficiales	36,7-73,2
	Bombeo	5,0

9.7 RED DE MONITOREO DEFINTIIVA

A la fecha de desarrollo del estudio, la DGA cuenta en la región con un total de 7 pozos construidos (Angol, Victoria, Traiguén, Temuco, Cunco, Teodoro Schmidt y Lonoche). De este total de pozos, 5 se ubican en el área específica de este estudio (Victoria, Traiguén, Temuco, Cunco y Teodoro Schmidt). Conforme a los antecedentes recopilados y a los antecedentes disponibles se generó, en el capítulo 8, una propuesta de red de monitoreo considerando 8 sectores adicionales.

En el marco del presente estudio, y de forma posterior a la propuesta original, 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.

Consiedrando lo anterior, se verificó el listado original de sectores propuestos, definiéndose finalmente 10 nuevos sectores que permitirán complementar la cobertura actual de montioreo de niveles y calidad de aguas en la región. Estos sectores se enfocan en disponer de información de los acuíferos más profundos en la región, tanto en sectores de cabeceras de cuencas o de 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 sectores poblados. Los puntos propuestos se presentan en la Figura 9-30.

Respecto a las características de los sondajes, se propone una profuniddad de perforación de 80 metros, con un diámetro mínimo de 10″-12″ y una habilitación de 6″-8″, de forma tal que sea posible el ingreso de bombas en el mismo sin dificultades. Asimismo, y se consudera prudente una longitud de tramo con sistema captante de 20 metros como mínimo, cuya ubicación deifnitiva se definirá de acuerdo a la estratigrafía. Dentro de las características de los pozos se propone ua habilitación con cañerías de acero carbono y cribas de acero inoxidable,, considerando una construcción de sello sanitario y borcal en 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_4 y HCO_3) parámetros físico químicos (TDS, pH, alcalinidad) y datos in situ (CE, pH, Tº, OD).
- Parámetros que influyen en la calidad de las aguas según usos: potable y riego (parámetros considerados por NCh 1333 en Tabla 8-2 y para NCh 409 en Tabla 8-3).
- Isótopos: 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.

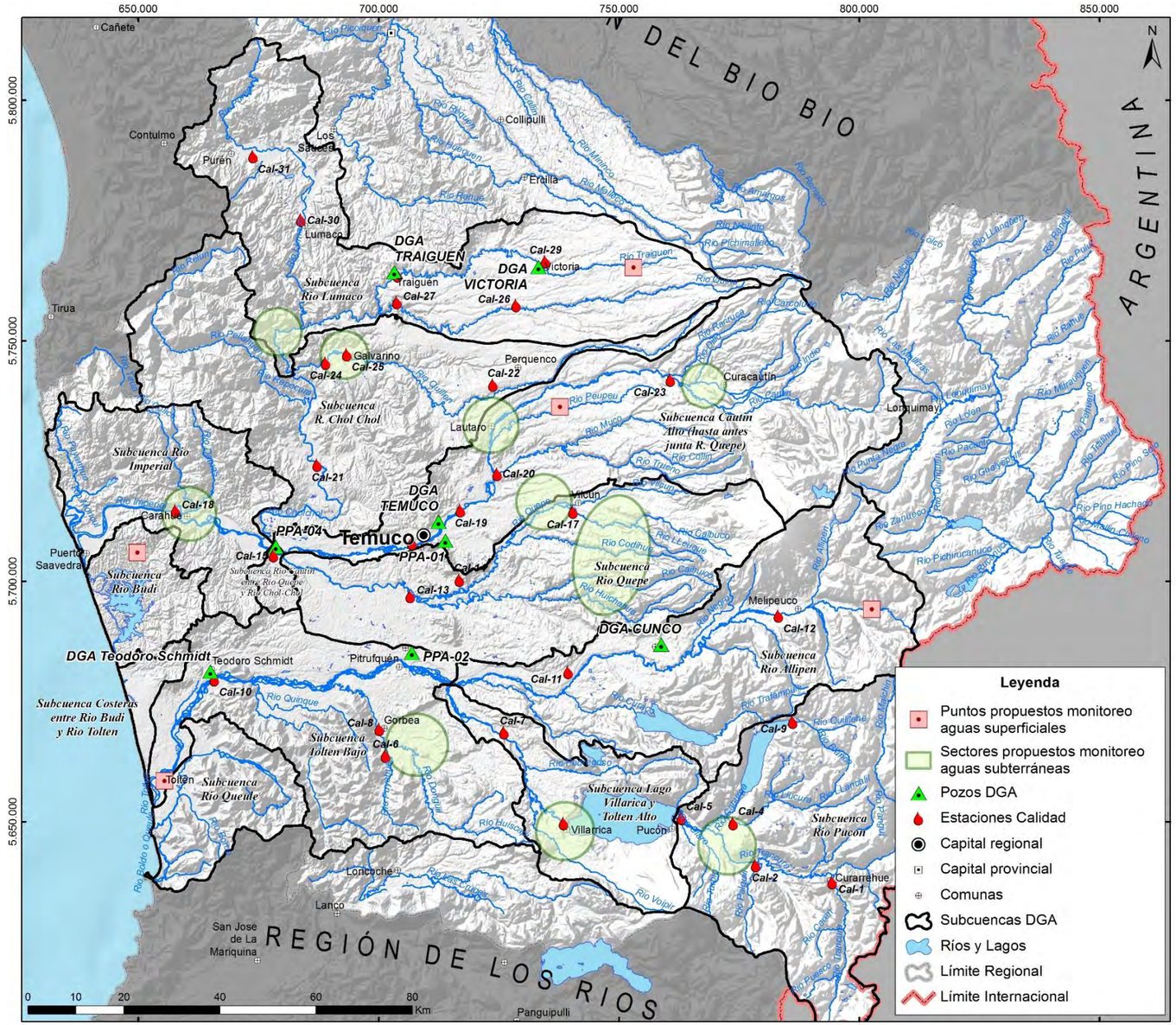
Respecto a la frecuencia de medición de niveles, se propone una frecuencia mensual en el caso de los niveles. En lo que respecta al monitoreo hidroquímico, es posible señalar que, debido a la escasa variabilidad estacionaria que arrojaron los resultados durante las distintas campañas, sea necesario considerar un monitoreo semestral de los distintos parámetros señalados anteriormente.

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

- Costos Perforación Pozos : $590.000.000.-

- Costo perforación Piezoemtros: $120.000.000.-

- Costo muestreo semestral: $4.000.000.- (Considera muestreo de 81 parámetros identificados anteriormente).


650.000
700.000
750.000
800.000
850.000
5.800.000
5.750.000
5.700.000
5.650.000
N
REGIÓN DEL BIO BIO
ARGENTINA
REGIÓN DE LOS RIOS
Cañete
Contulmo
Puren
Los Sauces
Collipulli
Ercilla
Lumaco
Victoria
Traiguen
Tirua
Galvarino
Perquenco
Curacautin
Lonquimay
Lautaro
Temuco
Victun
Carahue
Puerto Saavedra
Melipeuco
Pitrufquén
Teodoro Schmidt
Gorbea
Tolten
Villarrica
Pucón
Curarrehue
Loncoche
Lanco
San Jose de La Mariquina
Panguipulli
Cal-31
Cal-30
Cal-29
Cal-27
Cal-26
Cal-25
Cal-24
Cal-22
Cal-23
Cal-21
Cal-20
Cal-19
Cal-18
Cal-17
Cal-16
Cal-15
Cal-14
Cal-13
Cal-12
Cal-11
Cal-10
Cal-9
Cal-8
Cal-7
Cal-6
Cal-5
Cal-4
Cal-2
Cal-1
PPA-04
PPA-01
PPA-02
DGA TRAIGUEN
DGA VICTORIA
DGA TEMUCO
DGA-CUNCO
DGA Teodoro Schmidt
Subcuenca Rio Lumaco
Subcuenca R. Chol Chol
Subcuenca Rio Imperial
Subcuenca Rio Budi
Subcuenca Costeras entre Rio Budi y Rio Tolten
Subcuenca Tolten Bajo
Subcuenca Rio Queule
Subcuenca Rio Quepe
Subcuenca Cautin Alto (hasta antes junta R. Quepe)
Subcuenca Rio Allipen
Subcuenca Lago Villarica y Tolten Alto
Subcuenca Rio Pucon
Subcuenca Rio Cautin entre Rio Quepe y Rio Chol-Chol
Rio Biobio
Rio Traiguen
Rio Lumaco
Rio Quepe
Rio Cautin
Rio Allipen
Rio Pucon
Rio Quillen
Rio Lonquimay
Rio Malleco
Rio Renaico
Rio Vergara
Rio Mirquiquen
Rio Pino Hachado
Rio Pichirucanuco
Rio Pichimallecco
Rio Carrolonco
Rio Pellaifa
Rio Quino
Rio Quillen
Rio Huichahue
Rio Codihue
Rio Calbuco
Rio Trafampulli
Rio Liucura
Rio Llanquil
Rio Voipir
Rio Pedregoso
Rio Dollinco
Rio Huilio
Rio Mucu
Rio Peupeu
Rio Gulfen
Rio Truful
Rio Pacheco
Rio Ghaycheli
Rio Zanuego
Rio Tellimpo
Rio Pino Seco
Rio Tralcan Chileno
Rio Tucapel
Rio Ranquil
Rio Putue
Rio Rahue
Rio Lubnahuel
Rio Nuble
Rio Pellaifa
Rio Tolten
Rio Budi o Queule
Rio Indio
Rio Imperial
Rio Chol Chol
Rio Huilio
Rio Huilio
Rio Quino
Rio Quillen

10 MODELO NUMÉRICO – CUENCAS RÍO IMPERIAL Y TOLTÉN

10.1 GENERALIDADES

Conforme a los objetivos primordiales del estudio, se construyó un modelo de flujo que servirá como herramienta de gestión de los recursos hídricos subterráneos ubicados en las cuencas de los ríos Imperial y Toltén.

En este sentido, se ha elaborado un modelo numérico de flujo subterráneo en régimen permanente de las cuencas del río Imperial y el río Toltén, que incluyen las zonas de relleno formadas por las UH-1, UH-2 y UH-3. La geometría del modelo se ha realizado en base a la construcción del modelo hidrogeológico conceptual en Leapfrog Hydro, que utiliza fundamentalmente la información geológica subsuperficial, correspondiente a la estratigrafía de pozos perforados en el área y la información geofísica del sector.

El modelo numérico se ha desarrollado con 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.

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 los derechos de agua subterránea susceptibles de ser otorgados.

Todos los resultados de la modelación se presentan en el Anexo H.1.

10.2 DOMINIO DE MODELACIÓN Y LÍMITES IMPERMEABLES

Para la definición del límite y orientación de la caja del (los) modelo(s) numérico(s) necesario(s) para representar los sistemas de flujos asociados a los ríos Imperial y Toltén, se han tenido en consideración factores asociados a la conceptualización hidrogeológica (direcciones de flujo subterráneo, delimitación del relleno), a la posibilidad de definir condiciones de borde en base a mediciones (estaciones) más que éstas se basen en estimaciones indirectas y a factores relacionados a lograr una ejecución eficiente del modelo numérico tanto para la calibración como simulaciones, esto es, utilizar la menor cantidad de celdas posibles y reducir al mínimo las celdas inactivas fuera del área de interés hidrogeológico principal; ambos reducen la cantidad de memoria que ocupa el modelo.

Como primera etapa, se tomó la decisión de generar un sólo modelo integrado que abarque ambas cuencas debido a que, en la práctica, no existe una divisoria hidrogeológica entre ambas cuencas. Inclusive, existe un flujo subterráneo intercuencas de dirección Sur-Este a Nor-Oeste en la porción central del área de estudio (ver curvas equipotenciales de pozos profundos. Capítulo 9) y al hecho de que un modelo de estas características permitirá evaluar solicitudes de derecho en zonas cercanas a los límites comunes de ambas cuencas hidrológicas sin ser interferidos por la presencia de condiciones de borde que distorsionen la evaluación. Por otro lado, evita tener que generar proyecciones (arbitrarias) para las condiciones de borde que sería necesario definir para estas zonas, cuando se simulen escenarios.

Como segunda etapa, se utilizó el trazado del relleno (UH-1 a UH-3) para acotar las dimensiones del dominio, dejando fuera del área de estudio todas las zonas donde se identifica la presencia de rocas con bajo potencial hidrogeológico. De esta forma todo lo que queda en color blanco en la Figura 10-1, fuera de los límites del modelo, corresponde a celdas inactivas.

Finalmente, se evaluaron dos orientaciones para el dominio. La primera consideró un dominio vertical, sin rotación (rectángulo rojo), y la segunda consideró una rotación de 28.8º en el sentido de las manecillas del reloj (rectángulo amarillo). La Figura 10-1 muestra una comparación entre ambos dominios, junto con el trazado del relleno, la red de drenaje, las cuencas hidrológicas de los ríos Imperial y Toltén y la ubicación de las estaciones fluviométricas vigentes.

Luego de comparar ambos dominios, y considerar los criterios anteriormente descritos, se tomó la decisión de emplear el dominio sin rotación. Esto se hizo también para poder calzar las celdas del modelo con las celdas del DEM de topografía disponible, evitando introducir distorsiones a la topografía del modelo en relación al DEM.

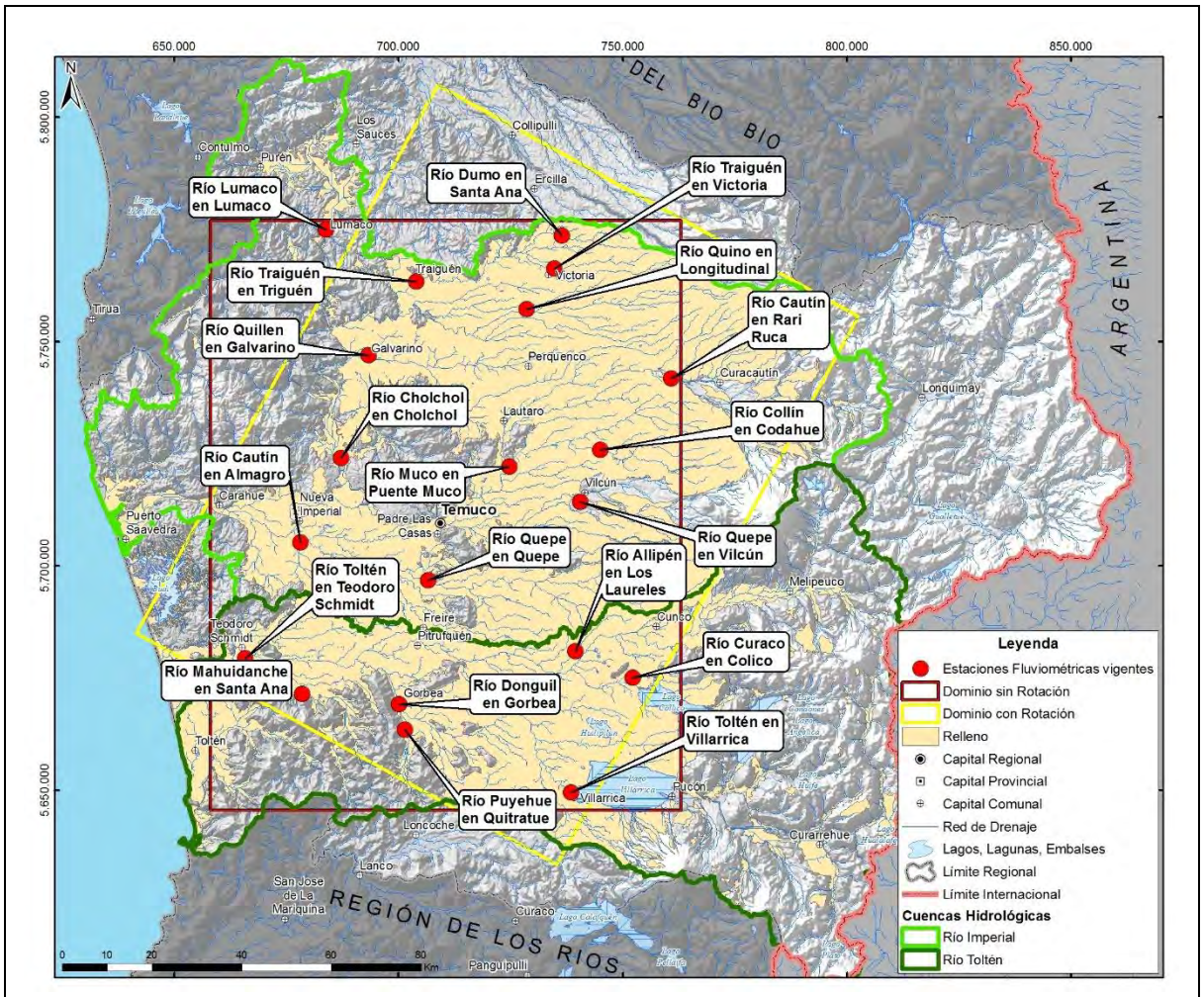


Figura 10-1: Evaluación de distintos dominios para modelo de ambas cuencas

De esta forma los límites definitivos (en planta) del dominio modelo (rectángulo negro en Figura 10-2) 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

De esta forma el dominio tiene dimensiones aproximadas de 104,8 KM en el eje X (Este-Oeste) y 131,6 Km en la dirección Y (Norte-Sur). La Figura 10-2 presenta el dominio definitivo considerando además el trazado de celdas inactivas.

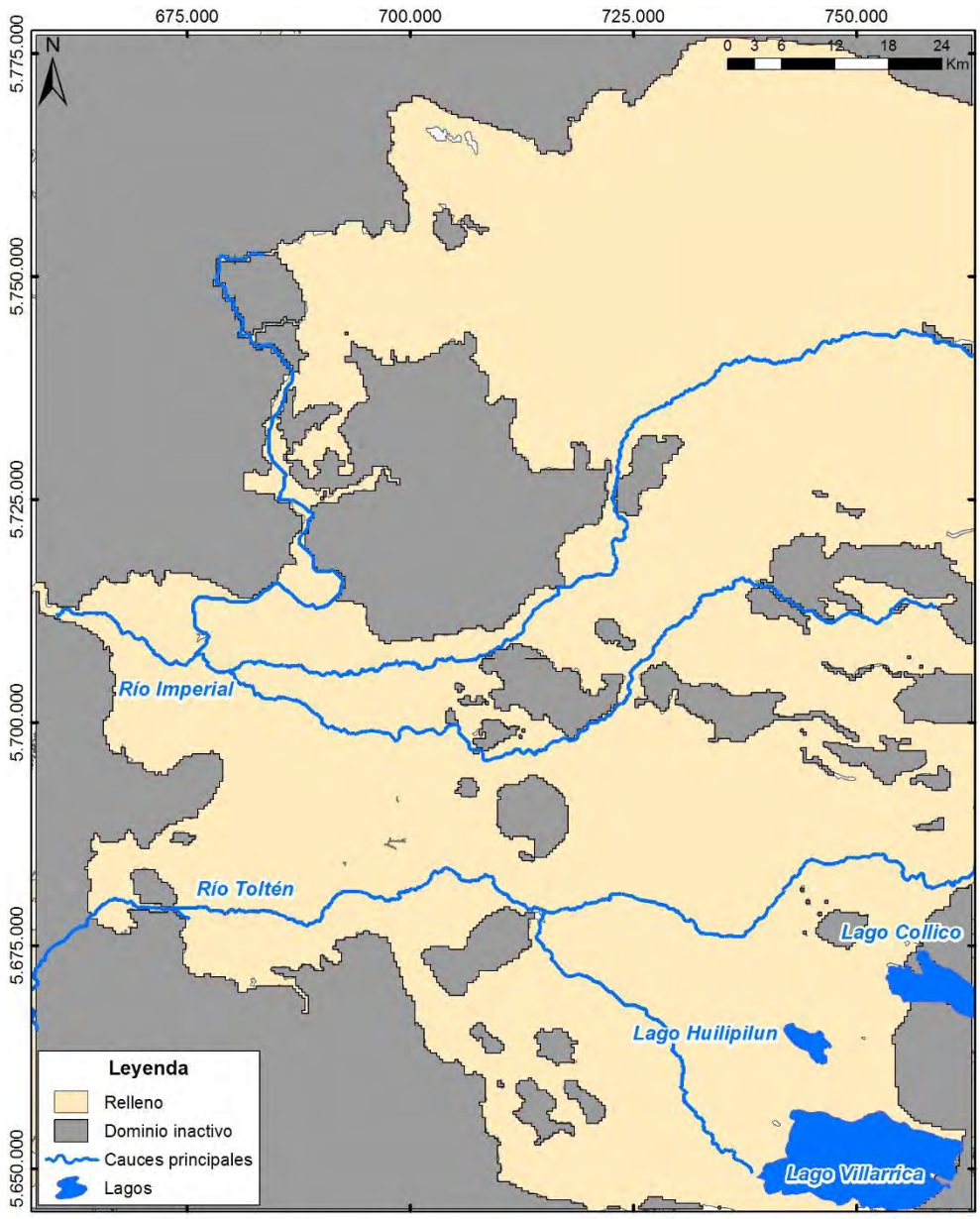


Figura 10-2: Dominio del modelo numérico

Todas aquellas celdas donde se identifica la presencia de roca/basamento (UH-4 a UH-6) fueron inactivadas, 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, en especial quebradas al sur del río Toltén, las cuales dentro del contexto regional no tienen interés hidrogeológico.

10.3 CÓDIGO DE MODELACIÓN

Para el desarrollo del modelo numérico de flujo que incorpora parte de las cuencas de los ríos Imperial y Toltén se ha optado por elegir códigos pertenecientes a la familia MODFLOW, desarrollados y mantenidos por el USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos), los cuales son de distribución gratuita. Esta elección se hace teniendo en cuenta que este código es de amplio conocimiento y aplicación en Chile a distintos contextos hidrogeológicos, está dentro de los códigos recomendados por SEA (2012) para el desarrollo de este tipo de modelos y principalmente, porque se considera apropiado para representar el sistema de flujo conceptualizado.

Dentro de las alternativas clásicas de MODFLOW se encuentran MODFLOW-2000 (Harbaugh et al 2000) y MODFLOW-2005 (Harbaugh 2005). El primero ha sido utilizado extensivamente en Chile, en particular en modelos de disponibilidad hídrica desarrollados para la DGA, pero su desarrollo y mejoramiento por parte del USGS ha sido descontinuado, dejando a MODFLOW-2005 como la versión vigente, la cual recibe constantemente revisiones y actualizaciones.

Por otro lado, existen también alternativas más modernas, basadas en MODFLOW-2005, que resuelven varias de las principales limitaciones asociadas a las versiones clásicas. Dentro de estas se encuentran MODFLOW-NWT (Niswonger et al 2011) y MODFLOW-USG (Panday et al 2013). Ambos códigos son capaces de manejar de forma eficiente los problemas de convergencia numérica derivados del secado y re-humectación de celdas y otras dificultadas asociadas al flujo en acuíferos libres (flujo no-lineal) donde existe una componente importante de interacción río-acuífero, donde el último código agrega además una ventaja significativa: la capacidad de emplear grillas flexibles, que permiten focalizar la resolución dentro del dominio sin afectar las celdas ubicadas en los límites del modelo, similar a lo que los métodos basados en elementos finitos pueden lograr.

MODFLOW-USG es la versión más reciente y potente en términos de capacidades de modelación ya que hace uso del método de volúmenes finitos combinados con diferencias finitas. Existen distintas razones por las cuales su uso en modelos de flujo regionales es deseable, dentro de las cuales, y a modo general, se destacan:

- Se hace cargo del tema del "secado y re-humectación de celdas" de una manera mucho más robusta que sus predecesores (ej. MODFLOW-2005). Esto es muy relevante para acuíferos multi-capa ya que en general entrega mayor estabilidad numérica al modelo, lo cual además es clave para el óptimo desarrollo de una calibración automática con PEST (Doherty 2010) que depende fuertemente de la continuidad de la superficie piezométrica modelada.
- Reduce los problemas de estabilidad numérica producto de grandes contrastes de conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas.
- También reduce significativamente los problemas de balance de masas asociados al *solver* clásicos.
- Permite focalizar el refinamiento de la grilla entorno a zonas de interés sin tener que refinar el modelo completo, de esta forma se logra tener modelos con menor cantidad de celdas ("más livianos") y por tanto los tiempos de simulación se reducen y la memoria RAM requerida es menor, respecto del enfoque tradicional. Así, elementos como cauces de ríos, vertientes y/o pozos, pueden tener un detalle mucho mayor que antes, sin sacrificar eficiencia computacional.
- La capacidad de focalizar el refinamiento permite además mejorar la precisión en la estimación del nivel freático del acuífero y de esta forma de los gradientes

hidráulicos utilizados para calcular los caudales subterráneos pasantes, de intercambio río-acuífero y el descenso en torno a pozos de bombeo de gran capacidad. Todos relevantes para el caso del modelo a desarrollar.

- Permite representar correctamente el bombeo de pozos que extraen desde acuíferos multi-capa, a través del paquete CLN (*Connected Linear Network*). Además, permite limitar la extracción de agua basándose en la capacidad real de transmitir agua del acuífero. Los enfoques clásicos de modelación (paquete WEL), no permiten simular correctamente el bombeo desde más de una capa y en general tienden a estimar gradientes hidráulicos mayores entorno a ellos debido a que imponen un caudal de extracción que puede ser físicamente irreal, debido a que es una variable impuesta que no considera el contexto hidrogeológico ajustado en el modelo (permeabilidades).
- Su capacidad para simular apropiadamente niveles dinámicos en pozos de extracción respecto de las capacidades que ofrece MODFLOW-2005, donde el diámetro del pozo es equivalente al tamaño de la celda. Lo anterior genera gradientes hidráulicos menores a los que realmente se observan entorno a los pozos de bombeo. Para esto MODFLOW-USG introduce la corrección de Peaceman (1983) la cual permite incorporar el diámetro real del pozo. La corrección de los niveles dinámicos puede ser relevante en zonas donde no se cuenta con una red permanente de monitoreo de niveles estáticos y se utilice información de pozos en operación obtenidos como parte de un catastro, como es el presente caso.

Basado en todo lo anteriormente expuesto se ha seleccionado el código **MODFLOW-USG** para implementar el modelo numérico de flujo.

Como interfaz gráfica de pre- y post- procesamiento se ha empleado Groundwater Vistas 6 desarrollado por Environmental Simulations Inc. Esto representa un cambio, acordado con la Inspección Fiscal, en relación a la plataforma originalmente solicitada. Además se ha empleado el software Groundwater Desktop 2 (S.S. Papadopulos & Associates) para generar visualizaciones 3D del modelo y ArcGIS/QGIS para la generación de mapas.

10.4 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

10.4.1 Discretización Espacial

El dominio ha sido subdividido en tres capas. Las celdas del modelo son cuadrados de 342,75 m, lo que se tradujo en una grilla de 384 filas y 306 columnas, es decir, un total de 352.512 celdas. La elección de este tamaño particular de celda se hizo teniendo en cuenta el tamaño del pixel del DEM de topografía disponible, que corresponde a 86,69 m (aprox.). Así, el tamaño original de las celdas es 4 veces más grande que el del pixel del DEM.

Las unidades presentes en el modelo numérico son la UH-1 (Depósitos no consolidados actuales), UH-2 (Depósitos no consolidados antiguos) y UH-3 (Depósitos volcano-sedimentarios).

Para la discretización vertical en tres capas se ha partido de un modelo formado por una sola capa, la cual 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 y un espesor mínimo de 20 metros. A partir de este modelo se ha subdividido la capa numérica 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. Por tanto, 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.

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 diferencias del nivel 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.

Para evitar problemas numéricos de conectividad entre celdas adyacentes, debido a que hay celdas de poco espesor que producen desconexiones locales, se ha realizado una corrección de la geometría de las capas. Esta corrección consiste en aumentar el espesor de la capa 2 en las zonas donde se produce desconexión hidráulica entre celdas adyacentes de una misma capa.

Posteriormente, el dominio fue refinado en torno a los cauces principales (río Imperial, río Toltén, río Cautín, río Allipén, Río Cholchol, etc.), a los pozos de bombeo cuya capacidad de extracción (corregida por factores de uso) fuera mayor a 40 L/s. Para esto se usó la técnica denominada *Quadtree suavizado* disponible a través de Groundwater Vistas 6, la cual subdividide cada celda en cuatro partes iguales controlando que ninguna de ellas esté en contacto con más de dos celdas adyacentes, esto permite asegurar el cumplimiento de los requerimientos geométricos de la grilla de un modelo numérico desarrollado con MODFLOW-USG (volúmenes finitos). Para el refinamiento de los ríos se ha empleado una subdivisión de 4 veces el tamaño de la celda original, de esta forma el tamaño mínimo de celda en los cauces/pozos quedo de 86,69 m, el cual se incrementa progresivamente de 2 en 2 pasando a 171,38 m y luego a 342,75 m fuera los cauces. En estas condiciones el número total de celdas se incrementa a 722.502, de las cuales 559.675 se encuentran activas (77% de uso de celdas). La Figura 10-3 muestra la discretización general en planta, y la Figura 10-4 y la Figura 10-5 presentan acercamientos a los refinamientos introducidos en los cauces del modelo y algunas zonas de bombeo.

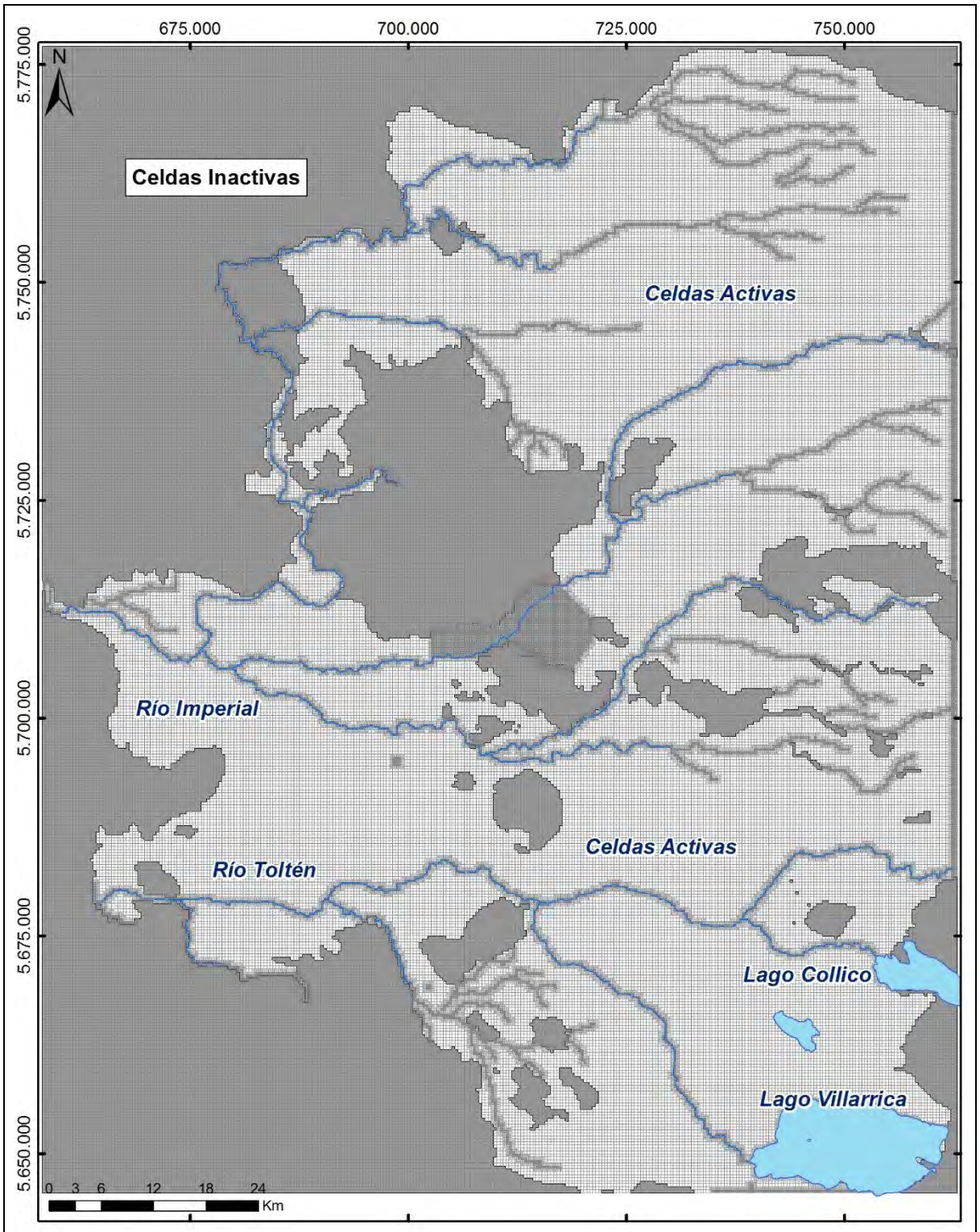


Figura 10-3: Discretización espacial en planta – vista general

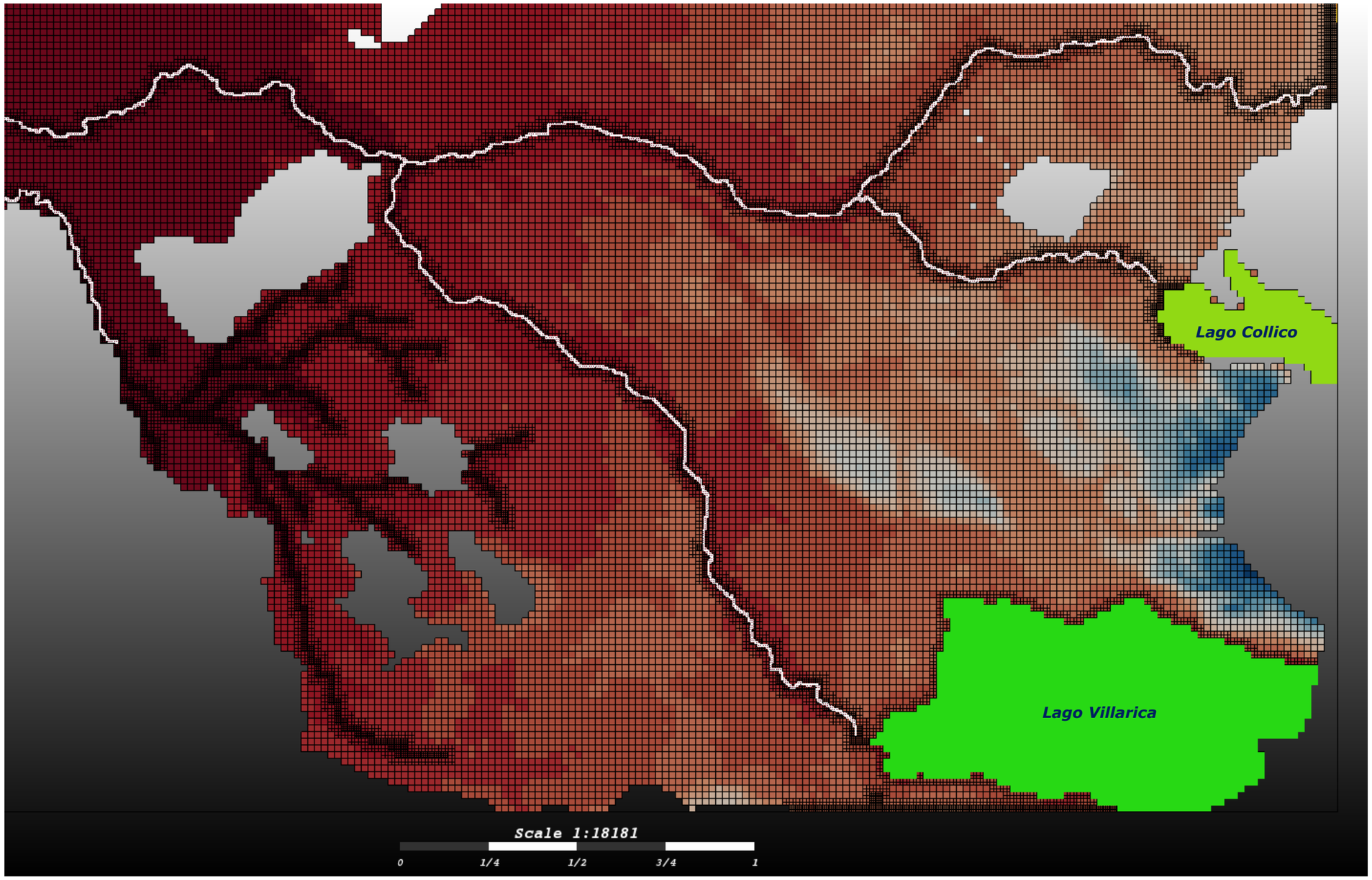


Figura 10-4: Discretización en planta modelo numérico – Acercamiento a río Tolten

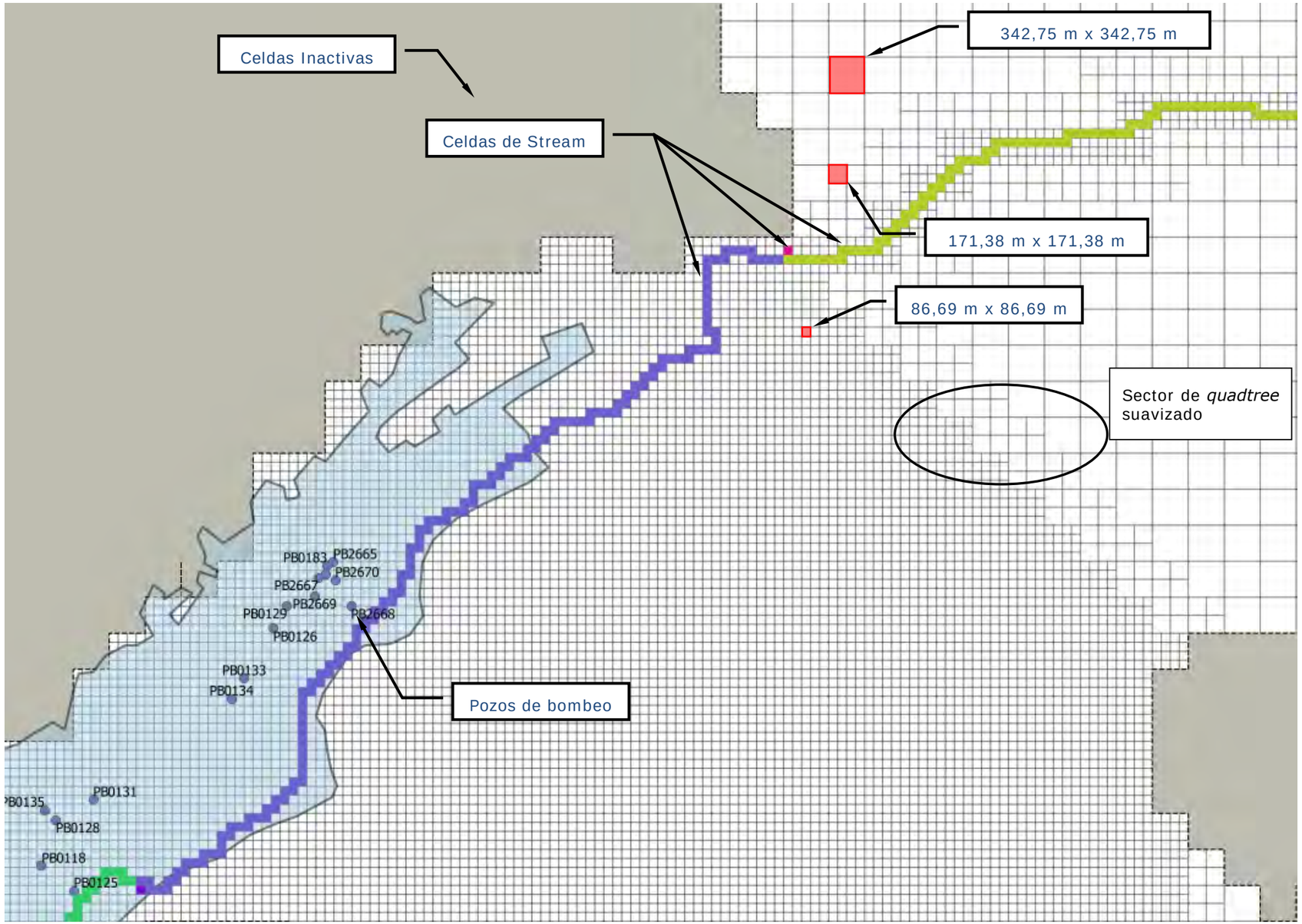


Figura 10-5: Discretización en planta del modelo numérico – Acercamiento a río Allipén en Temuco – grilla con *quadtree* suavizado

La discretización vertical adoptada para el modelo consiste en tres capas numéricas, que abarcan desde la topografía (DEM) hasta el fondo de las unidades de relleno combinadas (UH-1, UH-2 y UH-3). Si bien el modelo conceptual define la UH-6 formalmente como el basamento, para efectos del modelo numérico se ha considerado también que la UH-4 y UH-5 corresponden a unidades de basamento, básicamente porque existen muy pocos pozos para ajustar sus propiedades hidráulicas y porque los valores de permeabilidad existentes presentan una gran dispersión para caracterizar hidráulicamente dichas unidades.

En la Figura 10-6 y en la Figura 10-7 se presenta un ejemplo de la discretización vertical en dos cortes del modelo numérico, mostrando la geometría variable de las capas. La Figura 10-6 corresponde un corte en la dirección Oeste-Este, paralelo al sentido general de escurrimiento subterráneo y la Figura 10-7 muestra un corte en la dirección Norte-Sur, perpendicular al flujo en los ríos Imperial y Toltén.

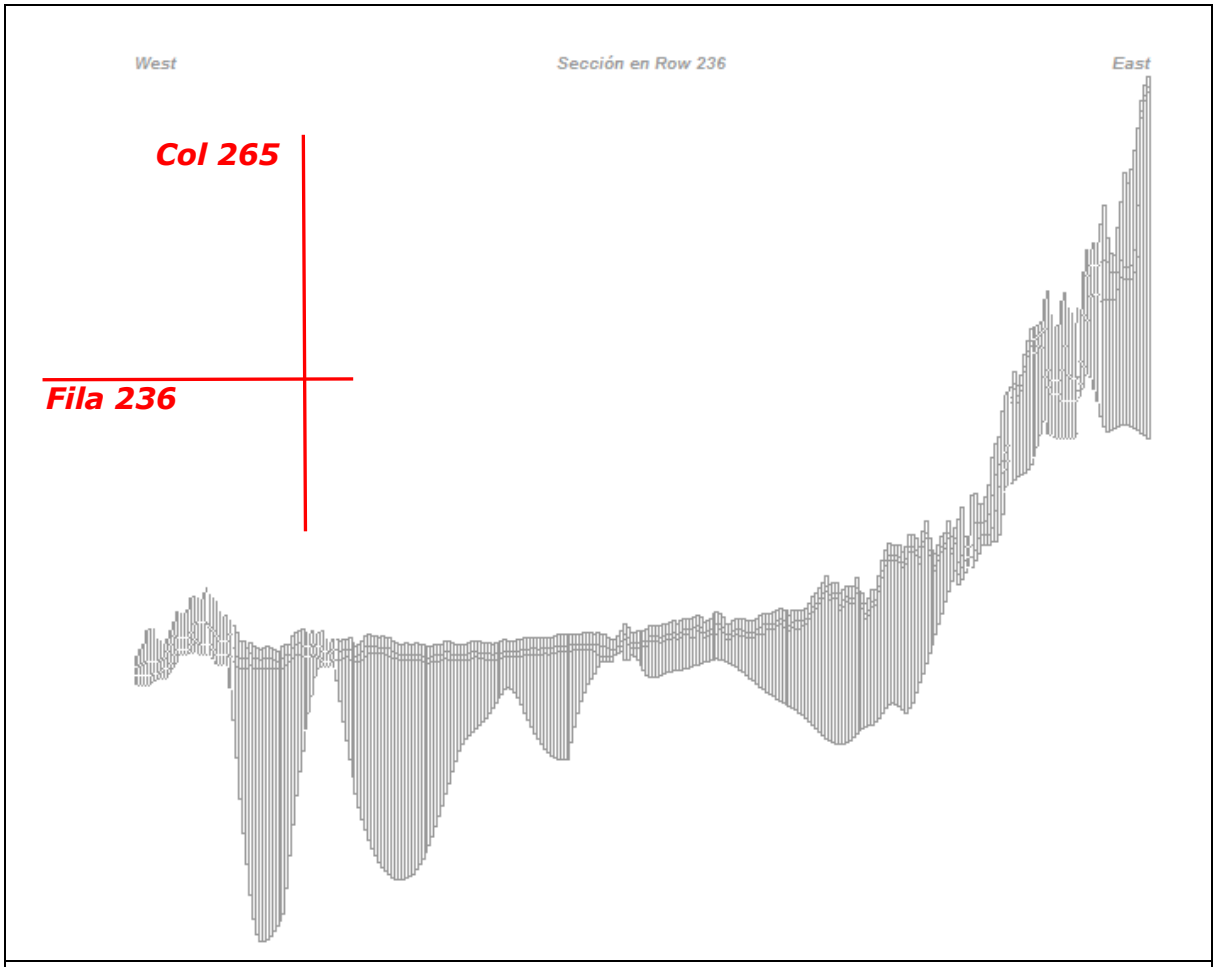


Figura 10-6: Discretización vertical modelo numérico en fila 236 (Exag. Vert. 55x)

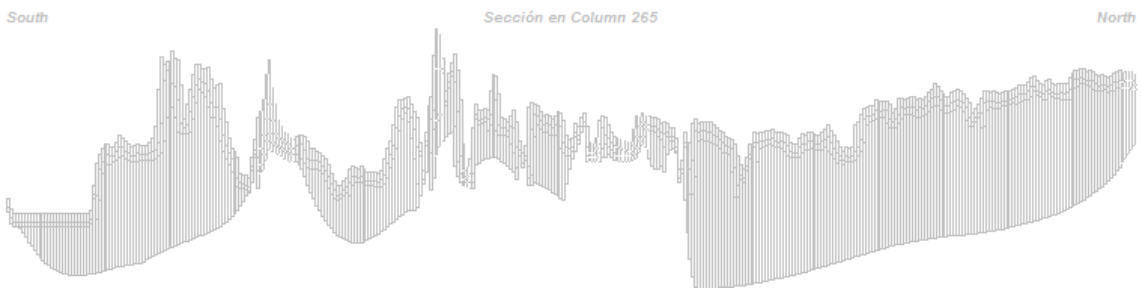


Figura 10-7: Discretización vertical modelo numérico en columna 265 (Exag. Vert. 55x)

Finalmente, la Figura 10-8 muestra una vista en 3D de la geometría de las capas y de la grilla construida.

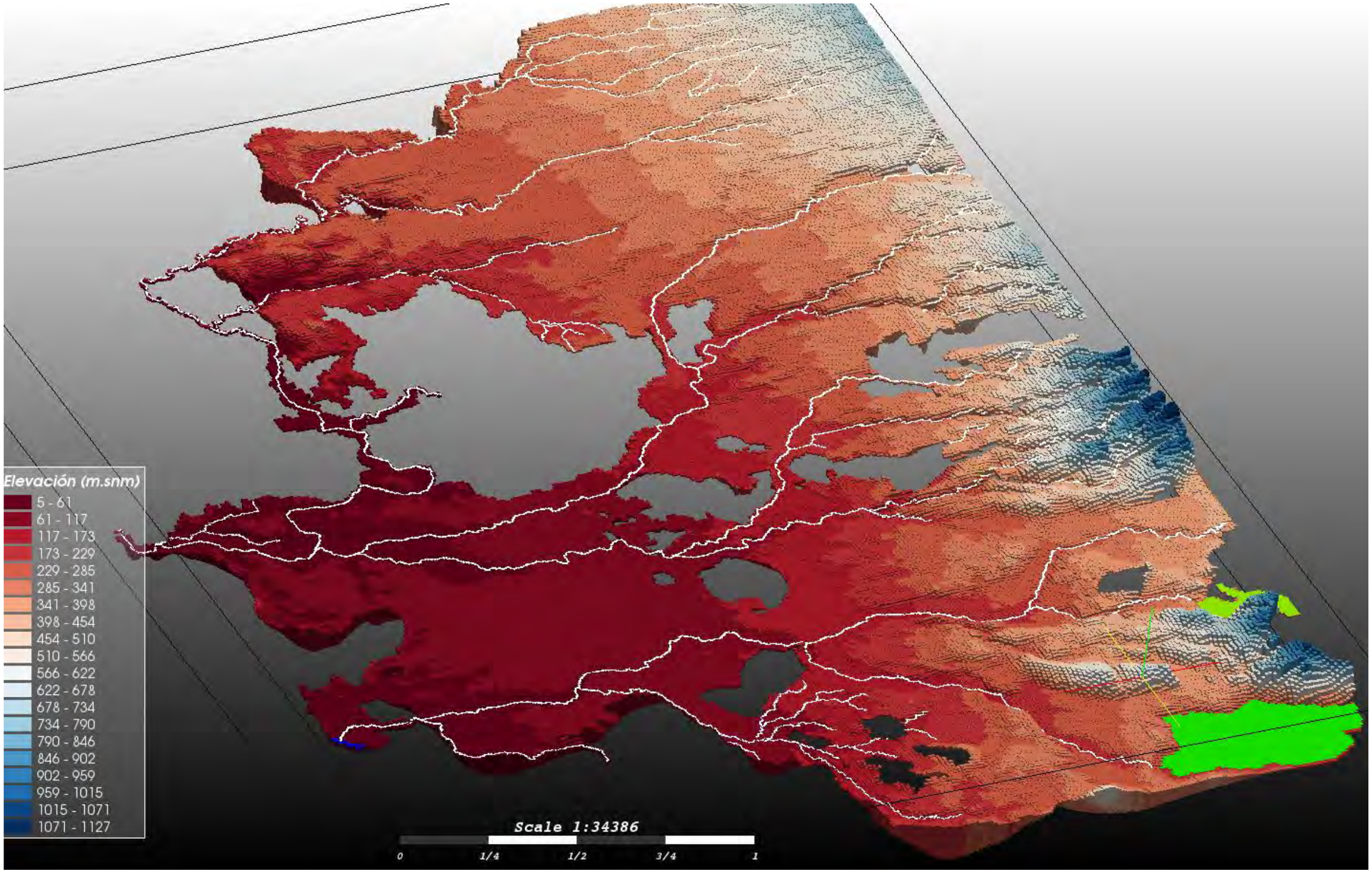


Figura 10-8: Vista 3D de la celdas activas y su discretización en planta (Exag. Vert. 15X)

10.4.2 Discretización Temporal

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).

Si bien es posible obtener una caracterización a nivel mensual de las recargas superficiales (modelo hidrológico ExtendSIM), una estimación de la demanda subterránea en el tiempo (catastro de extracciones y crecimiento de demanda) y los flujos en los puntos de control que monitorea la DGA (estadística en BNA), la información de niveles freáticos no cuenta con una serie temporal que tenga una cobertura espacial suficiente y se acota a los valores tomados durante el catastro desarrollado en el presente estudio. Esto significa que en la práctica, la variación de niveles de los pozos, de acuerdo a las diferentes condiciones hidrológicas imperantes, es desconocida.

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 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.

10.5 PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Inicialmente la distribución espacial y los valores de las propiedades hidráulicas 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 (Figura 10-9).

Debido a que el modelo fue calibrado en régimen permanente, las propiedades hidráulicas ingresadas al modelo corresponden exclusivamente a las conductividades hidráulicas (K) de las unidades hidrogeológicas (sin tomar en cuenta el coeficiente de almacenamiento (S_s y/o S_y), adoptándose además, isotropía horizontal (Kx=Ky), y asumiendo una relación Kz/Kx de 0,1.

A partir de los valores iniciales mostrados en la Figura 10-9, se ha revisado la distribución de este parámetro en las tres capas del modelo y se han modificado determinados sectores manualmente en función de la información de las pruebas de bombeo y la piezometría del modelo conceptual. Los valores de conductividad hidráulica en las pruebas de bombeo para las unidades del relleno oscilan entre 0,06 y 309,17 m/día.

Tras el proceso de calibración se han obtenido las distribuciones de conductividad hidráulica que se muestran de la Figura 10-10 a la Figura 10-12 para cada capa del modelo. En la capa 1 el valor oscila entre un rango de 0,125 y 25 m/día, en la capa2 entre 0,01 y 25 m/día, y en la capa 3 oscila entre 0,1 y 100 m/día.

En el proceso de calibración manual, se ha tenido en cuenta que la capa 2 presenta una menor conductividad hidráulica en los sectores donde el acuífero somero presenta diferencias de nivel con el acuífero profundo. En aquellos sectores donde los niveles de ambos acuíferos presentan el mismo nivel piezométrico, la capa 2 presenta una conductividad hidráulica mayor debido a que los dos acuíferos están conectados. Así, la capa 2 presenta valores bajos de conductividad hidráulica (entre 0,01 y 0,125 m/día) en la mayor parte de la superficie modelada, mientras que en determinados sectores los valores aumentan hasta un rango de entre 15-25 m/día (Figura 10-11), representando sectores donde la capa 2 no actúa como un acuitardo, sino que presenta continuidad con las capas 1 y/o 3, y por tanto, la piezometría presenta la misma cota.

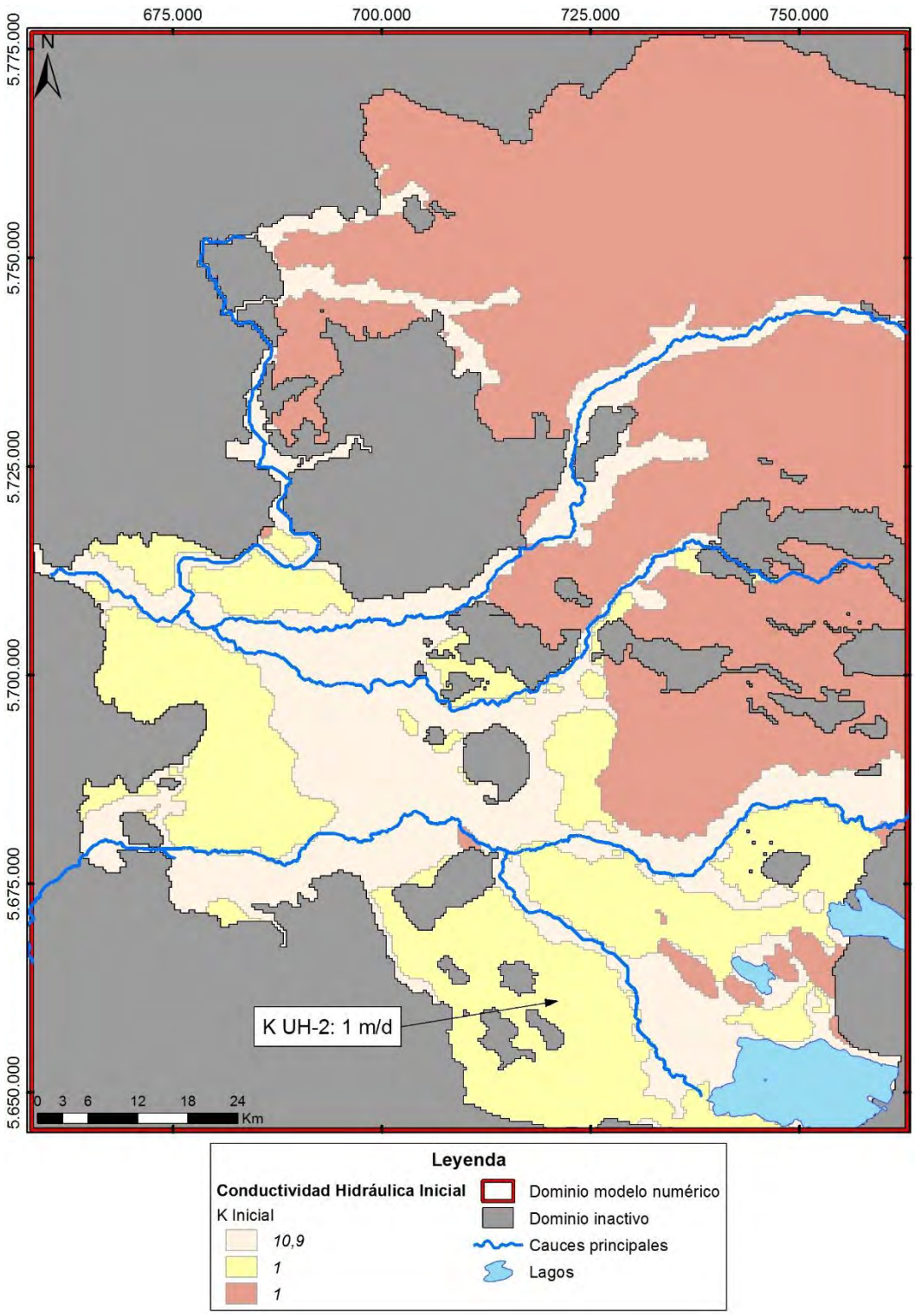


Figura 10-9: Distribución inicial de conductividades hidráulicas iniciales

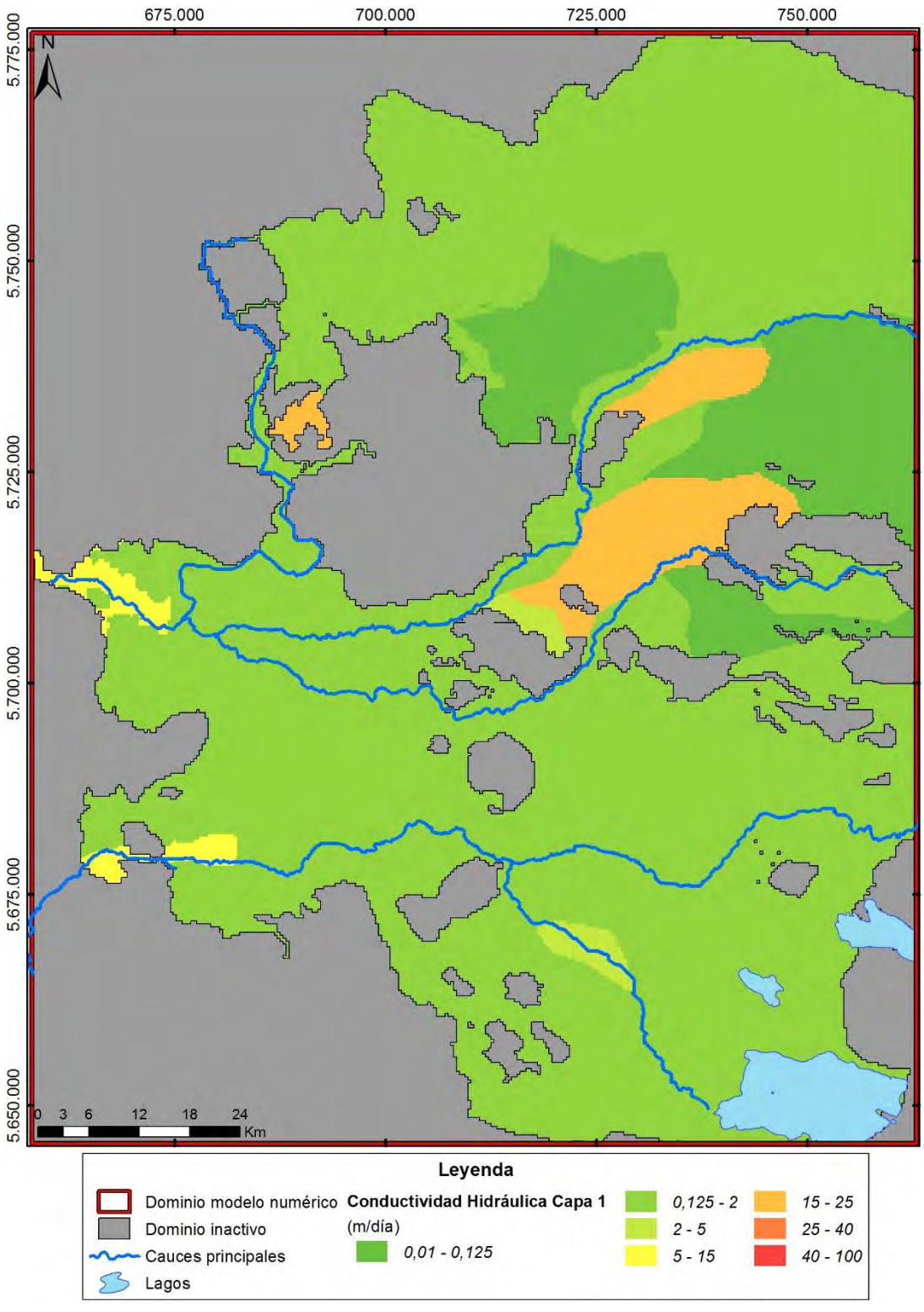


Figura 10-10: Distribución de conductividades hidráulicas calibradas en el modelo. Capa 1

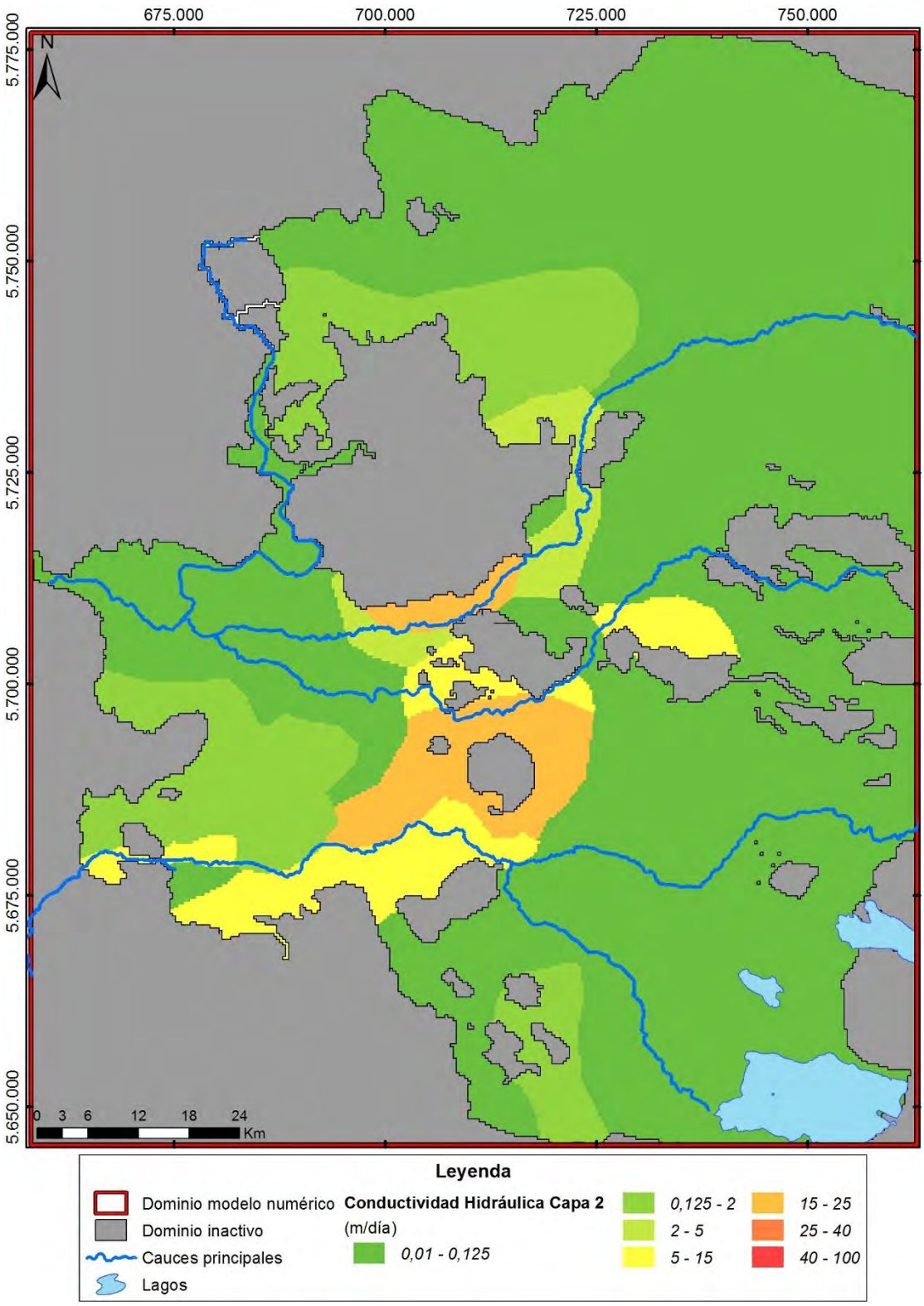


Figura 10-11: Distribución de conductividades hidráulicas calibradas en el modelo. Capa 2

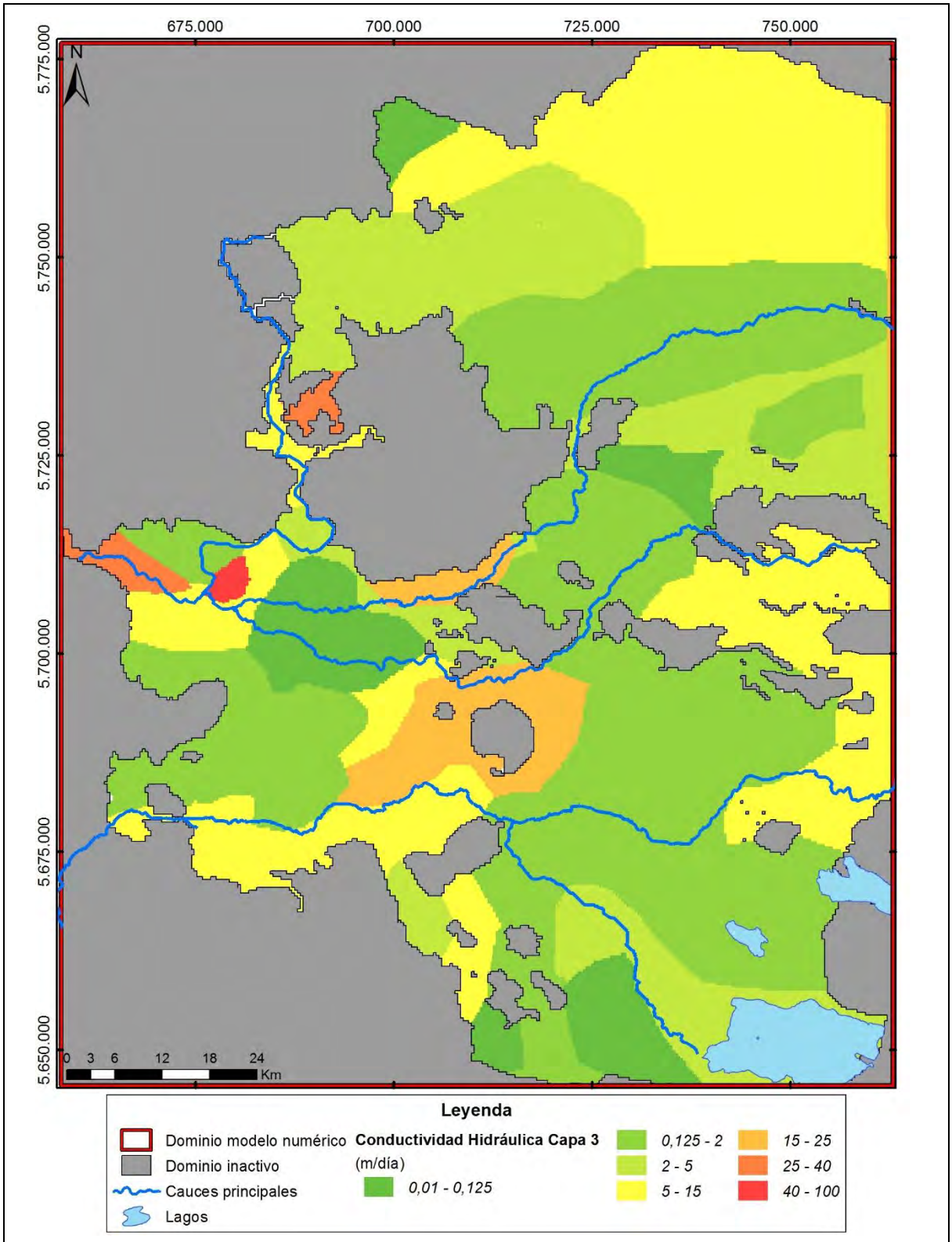


Figura 10-12: Distribución de conductividades hidráulicas calibradas en el modelo. Capa 3

10.6 CONDICIONES DE BORDE

En términos generales, el modelo considera el uso de tres tipos de condiciones de borde:

1. **De carga hidráulica conocida (Tipo 1, Dirichlet):** aplicada en los límites del modelo por donde ingresa y salen los flujos subterráneos.
2. **De flujo especificado (Tipo 2, Newman):** para ingresar recarga superficial y para las zonas donde no ingresa flujo al modelo (celdas inactivas y el fondo de la capa 1).
3. **Mixta (Tipo 3, Cauchy):** para los flujos que son dependientes del nivel de la napa, como por ejemplo los de intercambio que ocurren en los cauces superficiales y el acuífero.

A continuación se detalla la implementación de las condiciones de borde utilizadas para la calibración de régimen permanente.

10.6.1 Flujos laterales subterráneos

Los flujos de recarga y descarga lateral subterránea fueron definidos mediante la condición de borde de carga hidráulica conocida en función de la piezometría representativa de los acuíferos entre los meses de marzo y julio de 2014. Para esto, con el paquete CHD (Time-Variant Specified-Head) de MODFLOW-USG, 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 acuíferos. De esta forma se incorpora al modelo una condición de nivel conocido que varía en el espacio.

Las equipotenciales utilizadas fueron construidas en base al catastro de 1.624 captaciones con niveles estáticos de aguas subterráneas (pozos y norias) desarrollado en el presente estudio para el acuífero somero y el acuífero profundo.

En la Figura 10-13 se muestra la piezometría del acuífero somero y los niveles constantes impuestos al modelo en la capa 1, y en la Figura 10-14 se muestra la piezometría del acuífero profundo y los niveles impuestos al modelo en la capa 3. Los bordes de nivel constante en la capa no son continuos en todo el límite Este del modelo debido a que en algunos sectores el nivel se encuentra por debajo del acuífero según la información de piezometría y la cota de fondo de la capa acuífera. Por tanto, en estos sectores la entrada de flujo se realiza exclusivamente por la capa 3.

La dirección de flujo predominante del agua subterránea es hacia el Oeste y en donde la mayor parte de los ríos son ganadores respecto al acuífero.

Los sectores donde se observan que el río es ganador (se alimenta del flujo de agua subterránea) son: 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 ganando agua, hasta antes de su cruce de la Cordillera de La Costa.

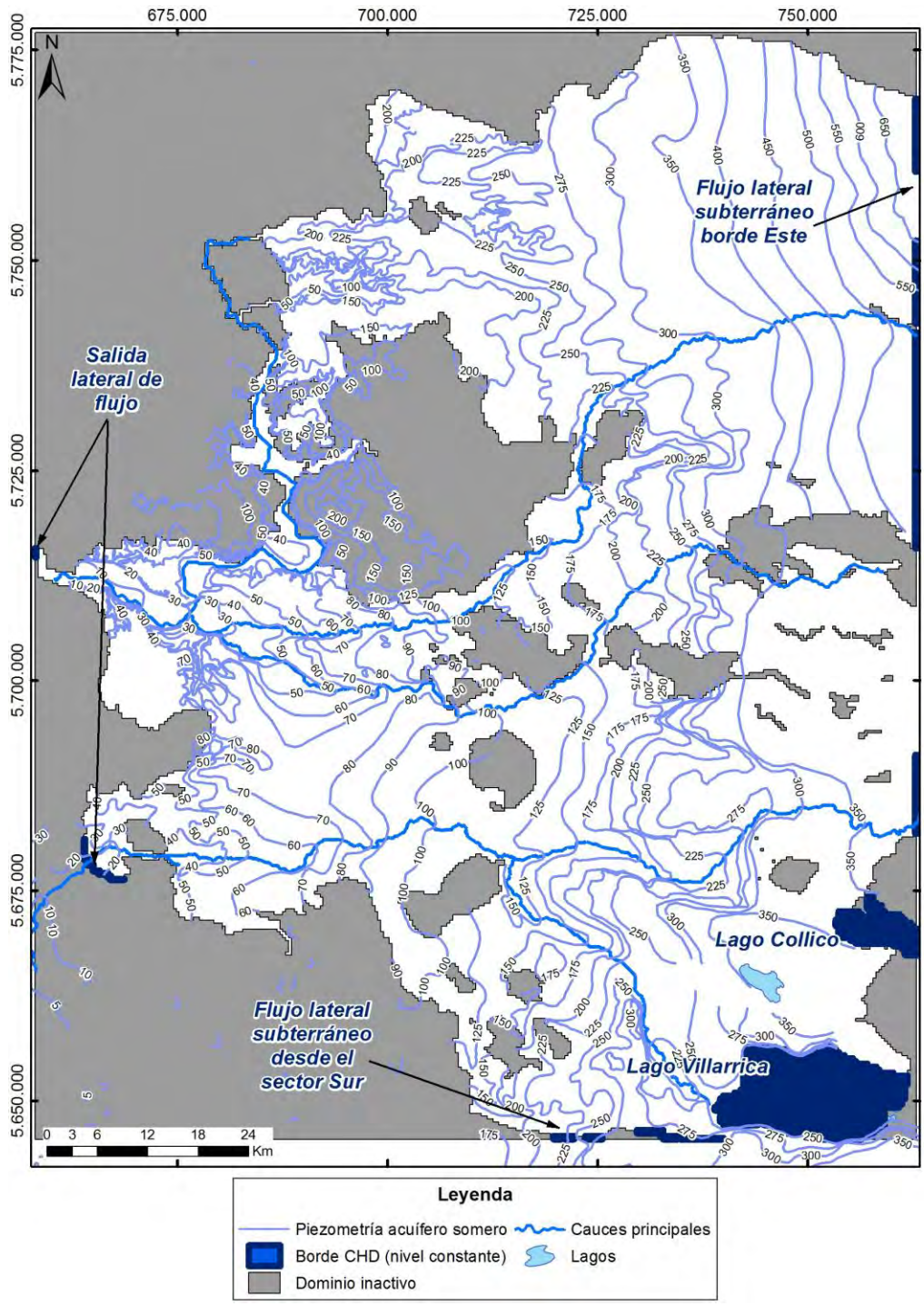


Figura 10-13: Distribución de la condición de borde CHD en el modelo numérico. Capa 1

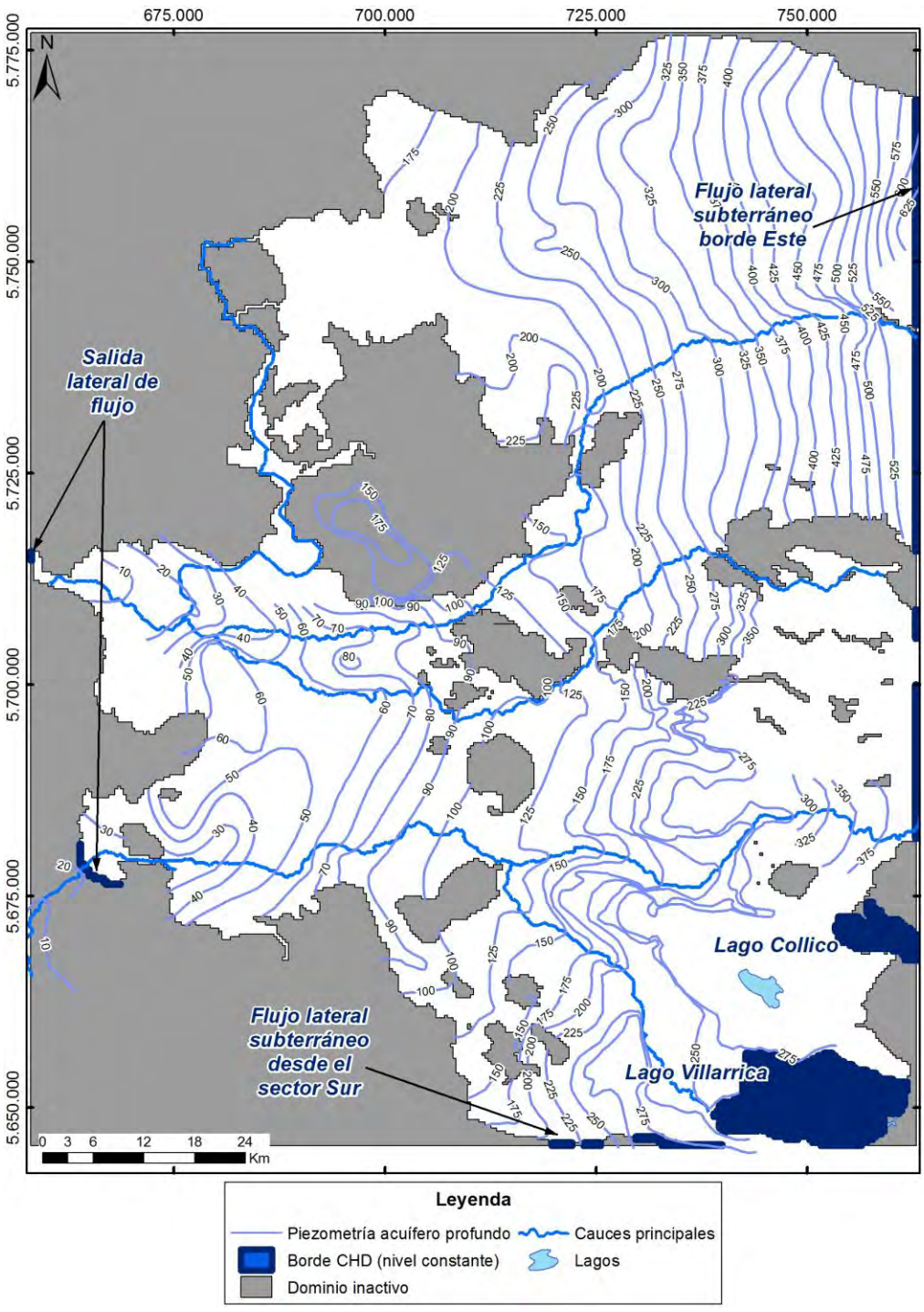


Figura 10-14: Distribución de la condición de borde CHD en el modelo numérico. Capa 3

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. El flujo lateral mencionado se genera en las porciones orientales de las zonas de recarga ZT2, ZT3, ZI9, ZI10, ZI11, ZI12 (de

acuerdo a nomenclatura del modelo hidrológico) que se ubican fuera del límite del modelo numérico. La Figura 10-15 muestra la distribución espacial de estas zonas. Cabe mencionar que en el punto siguiente se presentan las zonas y tasas consideradas para ser ingresadas al área activa del modelo, las cuales fueron renumeradas (en relación a la nomenclatura del modelo hidrológico) sólo para efectos de ingresarlas al modelo numérico (la zona 1 se dejó en blanco). Para una mejor comprensión se indican más abajo las equivalencias entre las zonas de recarga del modelo hidrológico y del modelo numérico de las zonas que se presentan en la Figura 10-15.

De esta forma, la ZI12 del modelo hidrológico corresponde a la zona 13 del modelo numérico, así la ZI11 a la zona 12, la ZI10 a la zona 11, la ZI9 a la zona 10, la ZT2 a la zona 23 y la ZT3 a la zona 24.

En base a esto, se estiman 13,5 m^3/s que ingresan por el borde Este del modelo en base a las tasas de recarga presentadas en la Figura 10-15.

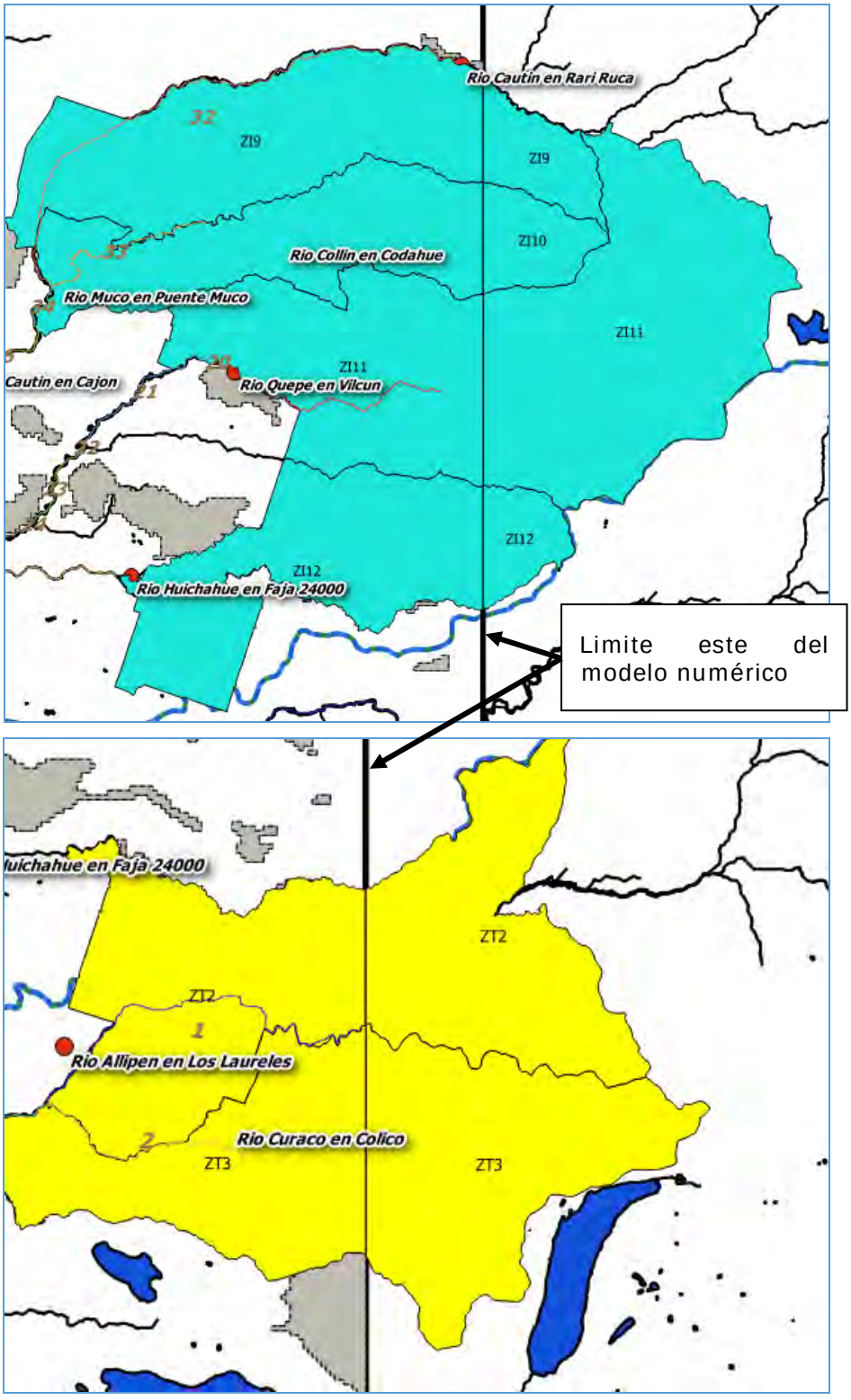
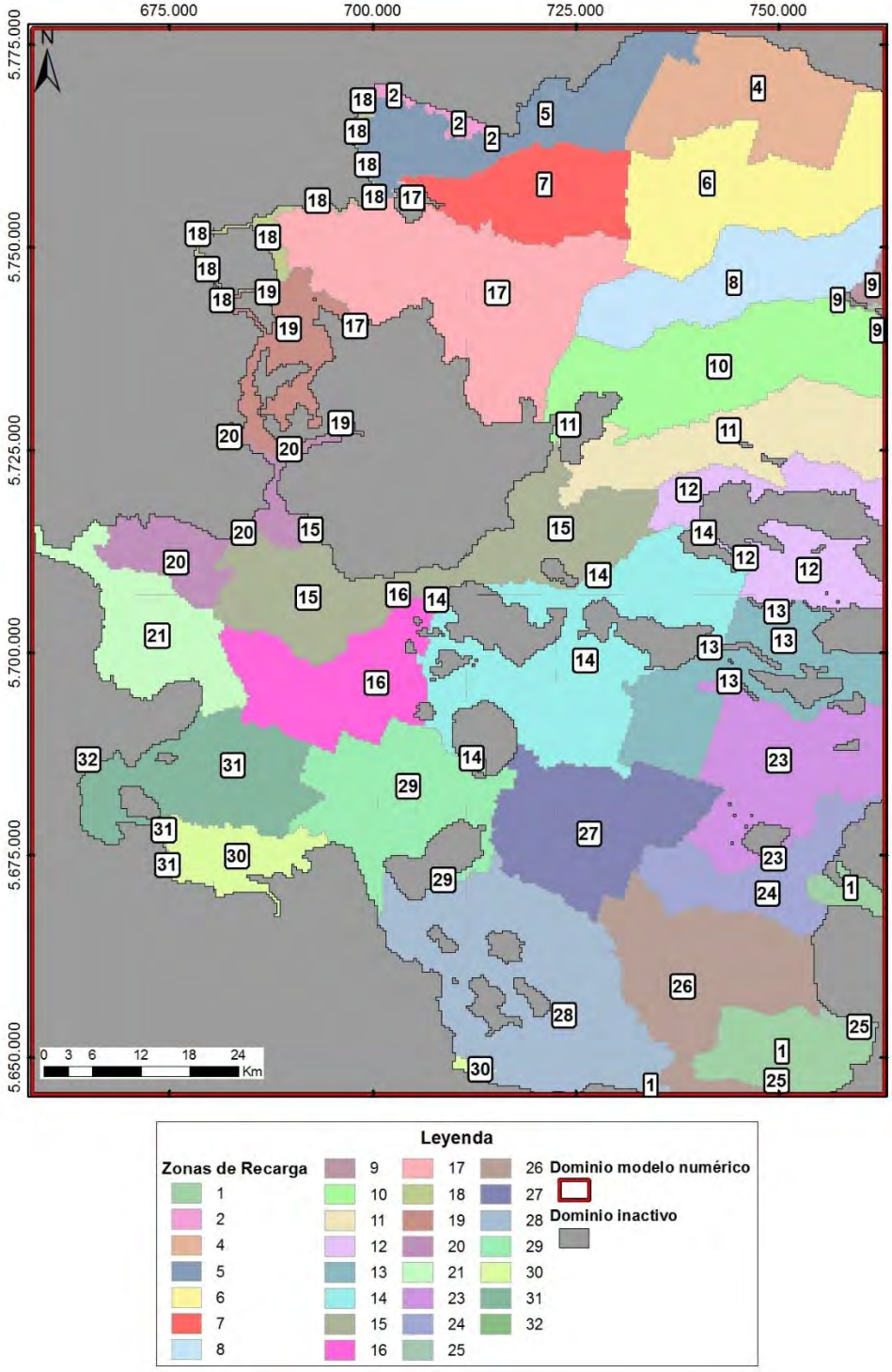


Figura 10-15: Zonas de recarga superficial fuera del dominio que generan recarga lateral hacia el Oeste

10.6.2 Recarga Superficial

En la Figura 10-16 se identifican las áreas de recarga superficial ingresadas al modelo numérico junto con tasas (m/d) asociadas a cada zona en función de su tamaño y del caudal de recarga estimado. Cabe recordar que la estimación de recarga que proporciona el modelo hidrológico engloba tanto la componente por riego como la asociada a la preciptaciones. Por otra parte, las tasas de recargas ingresadas al modelo corresponden a valores promedio (de largo plazo), para representar la condición de flujo base. El tamaño de las zonas de recarga fue corregido en función de la distribución de celdas inactivas y del dominio del modelo. Luego la cantidad total de agua que ingresa al modelo es menor a la que estima el modelo hidrológico en su totalidad, la cual se estima en 20,1 m^3/s.

La recarga superficial de las subcuencas definidas por el modelo hidrológico fue incorporada al modelo mediante una condición de borde de flujo especificado utilizando el paquete RCH (*recharge*).



Zona	Tasa de recarga (m/d)
1	0
2	7.80E-05
4	2.42E-04
5	1.27E-04
6	2.18E-04
7	1.14E-04
8	1.74E-04
9	3.43E-04
10	1.75E-04
11	2.16E-04
12	2.94E-04
13	2.65E-04
14	1.89E-04
15	1.14E-04
16	1.57E-04
17	9.60E-05
18	1.04E-04
19	1.17E-04
20	3.50E-05
21	1.12E-04
23	2.56E-04
24	4.01E-04
25	5.06E-04
26	3.58E-04
27	2.52E-04
28	2.89E-04
29	2.27E-04
30	2.61E-04
31	1.86E-04
32	1.90E-04

Figura 10-16: Zonas de recarga superficial adoptadas en la zona modelada (WGS84, Huso 18S)

Además de la recarga superficial asignada a través del paquete RCH (*recharge),* se ha incluido una condición de borde a través de pozos que ingresan el flujo procedente del sector de cordillera de La Costa (cordillera de Nahuelbuta) situado al norte de Temuco, el cual está representado en el modelo por celdas inactivas. En la Figura 10-17 se muestran las celdas con pozos de recarga y la extensión de las zonas inactivas en las que se ha calculado el valor de esta recarga.

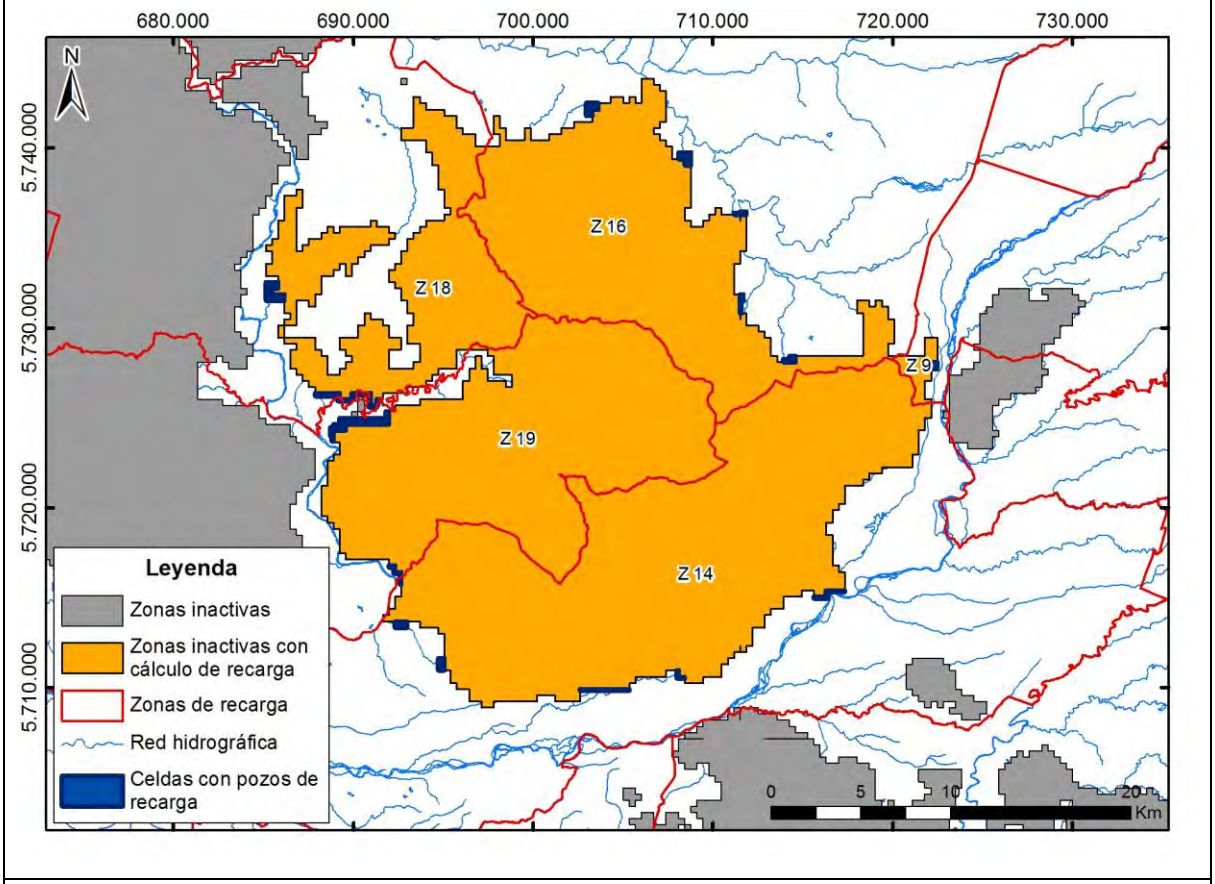


Figura 10-17: Pozos de recarga en el sector de la cordillera de La Costa hacia el norte de Temuco

La recarga procedente de este sector se infiltra en el acuífero en las zonas de contacto entre las unidades impermeables del cerro y las zonas aluviales, donde se han situado los pozos. Esta recarga se ha calculado en función de la recarga que presenta cada una de las subcuencas (o zonas de recarga) en que está dividido el sector. Así, se ha calculado la recarga correspondiente para cada zona en función de la tasa de recarga y el área inactiva correspondiente. Este valor se ha disminuido mediante el cálculo de las extracciones que presenta cada una de las zonas según la información del catastro y el factor de uso de los pozos. En total se obtiene una recarga adicional calculada de unos 686 L/s.

Tabla 10-1. Caudal de recarga calculado en los pozos de inyección del sector norte de Temuco

Zona de recarga	Valor de recarga (m/día)	Área de zona de recarga (Km^2)	Recarga calculada L/s	Caudal de extracción en el sector inactivo (L/s)	Caudal de recarga asignado en el modelo numérico (L/s)
ZRI 14	1,14E-04	271,28	358,44	47,70	310,74
ZRI 19	3,51E-05	191,80	77,99	14,46	63,53
ZRI 16	9,58E-05	171,18	189,81	11,83	177,98
ZRI 18	1,17E-04	94,81	128,18	2,09	126,09
ZRI 9	1,75E-04	4,02	8,14	0,00	8,14
TOTAL		**733,08**	**762,56**	**76,08**	**686,48**

Tras el proceso de calibración se ha aumentado la recarga procedente de este sector, pasando de 686,48 L/s a 920 L/s. El caudal adicional se ha aplicado en pozos de recarga situados en la zona de recarga 14, que según la calibración realizada en este sector es la zona que presenta un mayor aporte de caudal hacia el acuífero. En la Figura 10-18 se muestra la nueva distribución de pozos de recarga en este sector.

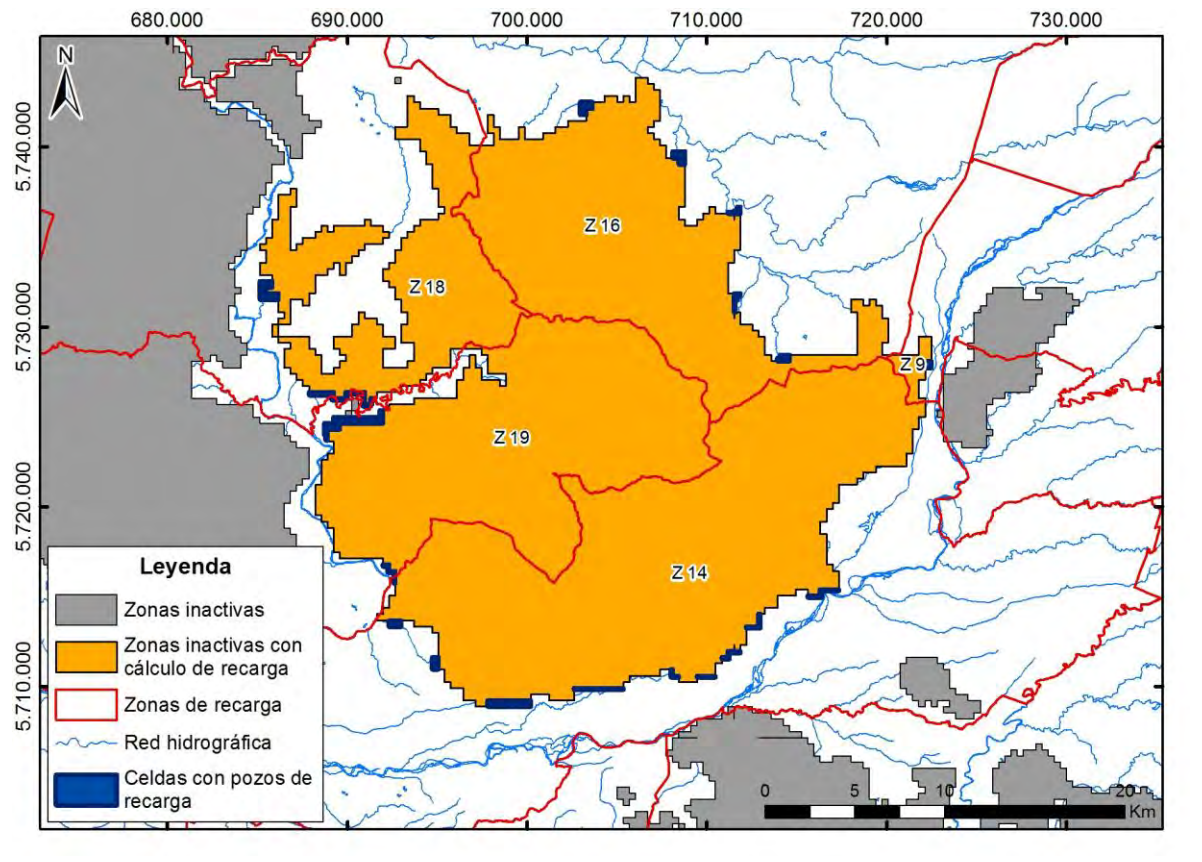


Figura 10-18: Pozos de recarga en el sector de la cordillera de La Costa hacia el norte de Temuco tras la calibración del modelo.

10.6.3 Lagos

En la zona modelada se ubica el lago Villarrica y el lago Collico, los cuales fueron representados con la condición de borde de carga hidráulica conocida en base a la cota del espejo de agua obtenido de la intersección del perímetro de cada lago con la información topográfica del modelo de elevación digital. Para el lago Villarrica se adoptó una altura de 225 m.s.n.m y para el lago Collico de 333 m.s.n.m.

10.6.4 Cauces Superficiales

Los cauces superficiales representan las principales zonas de intercambio entre el dominio subterráneo y el dominio superficial. Dependiendo del nivel de detalle requerido para representar los cauces superficiales y su interacción con el acuífero, estos fueron simulados empleando dos paquetes diferentes de condición de borde:

a) Paquete RIV (river) para ríos de Orden 4.
b) Paquete DRN (drain) para ríos de Orden 3 y 2.

Cabe señalar que la representación de los cauces con la condición de borde DRN se efectuó sólo en los ríos de orden 3 y 2, 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 (cauce de los ríos de Orden 3 y 2), recibiendo flujo desde el acuífero.

El paquete RIV se seleccionó para simular los ríos de orden 4 (Toltén e Imperial, entre otros). La condición de borde *River* es una condición dependiente de la cota de la napa subterránea y el río. En una celda de río, el flujo de agua que entra y sale del acuífero depende de la cota asignada al río y del valor de la conductancia. El valor de la cota del río (*Stage*) es comparado con el valor de la cota del agua en el acuífero en la celda donde se encuentra el río, y si el nivel en el acuífero es mayor, entonces el río recibe agua del acuífero, mientras que si es menor, el río infiltra agua hacia el acuífero. La cantidad de flujo intercambiado entre río y acuífero depende del valor de la conductancia (factor de resistencia al flujo).

A través de la incorporación de esta condición de borde se busca simular el comportamiento hidrogeológico del sector, en el cual en determinados sectores el río recibe agua del acuífero, mientras que en otros el río aporta agua hacia la napa subterránea en aquellos sectores donde el nivel de agua está más bajo.

Los datos que requiere el paquete "*River*" para simular esta condición de borde son los siguientes:

- *Stage* (m): Corresponde a la cota del espejo de agua del río. Se ha tomado para todos los ríos un metro por encima de la cota de la superficie del cauce en el modelo digital del terreno.
- *Bottom river* (m): Corresponde a la cota del lecho del río. Se ha tomado la cota del cauce en el modelo digital del terreno.
- *Width* (m): Es el ancho del cauce, la cual se ha tomado como un valor constante de 10 m para todos los ríos.
- *Conductance* (m/día): El valor de la conductancia determina la cantidad de flujo intercambiado entre acuífero y río. Este valor depende de la conductividad hidráulica del lecho del río, el ancho del río, y la longitud del mismo en cada celda del modelo. El valor de la conductancia ha sido modificado en el proceso de calibración, obteniéndose un promedio de 45.174 m/día.

Los perfiles de los segmentos de los ríos, se revisaron con el fin de evaluar la variación de la elevación batimétrica de los cauces y rectificar posibles cambios topográficos asociados al modelo de elevación digital utilizado con una resolución de 85,688 m. En la Figura 10-19 se presenta como ejemplo el perfil de un segmento del río Tolten.

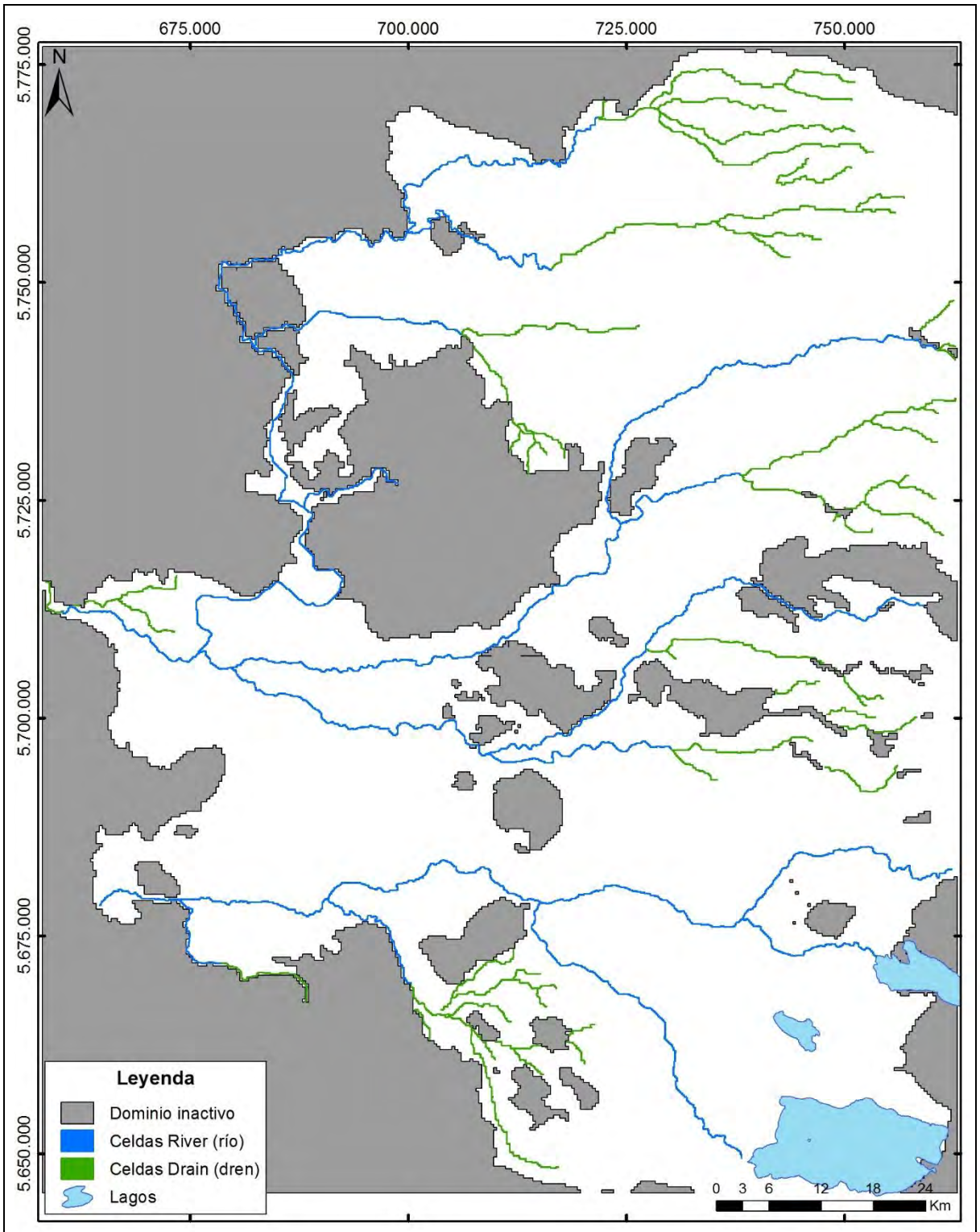
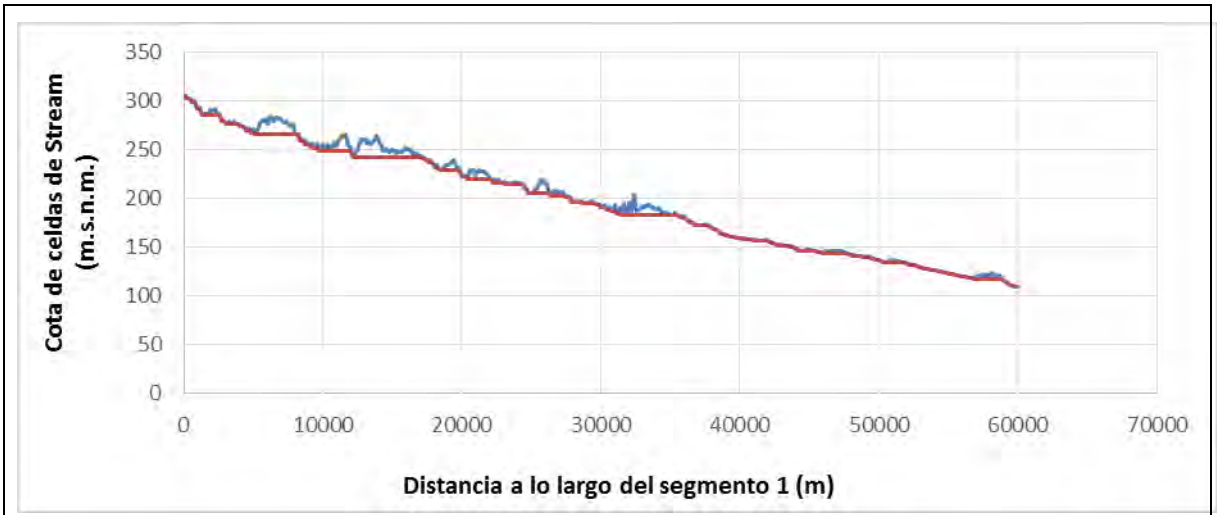


Figura 10-19: Localización de celdas River (ríos de orden 4) y celdas Drain (ríos de orden 2 y 3)



*En rojo perfil corregido

Figura 10-20: Perfil longuitudinal del segmento 1 del cauce

10.7 EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS

Las extracciones consideradas en el modelo numérico provienen del catastro de captaciones generado en el capítulo 3 de este informe. Dicho catastro contiene información de 2.796 pozos de bombeo (capítulo 3), de los cuales 1.959 corresponden a captaciones someras (profundidad menor a 20 metros) y 493 a captaciones profundas y las restantes 344 no presentan información.

La producción total estimada según el catastro es de 6.988 L/s, lo que considera la información de caudales de derecho (o caudal solicitado en caso de no estar disponible el primero) y la asignación de factores de uso, según se indica en el capítulo 3.

Del total de captaciones catastradas, 1.665 captaciones corresponden a pozos ubicados dentro del área activa de modelación (pozos con información de ubicación) y con un caudal de extracción mayor a cero (factor de uso mayor a cero). De estas 1.665 captaciones, 1.492 son derechos otorgados y el resto son captaciones con derechos en trámite. En el modelo numérico se ingresan las extracciones con derechos otorgados, por tanto, para la simulación permanente del modelo se han ingresado 1.492 captaciones, ya que los pozos con derechos en trámite se incluyen en las simulaciones posteriores.

Los pozos de extracción se asignan a las distintas capas del modelo numérico en función de su profundidad. La profundidad de los pozos sin información se efectuó de acuerdo al caudal de extracción, donde a los pozos con caudal inferior a 4 l/s se les asignó una profundidad de 15 metros, y al resto de los pozos se les asignó la capa 3. En la Figura 10-21 se presentan los pozos del catastro, resaltando los pozos efectivamente ingresados al modelo. Se resalta también los pozos con un caudal de extracción mayor a 40 l/s, los que corresponden a los pozos donde se refinó la grilla numérica. Estos pozos se ubican principalmente en las cercanías de la ciudad de Temuco.

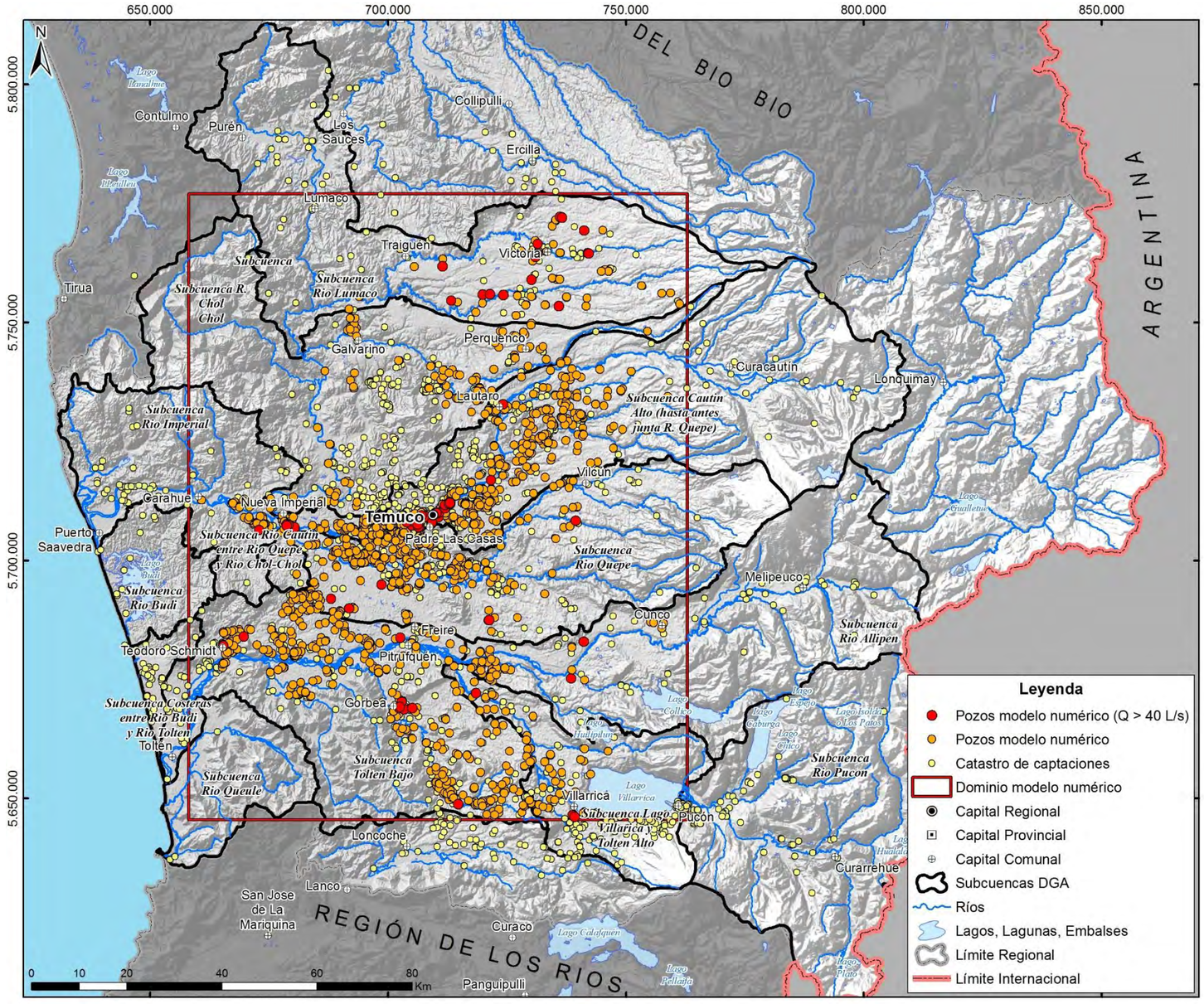


Figura 10-21: Pozos de bombeo en catastro e ingresados al modelo numérico

Los derechos otorgados en los pozos del modelo numérico son de 9.851,7 L/s. Para ingresar las extracciones al modelo se ha calculado el caudal en función del factor de uso, obteniéndose unas extracciones efectivas ingresadas al modelo numérico de 5.007 l/s, de los cuales el mayor uso es para agua potable (3.537 l/s) seguido por riego (1.155 l/s) e industrial y otros que suman 315,5 l/s. En la Figura 10-21 se resume el porcentaje de participación por tipo de uso de las extracciones desde pozos de bombeo en el modelo numérico así como el número de pozos correspondiente a cada tipo de uso.

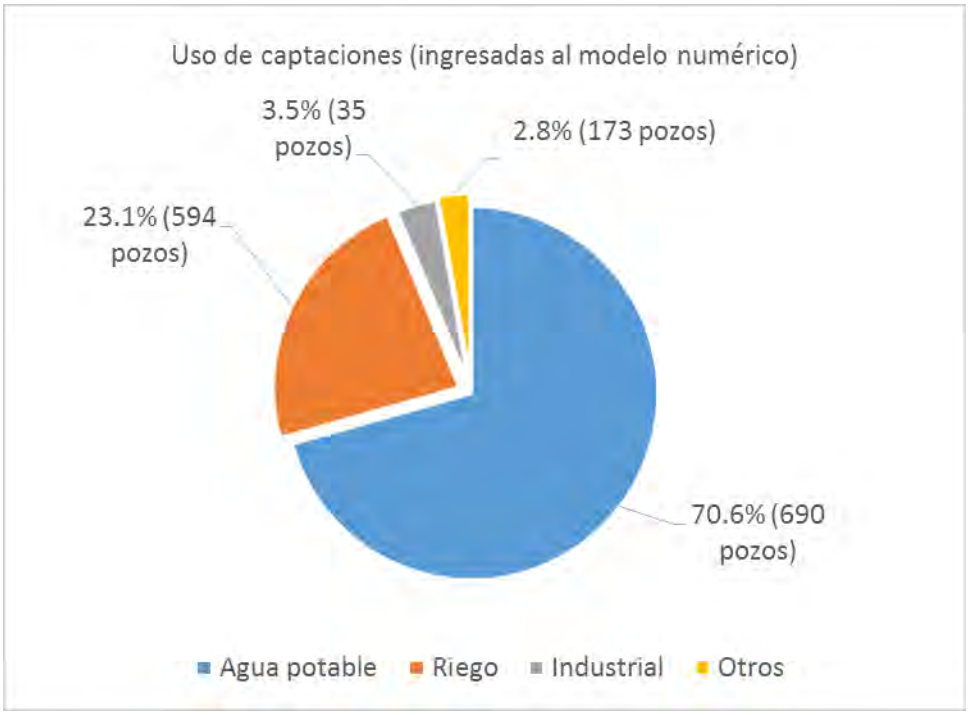


Figura 10-22: Participación en caudal y número de pozos, por tipo de uso de las captaciones efectivamente ingresadas al modelo numérico.

10.8 CONDICIÓN INICIAL

Debido a que se trata de una simulación en régimen permanente, la altura inicial sólo es relevante para reducir el tiempo de simulación y, al contrario de las simulaciones de régimen transiente, no lo es para el resultado que se obtiene desde dicha simulación.

El procedimiento entonces consistió en iniciar la simulación usando la topografía como altura inicial y, en la medida que nuevos resultados se obtuvieron, estos fueron empleados para iniciar la iteración siguiente. A modo de referencia en la Figura 10-23 se presenta la superficie freática resultante de muchas iteraciones que es finalmente la empleada para iniciar la simulación.

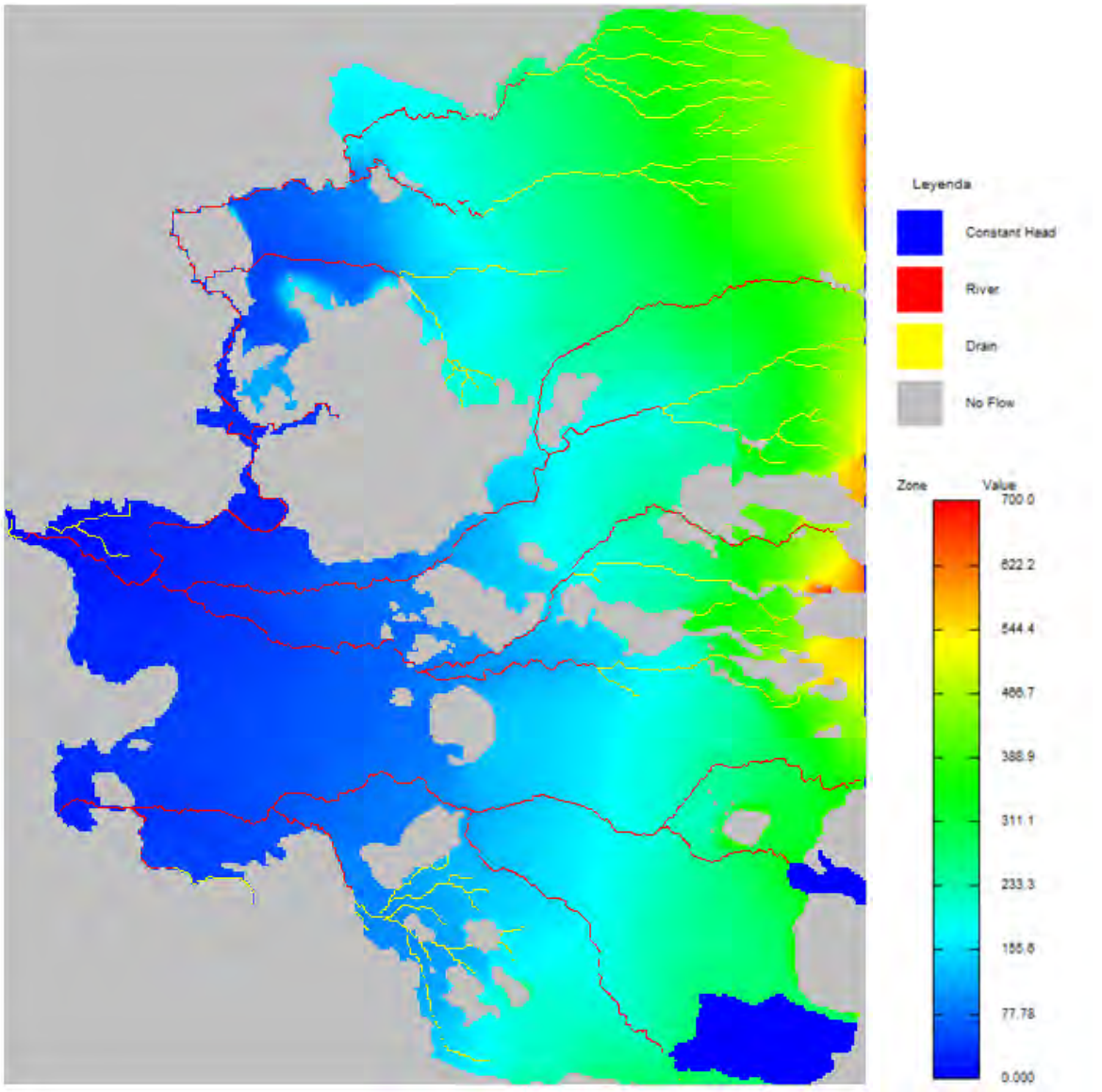


Figura 10-23: Condición inicial utilizada en el modelo numérico en m.s.n.m.

10.9 PARÁMETROS NUMÉRICOS MOTOR DE FLUJO

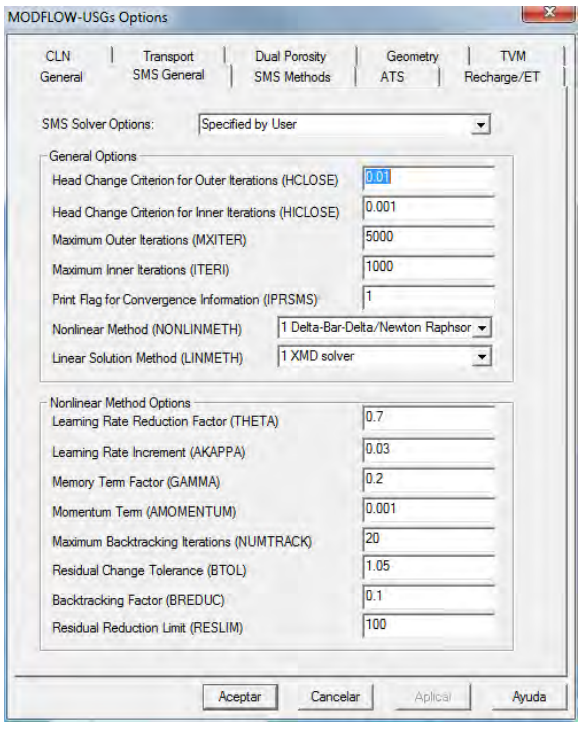
Las diferentes configuraciones empleadas para definir el funcionamiento del modelo numérico se listan a continuación:

- Se utiliza el paquete de flujo LPF (Layer Property Flow Package) de MODFLOW-USG (Harbaugh 2005; Niswonger et al 2011).
- Para el período de *stress* que representa el régimen permanente se utiliza una duración de 10 días, con 1 TS (*time steps*) y un TSM (*time step multiplier*) igual a 1,2.

- Se utiliza la opción LAYCON=4 (USG Upstream Water Table) para definir el tipo de flujo (acuífero libre) en la capa del modelo, lo que es equivalente a la opción pseudo-soil de MODFLOW-SURFACT (HydroGeoLogic 2008). Esto elimina la necesidad de emplear las opciones clásicas de re-humectación (*rewetting*) de celdas de MODFLOW-2000, mejorando notablemente las propiedades de convergencia del modelo.
- Se utiliza la opción de promedios armónicos para las transmisividades interceldas.
- Las recargas superficiales son aplicadas sobre la capa activa.
- Se emplea el *solver* gratuito disponible a través de MODFLOW-USG para resolver las ecuaciones de acuerdo al detalle presentado más abajo.

MODFLOW-USG introduce un nuevo paquete denominado SMS (Sparse Matrix Solver) para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales, el cual en la práctica incorpora dos solvers: χMD (Ibaraki, 2011) y PCGU (White & Hughes, 2012).

Para la calibración de régimen permanente el solver seleccionado fue χMD debido a que presentó mejores propiedades de convergencia dentro de la simulación desarrollada. Los parámetros específicos requeridos para configurar el solver fueron definidos de acuerdo a la experiencia de este consultor desarrollando variados modelos con MODFLOW-USG, los que son presentados en la Figura 10-24.



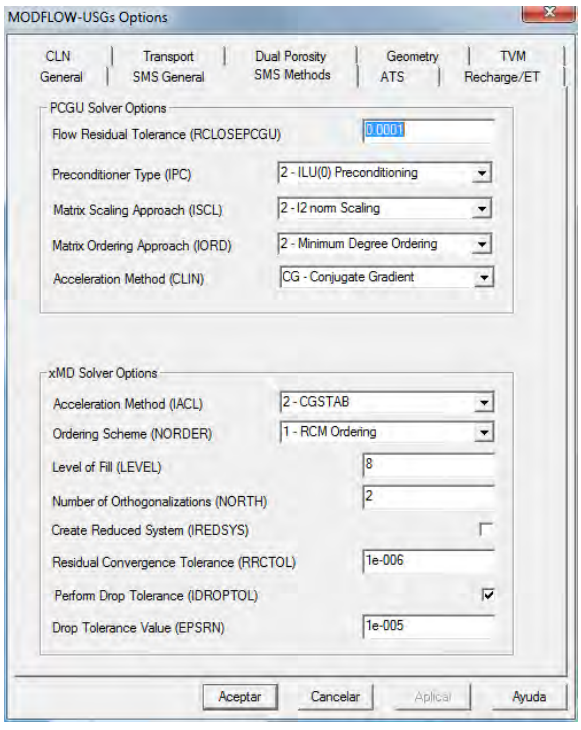


Figura 10-24: : Configuración del paquete SMS y el solver xMD

10.10 CALIBRACIÓN MODELO DE FLUJO

10.10.1 Estrategia de Calibración

La calibración del modelo se hizo teniendo como objetivo ajustar tanto los niveles de agua en los pozos catastrados como también el intercambio neto entre el acuífero y los cauces superficiales, como valor total. El hecho de calibrar tanto niveles como flujos le permite al modelo reducir su incertidumbre en relación a las propiedades hidráulicas que son ajustadas, en este caso, por tratarse de un régimen permanente, las conductividades hidráulicas.

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 de intercambio neto total hacia los ríos, el cual se indica en el capítulo 10.11.1. A partir del 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 desde el modelo numérico subterráneo, obteniendo así el caudal de intercambio neto total hacia los cauces superficiales del modelo.

La calibración se desarrolló tanto de forma manual (prueba y error) y también de forma asistida mediante el software PEST (Doherty 2010; Doherty 2015).

10.10.2 Patrón de Calibración

10.10.2.1 Niveles

A partir del catastro de captaciones (pozos y norias) se identifican un total de 1.533 captaciones. Del total de captaciones del catastro (2.569) se eliminaron los pozos sin medición de niveles, lo que resultó en 1.859 pozos y de estos, posterior a verificar que contaban con información de profundidad, se obtuvieron los 1.533 pozos ubicados dentro de la zona activa del modelo.

Las mediciones de niveles de las captaciones del catastro se realizaron en campañas de terreno efectuadas entre los meses de marzo y julio de 2014. Si bien los pozos incorporados al modelo numérico presentan niveles mixtos (estáticos y dinámicos), del total de 1.859 captaciones con información de niveles, 1.624 corresponden a niveles estáticos.

Se ha definido 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. 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. Sin embargo, para la calibración del modelo numérico se ha optado por filtrar el número final de pozos de observación utilizados en la calibración. Este filtrado de datos se ha realizado 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 realización 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.
- 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 puede estar influenciada por un bombeo previo a la medición.

Finalmente se han obtenido 633 pozos de observación para la calibración del modelo. De estos, 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).

El número de pozos en la capa 1 antes de realizar el filtrado de pozos para la calibración es mucho mayor que en el resto de capas. En la Tabla 10-2 se muestran los pozos de observación presentes en cada capa. En porcentaje se obtiene un 90,2% de captaciones en la capa 1, un 4,6% en la capa 2 y un 5,2% en la capa 3. Tras el filtrado de pozos se obtiene un 85,5% de pozos en la capa 1, un 9,3% en la capa 2 y un 5,2% en la capa 3, siendo esta última capa la que presenta menos pozos de observación. Sin embargo, el porcentaje de pozos en esta capa respecto al resto de capas no disminuye tras el filtrado (Tabla 10-2).

Aunque en la capa 3 el número de pozos existentes previo al filtrado es reducido, la eliminación de algunos pozos en la calibración se basa en la realización de una calibración con datos de medición que sean representativos del acuífero. Los pozos profundos que se encuentran en la capa 3 se localizan principalmente en la zona norte del modelo y la zona central, en las proximidades de Temuco. En este último sector es donde se han filtrado un mayor número de pozos de observación debido a que se encuentran pozos con altas tasas de bombeo, por lo que los niveles presentan altas diferencias entre pozos cercanos, motivo por el cual se han filtrado aquellos pozos que pueden tener un nivel asociado a descensos por bombeos en el sector. En la Figura 10-25 se muestran los pozos utilizados en la capa 3 y los pozos previos al filtrado.

Tabla 10-2. Pozos de observación utilizados en la calibración

Capa	Pozos con información de nivel y profundidad		Calibración	
	Nº Pozos	Procentaje %	Nº Pozos	Procentaje %
Capa 1	1383	90,2	541	85,5
Capa 2	70	4,6	59	9,3
Capa 3	80	5,2	33	5,2
Total	1533	100,0	633	100,0

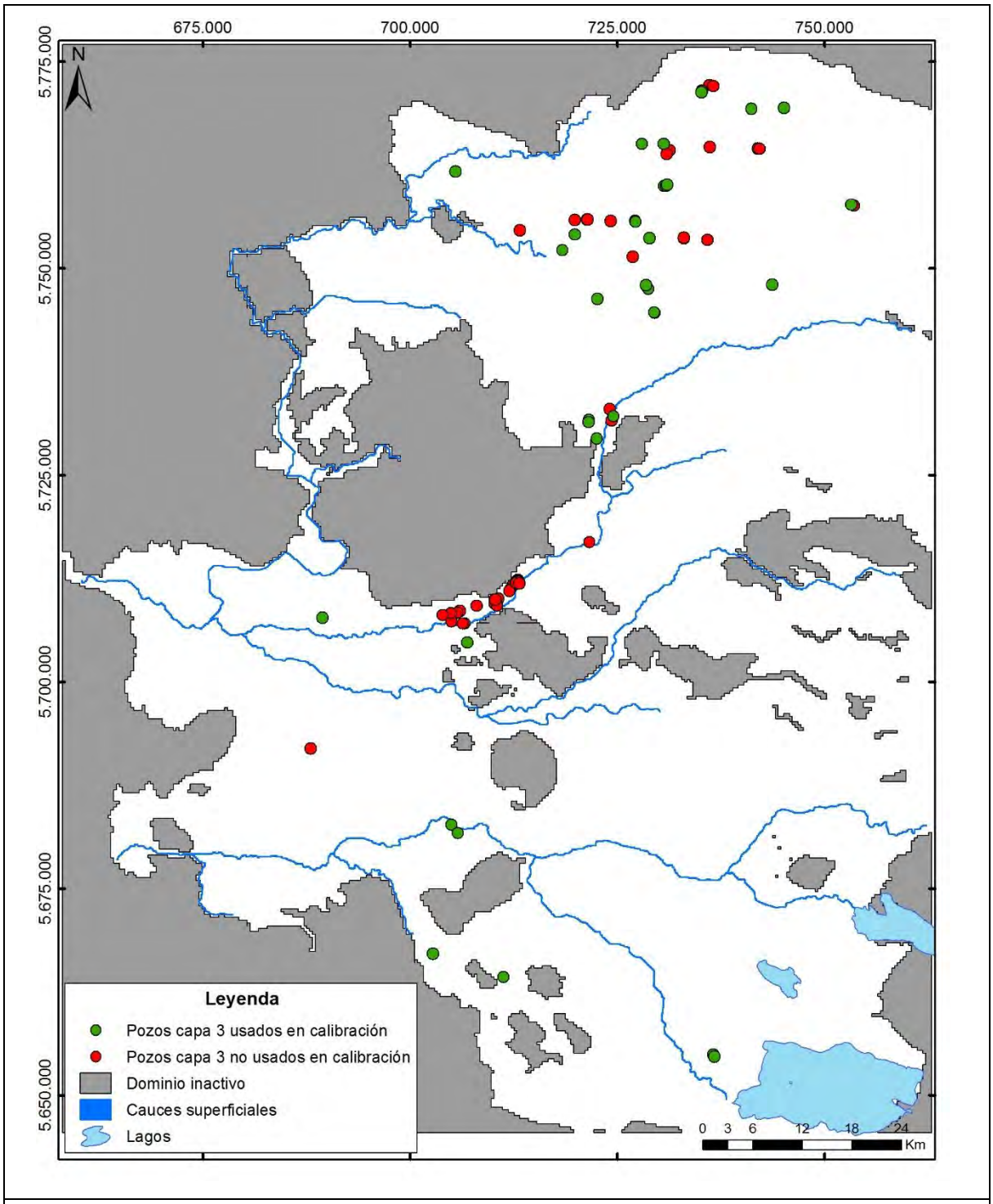


Figura 10-25: Pozos utilizados en la calibración para la capa 3

En la Figura 10-26 se muestra la ubicación de los pozos de observación para cada capa del modelo. A partir de esta distribución de niveles observados en las distintas capas del modelo, se ha realizado la calibración del modelo en régimen permanente. Como puede observarse la mayor parte de los pozos se encuentran en la capa 1.

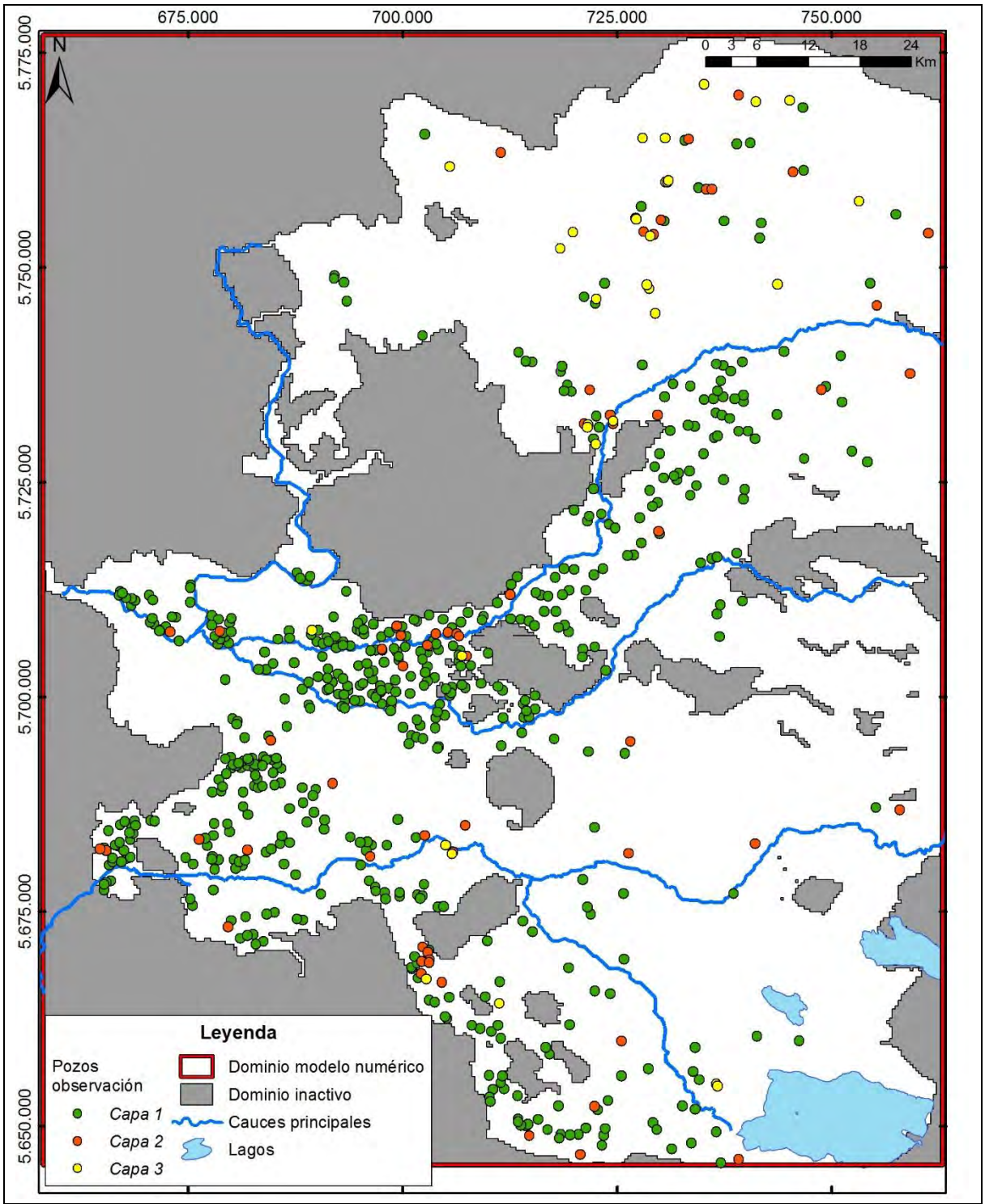


Figura 10-26: Pozos de observación utilizados en la calibración del modelo.

10.11 RESULTADOS

10.11.1 Componentes y error del Balance de Masas

En la Tabla 10-3 se resumen las componentes del balance hídrico calculado con el modelo numérico empleando los parámetros hidráulicos calibrados.

Tabla 10-3: Balance de masas en régimen permanente

CONDICION DE BORDE	**ENTRADA (m^3/s)**	**SALIDA (m^3/s)**	**NETO (m^3/s)**
Flujo Subterráneo	22.49	7.31	15.18
Rio (dren)		16.61	
Rio (river)	5.54	19.30	-13.76
Recarga superficial	18.62		
Bombeo		4.35	
Pozos cordillera de la costa	0.92		
TOTAL	47.56	47.56	
Error (Balance de masa)	-1.01E-04%		

De los resultados anteriores se destacan los siguientes aspectos:

- El error de balance de masas es bastante inferior a 1%, criterio sugerido por SEA (2012) para este error, por lo que el modelo se valida en este aspecto.
- Las extracciones totales logradas por el modelo son de 4,35 m^3/s en vez de los 5 m^3/s impuestos al modelo (87%). Lo anterior indica que, si bien el catastro desarrollado estableció un nivel mayor de extracciones, en la práctica estas no serían completamente sostenibles por el acuífero, en base a 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^3/s, el cual se estima como el valor neto de los tramos asignados (*river* y *drain*) a los ríos Imperial y Toltén (16,61 m^3/s que salen a través de los drenes, más 13,76 m^3/s de flujo neto que aporta el acuífero a los ríos en los tramos definidos como *river*).

El caudal total de flujo hacia los ríos está formado por el caudal que cede el acuífero al río y por el caudal de afloramiento, que representa el flujo sub superficial hacia los ríos, el cual no llega a infiltrarse en el acuífero. En el modelo hidrológico se calculó esta componenete de flujo para las cuencas Imperial y Toltén a partir del balance hídrico por zona de riego (ver capítulo 5.6). Para aplicar este caudal al modelo numérico

subterráneo se calcularon estos flujos a partir del área correspondiente a las celdas activas de cada zona de riego, obteniendo un caudal de afloramiento de unos 90 m^3/s, como se indica en laTabla 10-4.

Tabla 10-4. Caudal de afloramiento hacia los ríos calculado en el modelo hidrológico

Zona riego	Área km^2	Pp m^3/s	EvT m^3/s	Dp m^3/s	Aflora m^3/s	Río m^3/s	R m^3/s	η m^3/s	DefH m^3/s	R/Pp %
ZR I01	55,4	1,8	1,3	0,4	0,2	0,7	0,0	-0,8	0,00	2,3
ZR I02	335,2	12,3	8,2	4,2	1,1	15,2	0,3	-16,8	0,00	2,4
ZR I03	337,8	21,3	10,1	8,2	3,1	2,5	0,8	-3,4	0,00	3,7
ZR I04	355,2	15,4	9,3	5,3	1,7	14,3	0,4	-15,6	0,00	2,9
ZR I05	400,8	23,7	11,7	8,6	3,4	4,7	0,8	-5,5	0,00	3,5
ZR I06	237,1	9,7	6,0	3,8	1,0	18,0	0,3	-19,4	0,00	2,7
ZR I07	302,2	14,8	7,8	5,6	2,0	1,6	0,5	-2,7	0,00	3,5
ZR I08	20,8	1,6	0,6	0,7	0,3	0,9	0,1	-0,9	0,00	4,3
ZR I09	453,0	22,7	11,8	8,6	3,1	89,3	0,8	-90,9	0,00	3,4
ZR I10	330,4	18,6	8,9	7,6	2,7	12,0	0,7	-13,3	0,00	3,7
ZR I11	378,9	26,2	11,0	10,5	4,2	8,0	1,1	-8,6	0,00	4,1
ZR I12	371,1	23,9	10,5	9,7	3,8	4,8	0,9	-5,8	0,00	4,0
ZR I13	744,4	38,3	19,9	13,5	5,3	61,0	1,4	-62,8	0,00	3,5
ZR I14	751,5	30,7	18,6	9,9	3,2	144,3	0,8	-146,1	0,00	2,7
ZR I15	293,8	13,0	7,5	5,1	1,7	99,3	0,4	-101,1	0,00	3,4
ZR I16	780,2	28,1	18,8	7,2	2,8	14,2	0,7	-15,5	0,00	2,6
ZR I17	656,9	25,9	16,6	7,6	2,6	64,3	0,7	-65,9	0,00	2,5
ZR I18	691,3	28,3	17,2	8,5	3,1	82,4	0,8	-83,8	0,00	2,7
ZR I19	669,8	37,6	22,9	11,3	1,0	127,9	0,2	-125,8	0,00	0,6
ZR I20	553,9	19,7	12,3	5,4	2,1	142,8	0,5	-143,4	0,00	2,6
ZT01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	2,3
ZT02	358,1	23,2	10,6	9,1	3,5	62,5	0,9	-63,5	0,00	2,4

Zona riego	Área km²	Pp m³/s	EvT m³/s	Dp m³/s	Aflora m³/s	Río m³/s	R m³/s	η m³/s	DefH m³/s	R/Pp %
ZT03	309,5	24,2	9,9	9,4	3,9	21,9	1,3	-22,2	1,97	3,7
ZT04	123,4	11,3	4,2	4,7	2,0	7,3	0,6	-7,6	2,71	2,9
ZT05	543,8	39,7	17,0	15,1	6,1	207,4	2,0	-207,9	4,03	3,5
ZT06	352,9	21,7	10,0	8,6	3,4	272,3	0,9	-273,4	0,26	2,7
ZT07	703,4	49,0	21,0	19,0	7,8	27,8	2,0	-28,6	0,03	3,5
ZT08	400,6	21,9	11,1	13,6	3,3	52,8	0,9	-59,8	0,25	4,3
ZT09	721,9	47,5	21,7	17,2	7,2	17,0	1,8	-17,5	0,00	3,4
ZT10	587,3	24,6	12,9	17,0	3,3	530,3	0,8	-539,8	0,00	3,7
ZT11	129,8	4,9	2,5	2,0	0,7	256,5	0,2	-257,0	0,00	4,1
Total caudal de afloramiento hacia ríos					**89,83**					

*Pp: Precipitaciones; EvT: Evapotranspiración; Dp: Descarga; Aflora: Afloramiento de flujo sub superficial; Río: agua que no ingresa a la zona de riego y continúa por el módulo Tramo río; R: Recarga al acuífero por precipitaciones; *η:* ganancias o pérdidas del sistema que no han sido consideradas; *DefH*: Déficit hídrico.

- Este caudal de aproximadamente 90 m^3/s se debe sumar al caudal neto que cede el acuífero a los ríos en el modelo numérico subterráneo, obteniendo así el caudal aportante a los ríos (subterráneo y sub superficial). El caudal neto que sale desde el acuífero hacia los cauces superficiales en el modelo numérico subterráneo es de 30,4 m^3/s, que sumado al caudal sub superficial calculado en el modelo hidrológico, se obtiene un caudal total hacia los ríos de 120,4 m^3/s.
- El aporte lateral subterráneo neto hacia el acuífero es de 15,18 m^3/s, el cual está formado por la entrada de flujo desde el límite Este y desde el sector Sur y los lagos Villarrica y Collico. 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^3/s (ver capítulo 9). Este valor calibrado en el modelo es algo mayor al estimado en el modelo conceptual (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.
- El balance de flujo desde los lagos indica que éstos reciben del acuífero un flujo neto de aproximadamente 0,1 m^3/s, debido a que ingresan al acuífero 0,23 m^3/s y reciben del acuífero 0,32 m^3/s.
- La recarga superficial total es de 19,54 m^3/s, que está formada por la infiltración asignada en las distintas zona de recarga y los pozos de inyección en el sector de la cordillera de La Costa. La recarga producida por riego y

precipitaciones en el sector de estudio ha sido estimada en el modelo conceptual en 20,1 m^3/s (capítulo 9). El modelo numérico arroja un valor total de recarga superficial de 19,54 m^3/s (recarga por riego y precipitaciones y recarga desde la Cordillera de La Costa), valor muy próximo al previamente estimado (corresponde a un 97% del valor estimado).

En la Tabla 10-5 se indican las entradas netas de caudal en los distintos sectores con condición de borde Constant Head. La entrada neta total del modelo, que corresponde a las entradas menos las salidas en estas condiciones de borde, es de 15,18 m^3/s.

Tabla 10-5: Balance de masas por sectores en régimen permanente

Sector de entrada de flujo con borde de nivel constante (Constant Head)	**Caudal de entrada (m^3/s)**	**Caudal de salida (m^3/s)**	**Caudal de entrada neto (m^3/s)**
Lagos	0,23	1,43	-1,20
Constant Head zona este capa 1 (Flujo lateral subterráneo acuífero somero)	0,75	0,02	0,73
Constant Head zona este capa 2 (Flujo lateral subterráneo acuífero profundo)	20,60	5,41	15,18
Constant Head zona sur (Flujo lateral subterráneo en el sector sur)	0,74	0,40	0,33
Constant Head zona oeste (Flujo lateral subterráneo en la parte baja de los ríos Toltén e Imperial)	0,18	0,04	0,14
Total	**22,49**	**7,31**	**15,18**

10.11.2 Residuales y Estadígrafos de Calibración

La Tabla 10-6 resume los principales estadígrafos de residuales calculados en función de los targets de nivel.

Tabla 10-6: Estadígrafos de residuales de nivel - calibración en régimen permanente

Estadígrafos de residuales	**Valor**	**Unidad**
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

Estadígrafos de residuales	Valor	Unidad
Residual Max.	49,08	m
N° Observaciones	633	-
Rango	629,40	m
MAE − normalizado = MAE/Rango	0,47	%
RMS − normalizado = RMS / Rango	1,83	%

Respecto de los residuales de nivel, los valores obtenidos para la calibración de régimen permanente son satisfactorios. El MAE normalizado (error medio absoluto) es 1,83%, valor inferior al criterio del 5% recomendado por SEA (2012). Por otra parte, el RMS normalizado (error cuadrático medio) es 0,47% valor que también es inferior al 5%.

En base a esto se estima que los resultados obtenidos son satisfactorios, dado que ambos estadígrafos de residuales son inferiores al 5% y además existe una buena consistencia entre el modelo numérico y el modelo conceptual desarrollado.

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. En la Tabla 10-7 se muestran los valores obtenidos en los diferentes sectores.

Tabla 10-7: RMS normalizado por sectores - calibración en régimen permanente

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

El RMS normalizado por cuenca muestra valores inferiores al 5%, con un valor de 1,9% para la cuenca del río Imperial, y un valor de 3,2% para la cuenca del río Toltén. En cuanto al valor por capa, la capa 1, correspondiente al acuífero somero presenta el mejor ajuste de niveles, con un 1,6%, frente a las capas 2 y 3, con valores de 3,0 y 5,2%.

10.11.3 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 10-27 se presenta el ajuste de niveles junto con la recta de 45º (ajuste perfecto) y bandas de errores significativas para los errores obtenidos.

La mayor parte de los puntos se encuentran dentro del error de ajuste de 20 m, como se observa en la Figura 10-27, por lo que se obtiene un buen ajuste de niveles en la calibración.

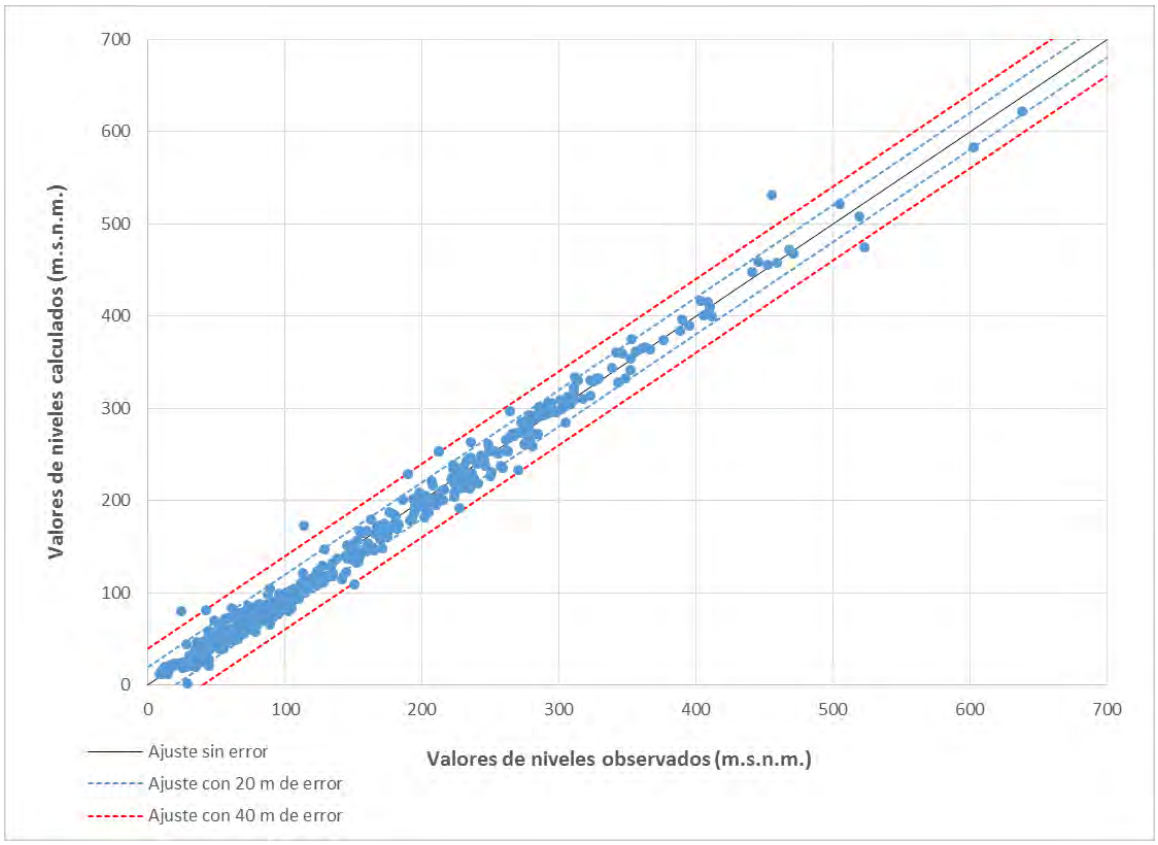


Figura 10-27: Niveles observados vs simulados – calibración régimen permanente

Para complementar el análisis de niveles, se construye un histograma de residuales (diferencia entre el valor observado y el calculado), el cual es presentado en la Figura 10-28. La figura muestra que gran parte de los residuales se sitúan entre 0 y 5 m, con una frecuencia relativa del 21%. El histograma presenta una distribución gaussiana con la mayor distribución de valores entre -5 y 15 m, lo cual supone un 82% del total.

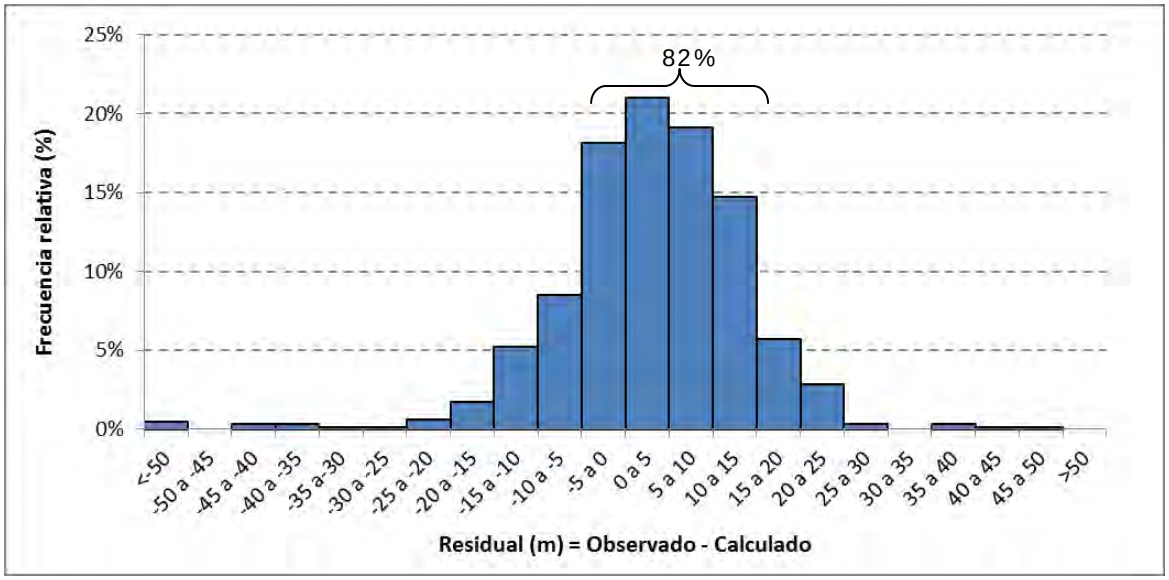


Figura 10-28: Histograma de residuales

10.11.4 Sensibilización de la recarga

Se ha realizado 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%.

- Aumento del 20%

Las tasas de recarga en cada zona de riego se han aumentado en un 20%, pasando de un caudal total de recarga superficial de 18,62 m^3/s a un caudal de 22,34 m^3/s (aumento de 3,7 m^3/s)

El RMS normalizado para un aumento del 20% de la recarga es de 1,86%, en comparación con un valor de 1,83% obtenido en el modelo calibrado. Por tanto, los resultados de calibración son muy similares en ambos casos. En la Figura 10-29 se muestran los aumentos de residual (diferencia entre los valores observados y los valores calculados por el modelo) en comparación con los obtenidos en el modelo calibrado. Los sectores con mayores aumentos en el residual de calibración se encuentran en el sector sur y el sector oeste de la cuenca del río Toltén, donde los residuales aumentan entre 6 y 12 m. Sin embargo, la mayoría de los pozos no empeoran el valor de residual, o bien presentan un aumento entre 0 y 3 m.

En cuanto al balance hídrico, en la Tabla 10-8 se indican los caudales obtenidos para un aumento del 20% de la recarga. Los caudales de salida al río aumentan en unos 3 m^3/s, ya que en el modelo calibrado salen 30,37 m^3/s hacia los ríos, y con el aumento de recarga salen 33,45 m^3/s (17,66 m^3/s hacia los drenes más 15,78 m^3/s de caudal neto de salida hacia las celdas river).

El aumento de un 20% en la recarga produce una mayor salida de caudal hacia los ríos, no implicando un aumento importante en los niveles de los pozos. 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.

Tabla 10-8: Balance de masas en régimen permanente para aumento de la recarga del 20%

CONDICIÓN DE BORDE	**ENTRADA (m^3/s)**	**SALIDA (m^3/s)**	**NETO (m^3/s)**
Flujo Subterráneo	22,23	7,65	14,58
Río (dren)		17,66	
Río (river)	5,18	20,96	-15,78
Recarga superficial	22,34		
Bombeo		4,39	
Pozos cordillera de La Costa	0,92		
TOTAL	50,66	50,66	
Error (Balance de masa)	-1,65E-04		

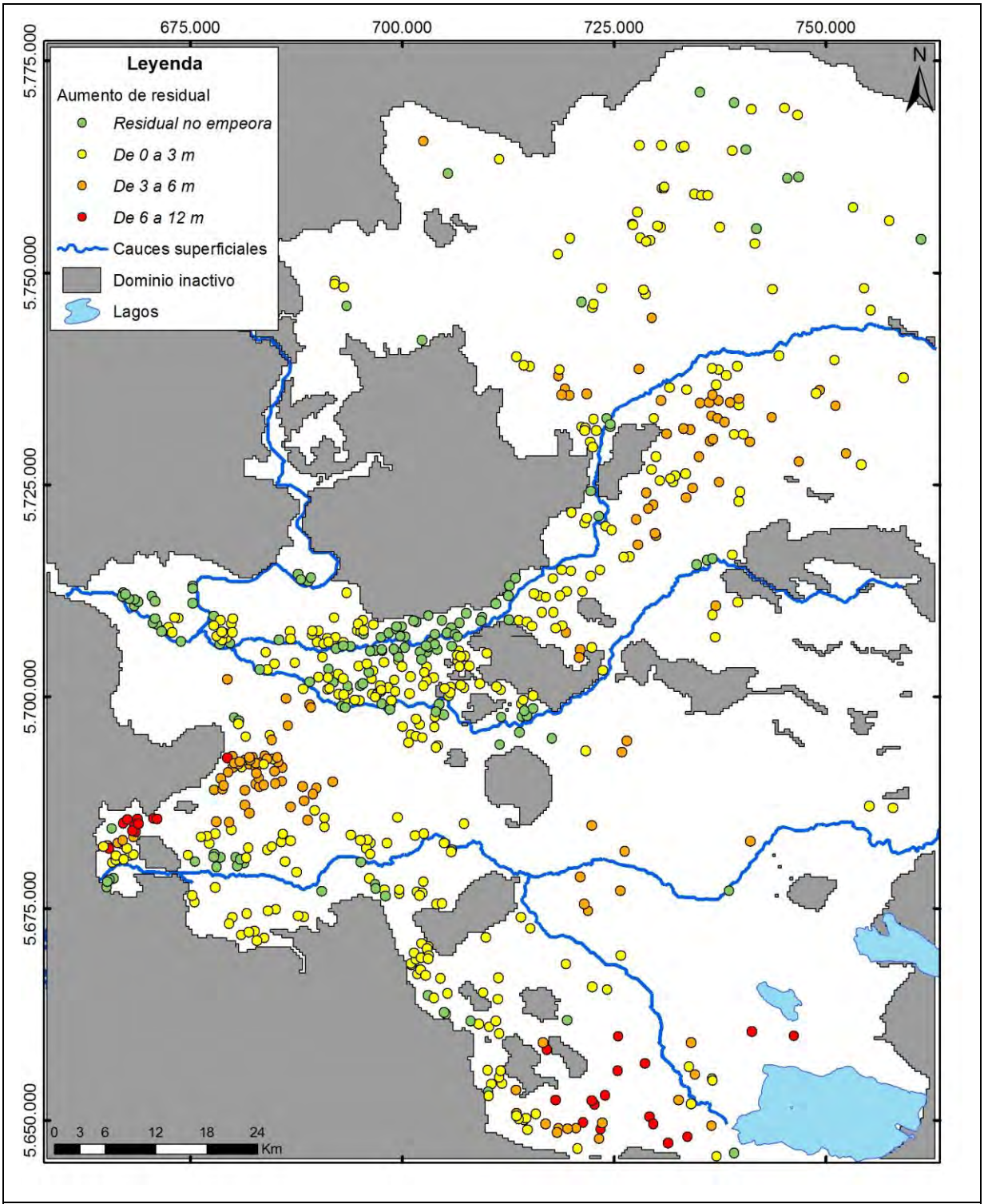


Figura 10-29: Distribución del aumento de residual con un aumento del 20% de la recarga

- Aumento del 30%

Las tasas de recarga en cada zona de riego se han aumentado en un 30%, pasando de un caudal total de recarga superficial de 18,62 m^3/s a un caudal de 24,20 m^3/s (aumento de 5,59 m^3/s).

El RMS normalizado para un aumento del 30% de la recarga aumenta a 1,93%. Este valor sigue estando por debajo del 5% recomendado por SEA (2012), sin embargo los niveles ascienden en determinados sectores, aumentando el residual de los pozos de observación. En la Figura 10-30 se observa que el residual en los pozos aumenta en el sector sur y en el sector oeste de la cuenca del río Toltén, con diferencias de hasta 18m. En el sector este del río Imperial también aumentan con respecto al caso anterior (aumento de la recarga en un 20%). Por tanto, el aumento de la recarga en un 30% empeora la calibración produciendo un aumento de los niveles en el modelo.

La descarga hacia los ríos también aumenta, con 4,62 m^3/s adicionales, ya que en el modelo calibrado salen 30,37 m^3/s hacia los ríos, y con el aumento de recarga salen 34,99 m^3/s (18,20 m^3/s hacia los drenes más 16,79 m^3/s de caudal neto de salida hacia las celdas river).

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.

Tabla 10-9: Balance de masas en régimen permanente para aumento de la recarga del 30%

CONDICIÓN DE BORDE	**ENTRADA (m^3/s)**	**SALIDA (m^3/s)**	**NETO (m^3/s)**
Flujo Subterráneo	22.10	7.82	14.28
Río (dren)		18.20	
Río (river)	5.01	21.80	-16.79
Recarga superficial	24.20		
Bombeo		4.41	
Pozos cordillera de La Costa	0.92		
TOTAL	52.23	52.23	
Error (Balance de masa)	6.00E-05%		

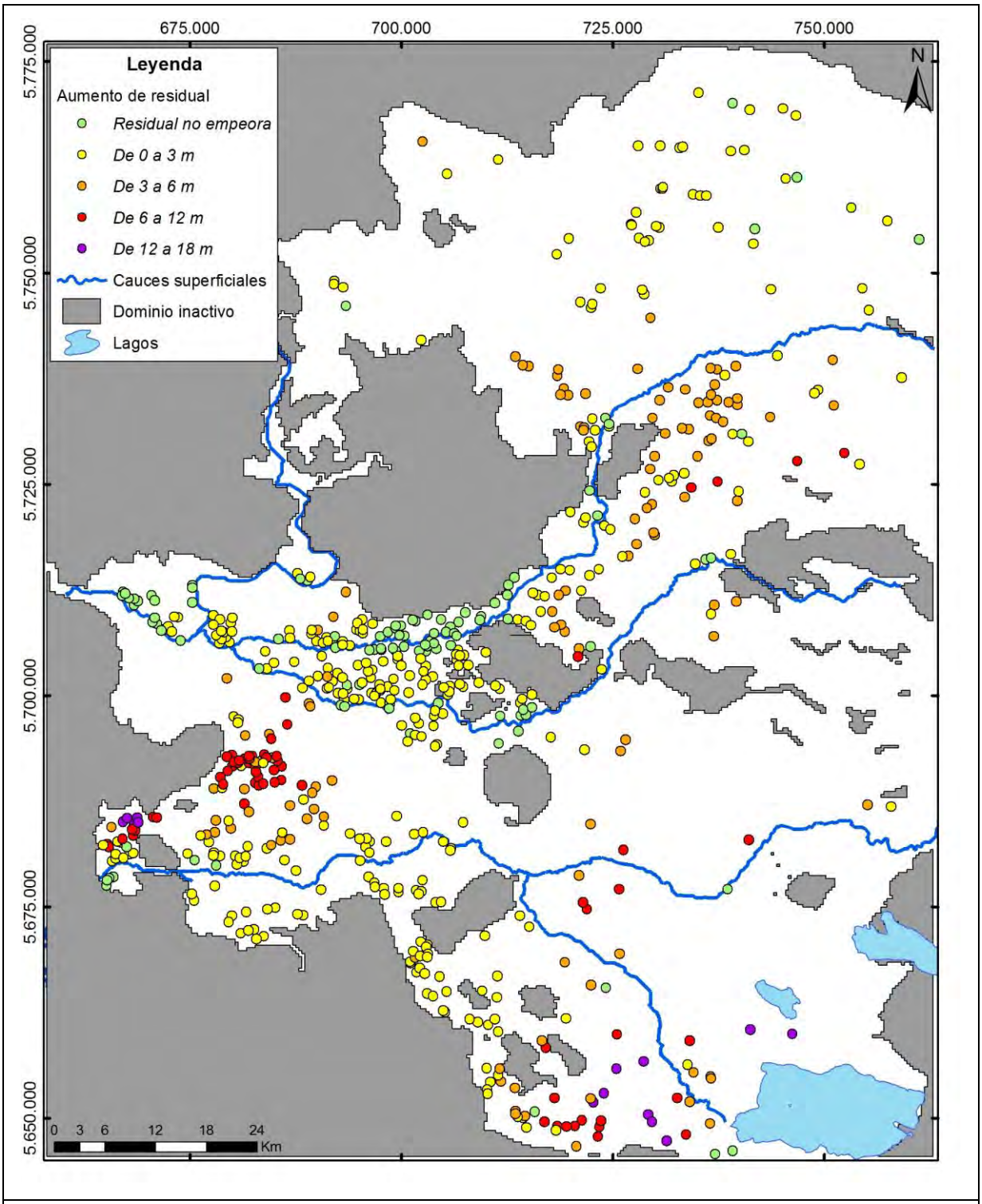


Figura 10-30: Distribución del aumento de residual con un aumento del 30% de la recarga

10.11.5 Piezometría en régimen permanente

De la Figura 10-31 a la Figura 10-33 se muestra la piezometría obtenida tras la calibración en régimen permanente para cada capa del modelo. El flujo principal se produce de Este a Oeste, observándose un gradiente menor en las zonas más altas, el cual va aumentando hacia la descarga de flujo regional en la zona Oeste.

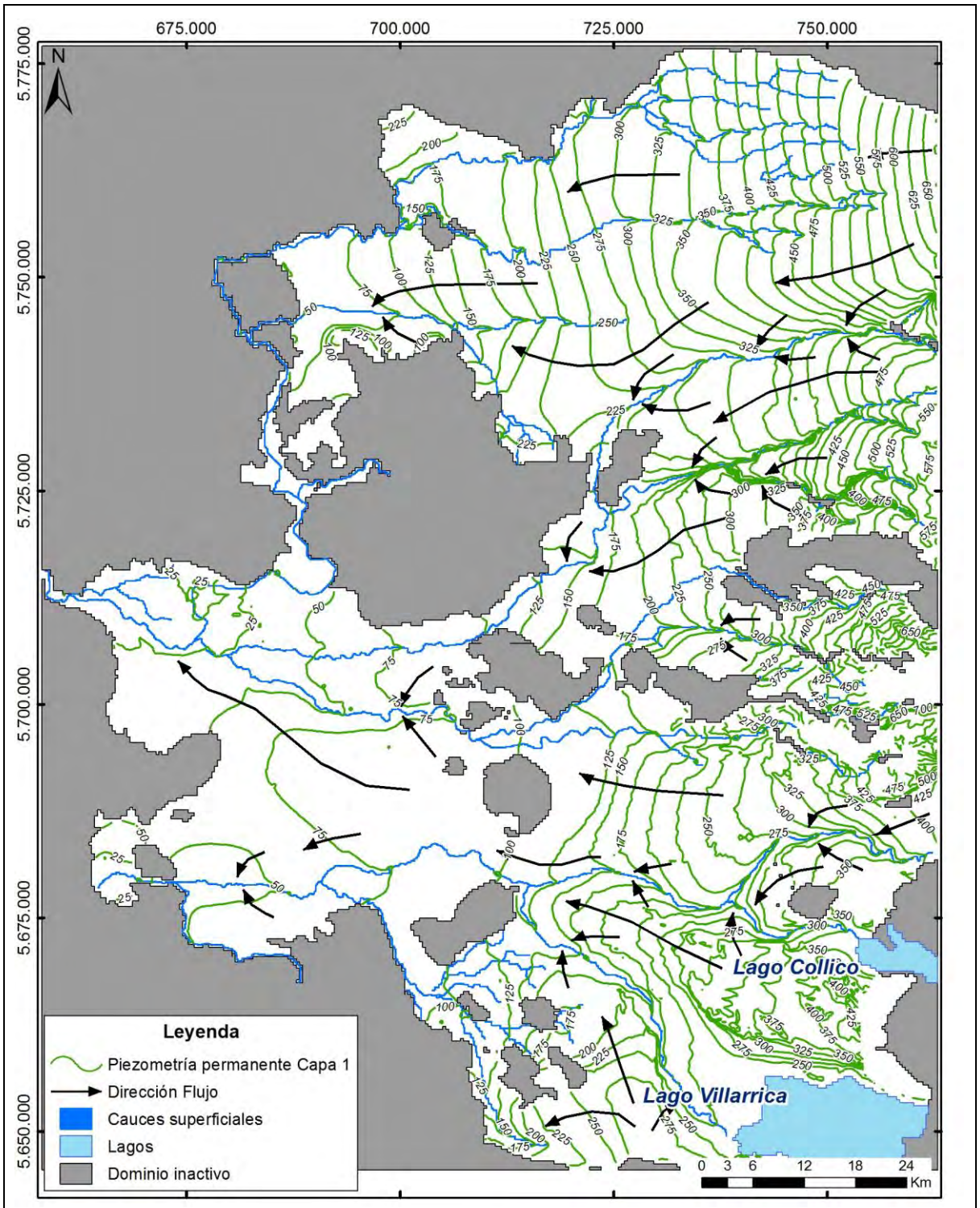


Figura 10-31: Piezometría en régimen permanente en la capa 1

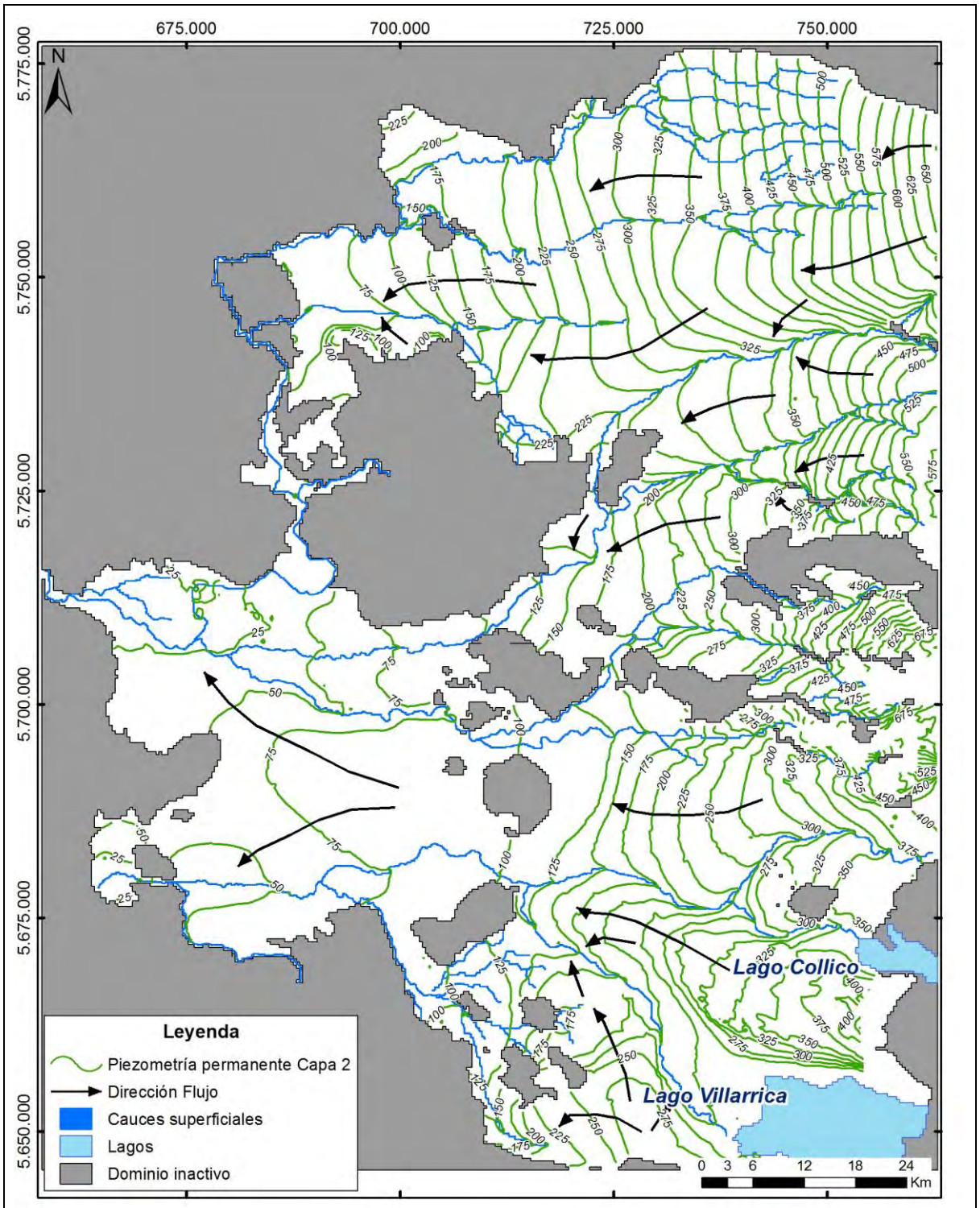


Figura 10-32: Piezometría en régimen permanente en la capa 2

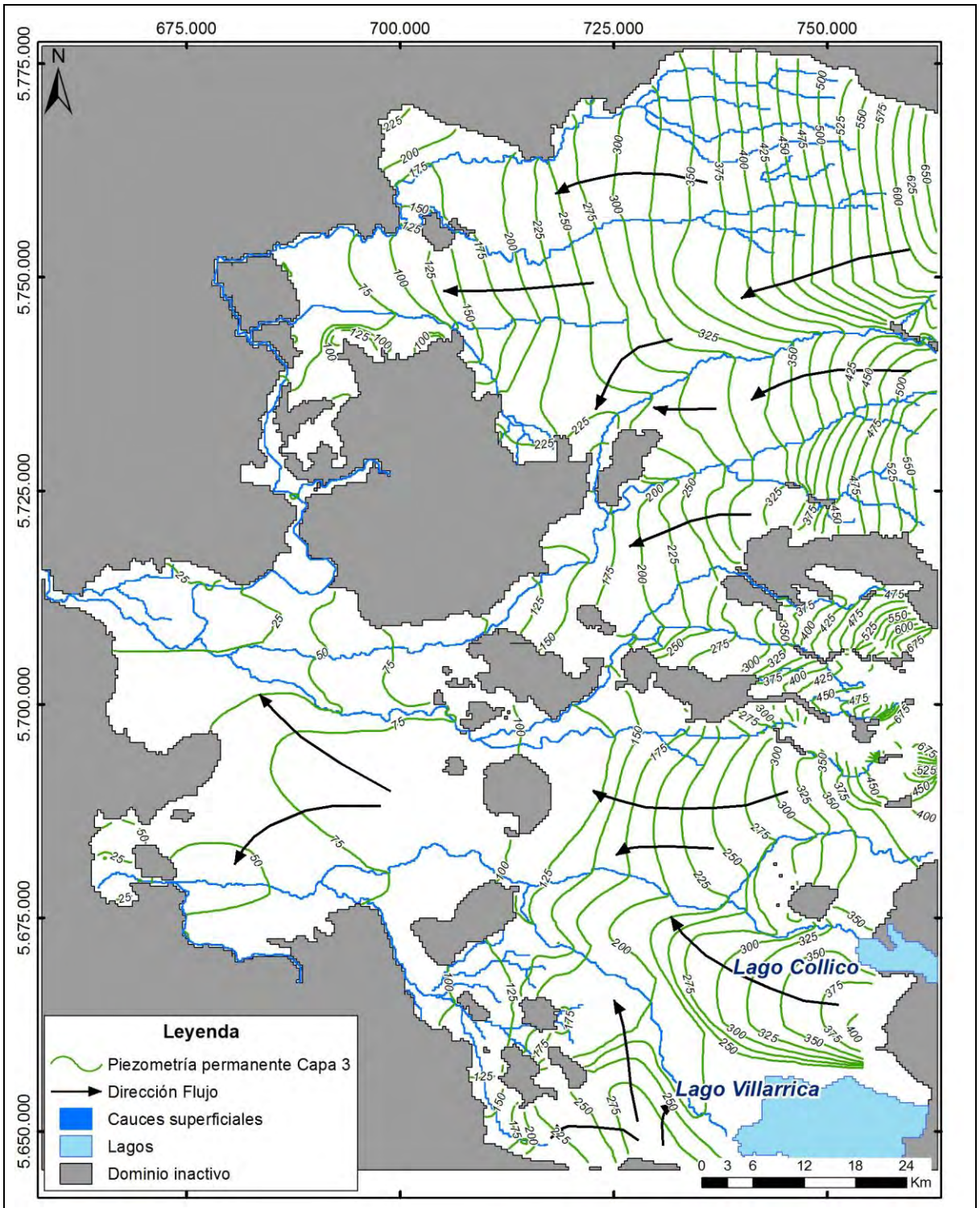


Figura 10-33: Piezometría en régimen permanente en la capa 3

Las direcciones de flujo se presentan perpendiculares a la piezometría, indicando las zonas de interacción entre río y acuífero. Un río es ganador (aumenta su caudal por aportaciones subterráneas) cuando las curvas piezométricas se presentan de forma convexa hacia la dirección del flujo (Figura 10-34). Por el contrario, un río es perdedor (aporta caudal al acuífero) cuando las curvas piezométricas se presentan de forma cóncava hacia la dirección del flujo (Figura 10-34).

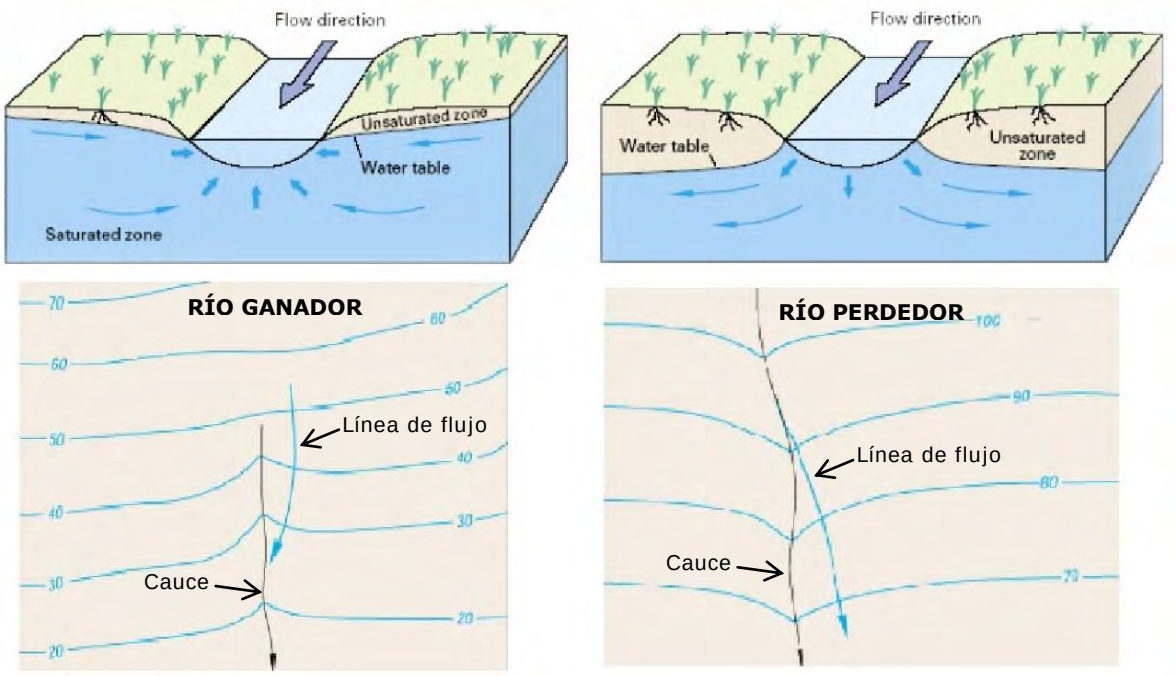


Figura 10-34: Esquema de relación río-acuífero (Tomado de Winter et al., 1998)

La relación río-acuífero puede ser variable a lo largo del curso del río y también puede variar a lo largo del tiempo, pudiendo un río ser perdedor en los periodos húmedos, cuando el nivel del río crece por encima del nivel piezométrico, y por el contrario ser ganador cuando el nivel del río se sitúa por debajo del nivel del acuífero en periodos secos.

Los cauces superficiales en las cuencas modeladas actúan principalmente como ríos ganadores, tal como puede observarse en la piezometría regional obtenida en la capa 1 (Figura 10-35). Este comportamiento se observa en el sector alto y bajo de la cuenca, mientras que en el sector central existen zonas donde el río cede agua al acuífero, actuando como río perdedor, tal como se muestra en la Figura 10-35.

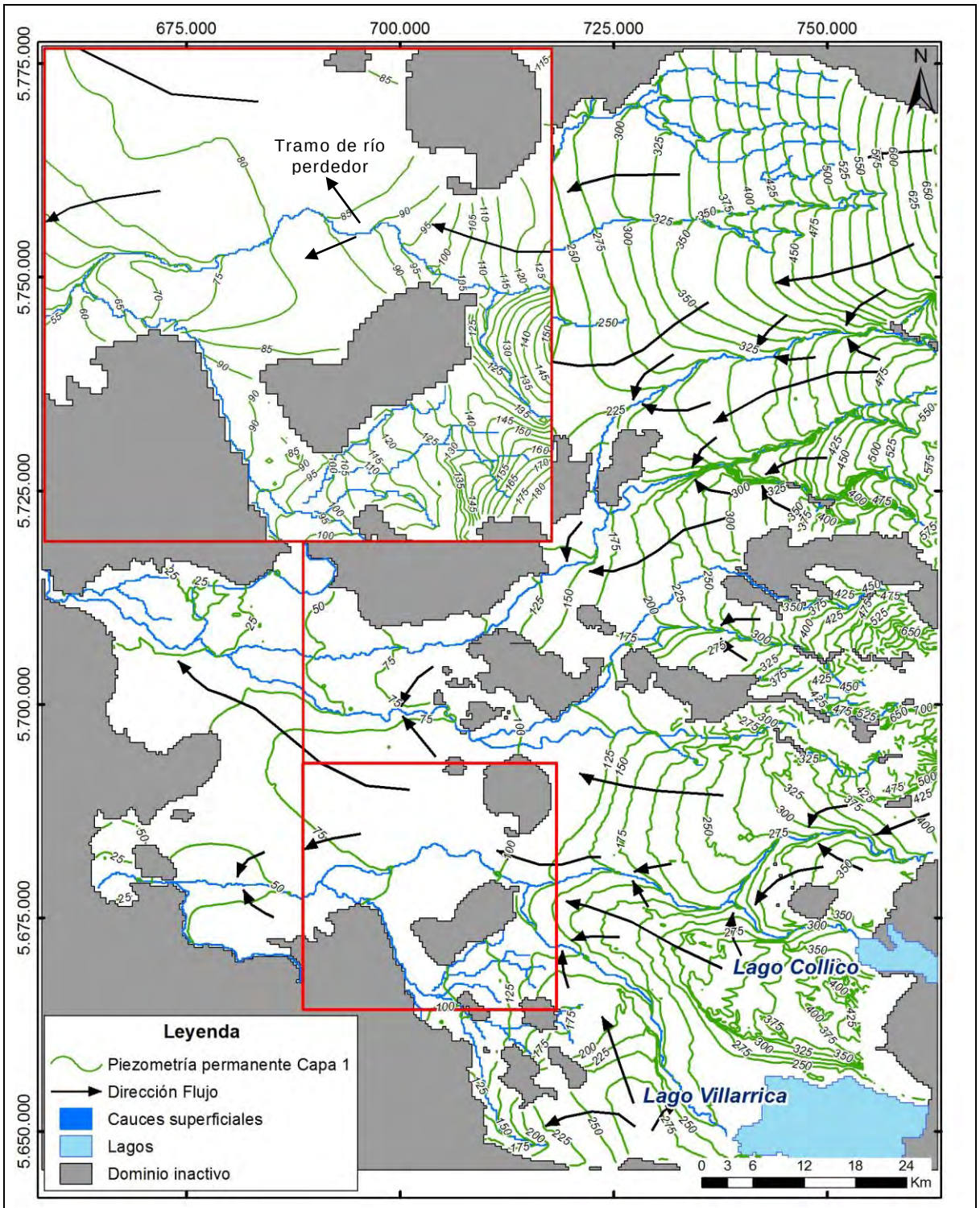


Figura 10-35: Piezometría en régimen permanente en el sector central del río Toltén en la capa 1

La conexión hidráulica obtenida en el modelo entre río y acuífero depende de varios factores, entre ellos el nivel piezométrico del acuífero y la topografía del río. Es por ello que tener una topografía detallada de las celdas de los cauces superficiales es indispensable para obtener esta conexión hidráulica con mayor exactitud. Con la modelación de las cuencas del río Toltén e Imperial se obtiene el comportamiento principal a nivel regional, indicando que los tramos altos y bajos de las cuencas presentan principalmente aporte de flujo hacia los ríos (pudiendo existir también sectores locales de aporte de flujo hacia el acuífero o de desconexión entre río y acuífero).

10.12 OPERACIÓN DEL MODELO

Tras la calibración del modelo en régimen permanente se ha obtenido la piezometría y el balance hídrico a partir del cual se realizan las simulaciones posteriores. Estas simulaciones tienen como objetivo la cuantificación de los caudales de extracción susceptibles de ser extraídos en función de los criterios exigidos para evaluar su sustentabilidad.

10.12.1 Coeficiente de Almacenamiento

Para la modelación en régimen transiente se ha definido una distribución espacial del coeficiente de almacenamiento, que en el caso de un acuífero libre, está definido por el S_y (*Specific Yield*).

El S_y es equivalente a la porosidad eficaz, la cual corresponde al volumen de agua drenada por gravedad en relación al volumen total, medida en porcentaje o en tanto por 1, y nos informa del volumen de agua que podemos obtener vaciando un medio poroso saturado.

La distribución espacial del S_y se ha definido en función de las zonas de conductividad hidráulica, asignando los mayores valores a las zonas que presentan una mayor permeabilidad, ya que no se dispone de información de pruebas de bombeo en las que se haya podido calcular el coeficiente de almacenamiento a partir de pozos de observación.

En acuíferos libres, el S_y, varía aproximadamente entre 3 y 35%. En la Tabla 10-10 se muestran los valores para materiales no consolidados.

Tabla 10-10. Valores de porosidad eficaz en materiales no consolidados (Johnson, 1967. Tomado de Custodio y Llamas, 1983)

Material	Porosidad eficaz (%)		
	Mínimo	Media	Máximo
Arcilla arenosa	3	7	12
Arena fina	10	21	28
Arena media	15	26	32
Arena gruesa	20	27	35
Arena con gravas	20	25	35
Grava fina	21	25	35
Grava media	13	23	26
Grava gruesa	12	22	26

En la Tabla 10-11 se muestra el rango de S_y considerado y los valores de S_y asignados en el modelo numérico en función de la conductividad hidráulica.

Tabla 10-11. Valores de S_y asignados en el modelo numérico

Conductividad hidráulica (m/día)	Rango S_y (%)	S_y asignado a los modelos
Mayor a 50	10-25	20
10-50	7-21	10
0,1-10	3-7	5
Menor o igual a 0,1	1-3	2

El Almacenamiento específico (*Specific Storage*) (S_s), es el volumen liberado por 1 m^3 de acuífero confinado al descender 1 m la superficie piezométrica. Por tanto, el S_s es igual al coeficiente de almacenamiento (S) dividido entre el espesor saturado:

$$S_s = S/\text{espesor saturado}$$

En acuíferos confinados el coeficiente de almacenamiento se encuentra generalmente entre 10^{-3} y 10^{-5}. Se ha asignado un valor de S_s de 10^{-5} constante para toda el área del modelo.

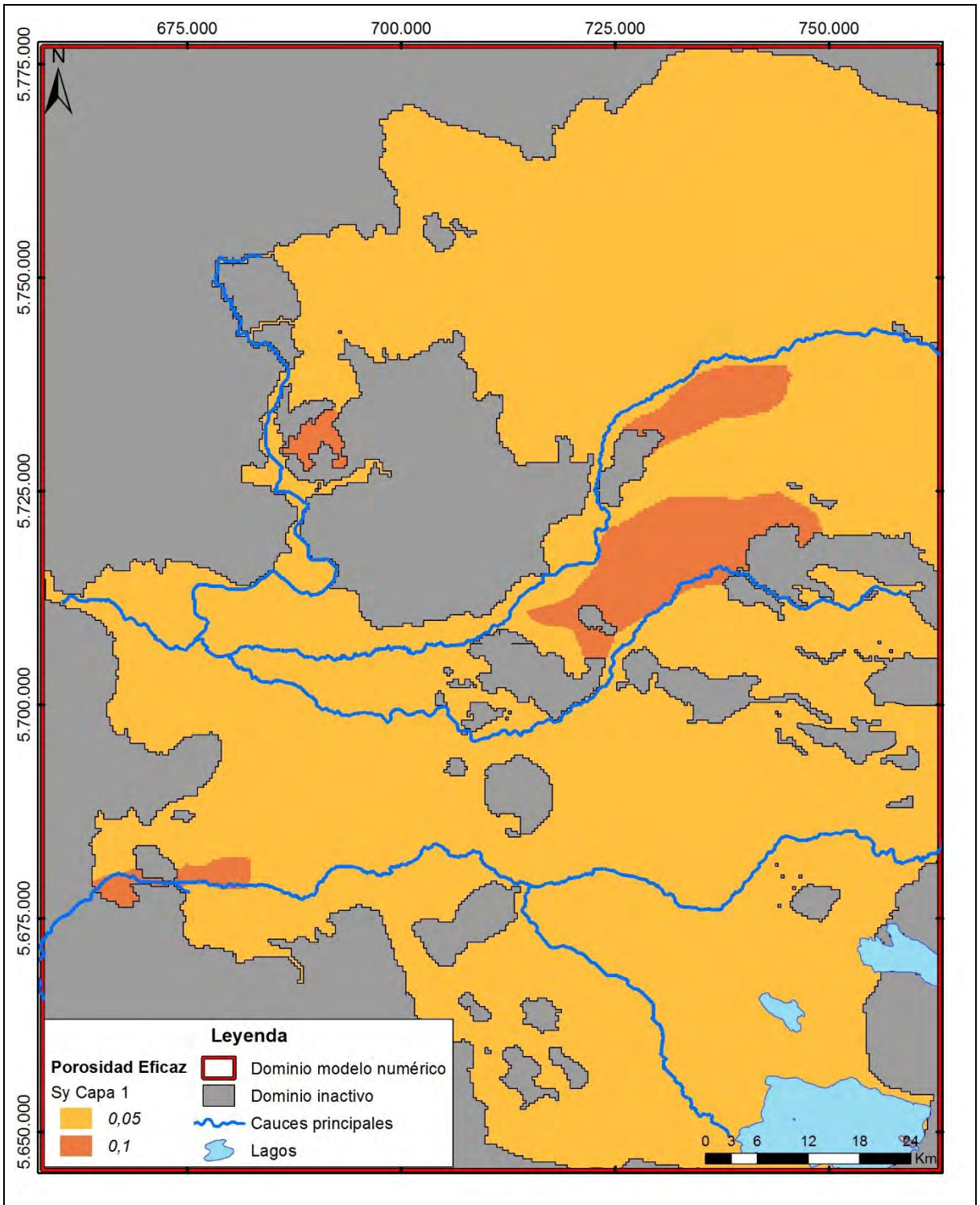


Figura 10-36: Distribución porosidad eficaz (*Specific Yield*) en la capa 1

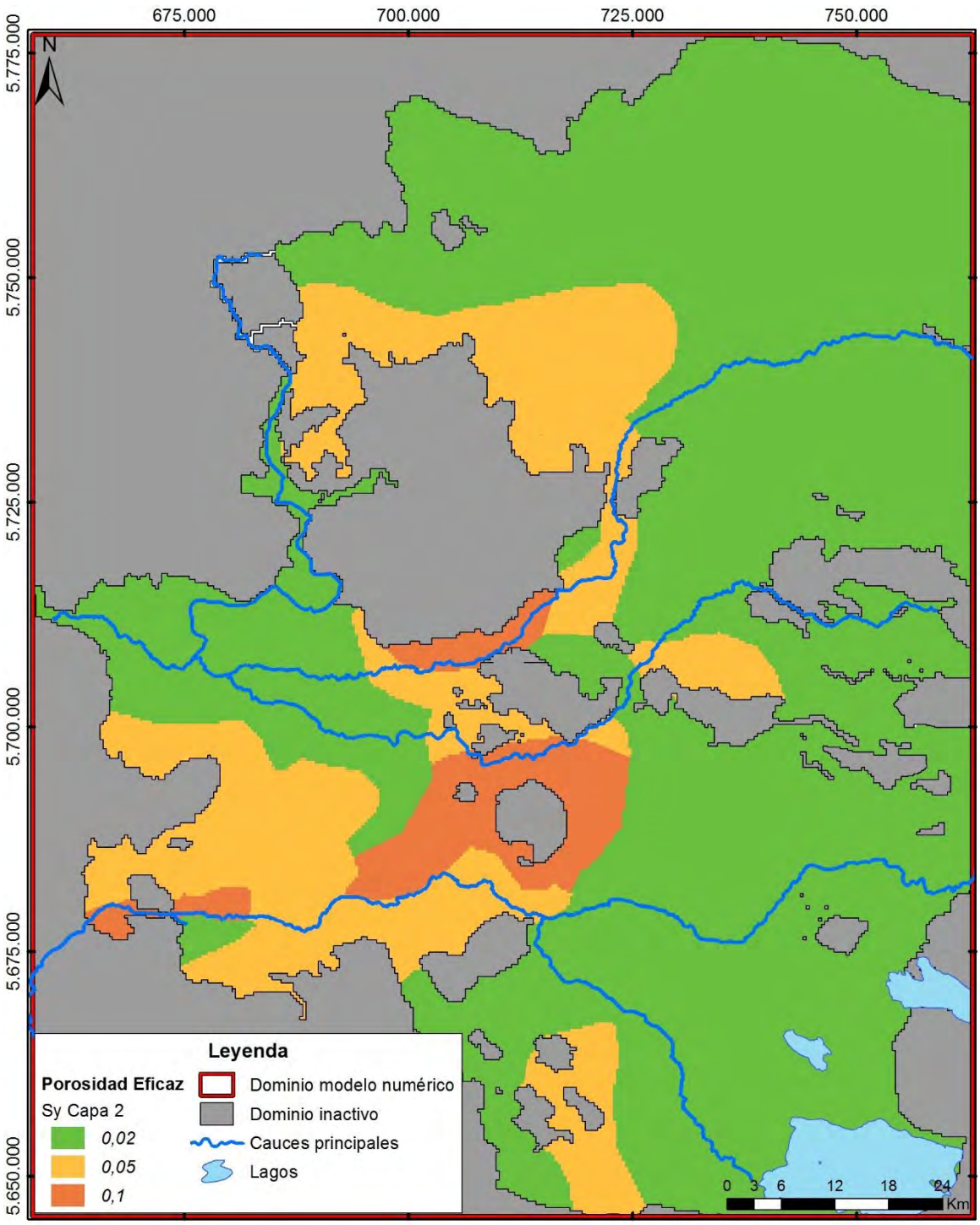


Figura 10-37: Distribución porosidad eficaz (*Specific Yield*) en la capa 2

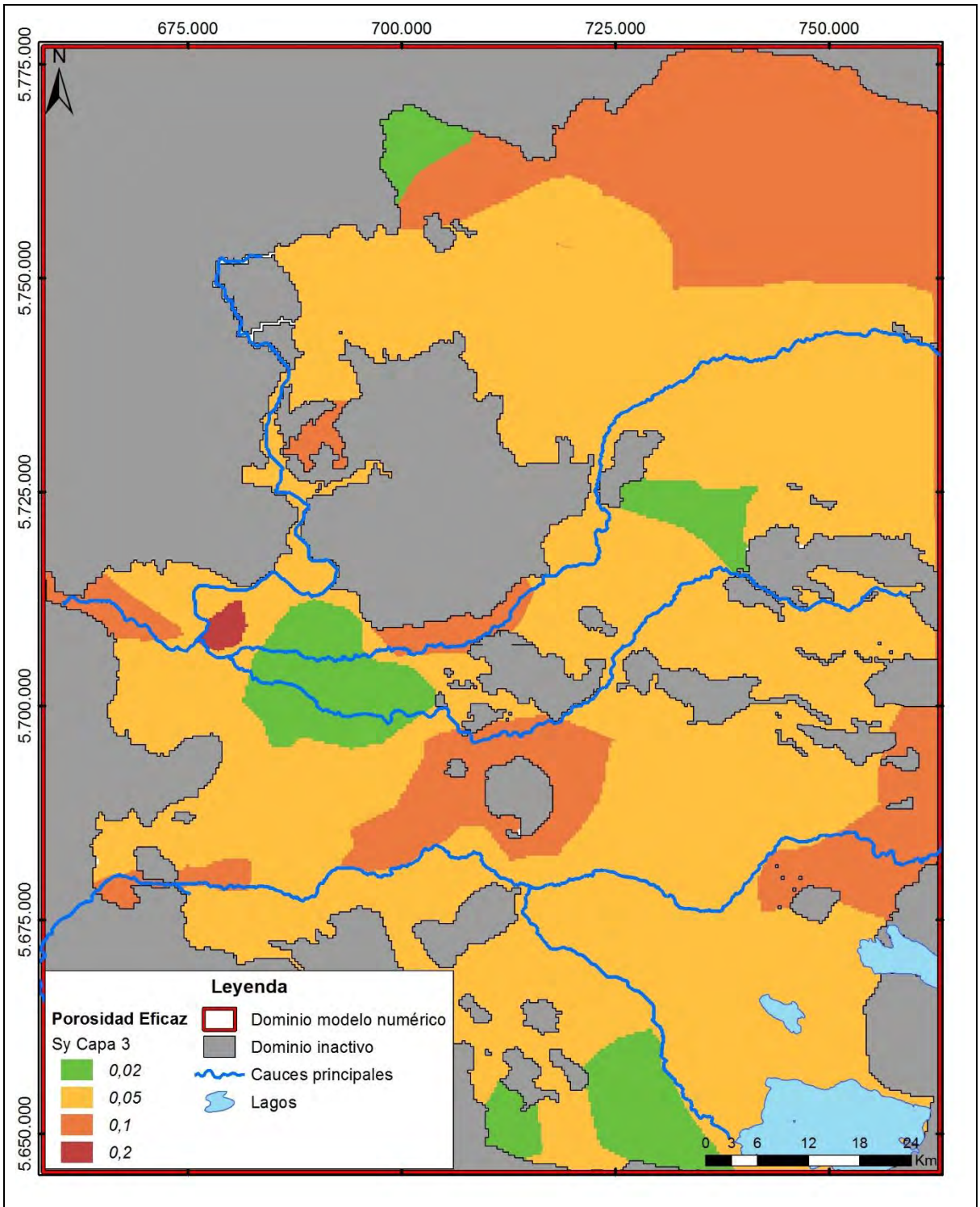


Figura 10-38: Distribución porosidad eficaz (*Specific Yield*) en la capa 3

10.12.2 Escenarios de Simulación

Los escenarios de simulación tienen como objetivo determinar el caudal máximo susceptible de ser otorgado en cuencas comprendidas por el modelo numérico (cuencas del río Imperial y del río Toltén). Estos escenarios presentan una discretización temporal anual, simulando 50 años de extracciones desde la actualidad. Los escenarios simulados presentan las siguientes características:

- 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.
- 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.
- 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. La definición de estos criterios y su análisis se incluyen en el capítulo 10.10. 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 del 50% respecto al Escenario 2.
  - Escenario 4: Presenta un aumento progresivo de caudal del 20% respecto al Escenario 2.

  Para evaluar los criterios que indicarán la sustentabilidad de las extracciones en cada uno de los escenarios simulados, se tomará como escenario base de referencia el Escenario 1, comparándolo con el resto de escenarios, en los que se incluyen pozos en trámite y pozos adicionales ficticios.

  Los pozos que extraen el aumento de caudal definido para cada simulación en los escenarios 3 y 4 se han ubicado en el modelo de manera homogénea en la superficie del área activa del modelo.

  El caudal asignado a los pozos ficticios incluidos en las simulaciones se ha basado en el caudal promedio de derechos otorgados en los pozos de agua potable, que es el tipo de uso mayoritario de la zona de estudio. Así, en el Escenario 3 se define el número de pozos adicionales necesarios para extraer el aumento de derechos, y en el siguiente escenario (Escenario 4), este caudal se aumenta o disminuye en los pozos en función de los resultados arrojados por el Escenario 3.

  El aumento de caudal se produce de forma gradual en el tiempo, aumentando progresivamente cada 10 años, de forma de alcanzar el caudal total adicional del escenario entre el año 41 y 50 del periodo de simulación.

  En cuanto a la asignación de la profundidad de los pozos ficticios, en el Escenario 3 se han incluido un 20% en el acuífero somero y un 80% en el acuífero profundo, ya que este último contiene el mayor volumen sustentable

de ser explotado. En el Escenario 4, y en vista de los resultados obtenidos en el Escenario 3, se han asignado todos los pozos ficticios al acuífero profundo.

- Escenario 5: Caudales obtenidos en el Escenario 4 (escenario óptimo de extracción) con hidrología histórica. Este escenario presenta una serie histórica de recarga superficial correspondiente a años de hidrología normal y años secos. Para el cálculo de la tasa de recarga aplicada a las zonas definidas en el modelo, se ha tomado una serie histórica desde el año 1991 hasta el año 2012 (periodo con datos para ambas cuencas), y se han reemplazado los años húmedos (1992, 1993, 1997, 2000, 2005, 2006 y 2009) por la serie anual del año 2004 (año con hidrología normal). La serie resultante se ha repetido hasta completar los 50 años del periodo de simulación. La recarga promedio resultante es de 1,74E-4 m/día (promedio del valor medio calculado para cada zona de recarga), mientras que la recarga promedio del resto de escenarios es de 2,12E-4 m/día. 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 10-12 se indican los caudales de extracción asignados a ambas cuencas en los escenarios de simulación.

Tabla 10-12. Caudales de extracción en los escenarios simulados

ESCENARIO	Caudal de extracción en la cuenca del río Imperial	Caudal de extracción en la cuenca del 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

10.12.3 Criterios para la Evaluación de Sustentabilidad de Escenarios

Para evaluar el caudal de extracción máximo sustentable por cuenca se han analizado los escenarios de simulación en base a los siguientes cuatro criterios, de forma que para determinar si el caudal de un escenario es sustentable, se han de cumplir los cuatro. Estos criterios han de cumplirse independientemente para cada una de las cuencas (Imperial y Toltén).

- Criterio 1: Descensos sostenibles en el tiempo a nivel de acuífero.

Los descensos deben estar estabilizados para una operación de 50 años del sistema. Esta estabilización de niveles debe ser respaldada por una recarga suficiente que ingresa al volumen de control (recarga superficial, infiltración desde el río, etc.).

Para evaluar este criterio en las simulaciones, se parte del volumen embalsado en los modelos realizados en régimen permanente, al cual se le resta la pérdida de almacenamiento (producto de las salidas de flujo del sistema acuífero) en los diferentes escenarios transientes simulados, con el fin de comprobar que los descensos en el volumen almacenado no sean superiores al 5% en un plazo de 50 años.

El volumen embalsado se ha obtenido mediante el sumatorio del volumen contenido en cada celda activa del modelo, a través de los datos de espesor saturado (altura piezométrica menos la cota del fondo de la celda), dimensiones de cada celda del modelo y el coeficiente de almacenamiento (S_y), de tal forma de obtener el volumen total de agua en el acuífero.

$$\text{Volumen celda} = \text{Dimensiones celda} \times \text{Espesor saturado} \times S_y$$

En la Tabla 10-13 se muestra el volumen embalsado inicial por cuenca, el cual no debe reducirse en más de un 5% en las posteriores simulaciones.

Tabla 10-13. Volumen embalsado

CUENCA	VOLUMEN EMBALSADO (Mill. m^3)
Imperial	84.321,3
Toltén	35.399,7
Total	119.720,9

En la Tabla 10-14 y la Tabla 10-15 se muestran, respectivamente, los resultados del volumen obtenido en el modelo numérico en las cuencas del río Imperial y el río Toltén para el escenario base (Escenario 1) y el resto de simulaciones. Los resultados de variación del volumen embalsado indican para ambas cuencas que no se supera una reducción del 5% en ninguno de los escenarios.

Tabla 10-14. Diferencia de volumen embalsado en la cuenca del río Imperial

ESCENARIO	CUENCA DEL RÍO IMPERIAL			
	Volumen inicial (Mill. de m^3)	Diferencia de almacenamiento (Mill. de m^3)	Volumen final escenario (Mill. de m^3)	%Reducción
E1 (BASE)	84.321,29	286,36	84.034,92	0,34%
E2	84.321,29	338,33	83.982,96	0,40%
E3	84.321,29	998,17	83.323,12	1,18%
E4	84.321,29	623,30	83.697,98	0,74%
E5	84.321,29	1.053,75	83.267,54	1,25%

Tabla 10-15. Diferencia de volumen embalsado en la cuenca del río Toltén

ESCENARIO	CUENCA DEL RÍO TOLTÉN			
	Volumen inicial (Mill. de m^3)	Diferencia de almacenamiento (Mill. de m^3)	Volumen final escenario (Mill. de m^3)	%Reducción
E1 (BASE)	35.399,66	164,44	35.235,22	0,46%
E2	35.399,66	199,10	35.200,56	0,56%
E3	35.399,66	498,04	34.901,62	1,41%
E4	35.399,66	327,50	35.072,16	0,93%
E5	35.399,66	678,44	34.721,22	1,92%

- 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, evaluados como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

Para la evaluación de este criterio se han calculado los caudales netos de salida desde el acuífero hacia los cauces superficiales para cada cuenca (Balance neto del escenario). Este valor se ha comparado con el obtenido en el Escenario 1 (Balance neto inicial), que corresponde al escenario base.

Los caudales netos de intercambio hídrico hacia los ríos no deben reducirse en las simulaciones más de un 10% del valor obtenido en el Escenario 1. Este valor neto inicial corresponde a la salida de caudal en el modelo hacia los cauces superficiales tras los 50 años de modelación transiente del Escenario 1, y es de 20,57 m^3/s.

En la Tabla 10-16 se muestran los resultados de balance neto de los cauces superficiales, donde se indica el caudal de salida hacia los ríos en los escenarios tras las simulaciones a 50 años.

Tabla 10-16. Caudal de salida hacia los cauces superficiales en los escenarios simulados

ESCENARIO	CUENCA DEL RÍO IMPERIAL			CUENCA DEL RÍO TOLTÉN		
	Balance neto inicial (m^3/s)	Balance neto escenario (m^3/s)	% Reducción	Balance neto inicial (m^3/s)	Balance neto escenario (m^3/s)	% Reducción
E2	20,57	20,18	1,93%	6,39	6,20	2,93%
E3	20,57	17.81	13,42%	6,39	5,06	20,77%
E4	20,57	19,10	7,19%	6,39	5,72	10,48%
E5	20,57	17,00	17,35%	6,39	4,40	31,13%

Los resultados indican que el aumento del 50% de caudal en el Escenario 3 produce una reducción mayor al 10% en ambas cuencas, mientras que el Escenario 4, con un

aumento del 20% en las extracciones, produce una reducción de aproximadamente el 7% en la cuenca del río Imperial y en torno al 10% en la cuenca del río Toltén.

El Escenario 5, que presenta una serie de recarga superficial correspondiente a una serie histórica de años normales y secos, disminuye notablemente el caudal de salida desde el acuífero a los ríos. Esto está influenciado en mayor medida por el descenso de la recarga, ya que el flujo de ingreso disponible para el aporte hacia los ríos disminuye, y por tanto esto se ve reflejado en el balance hídrico del sector.

El análisis de este criterio, al igual que el resto, se ha realizado a nivel de cuenca (Toltén e Imperial). La realización de un análisis del cumplimiento de este criterio requiere la delimitación de sectores de interés en las cuencas del sector.

- 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.

Para evaluar este criterio, se toma un escenario de referencia (escenario base), a partir del cual se analizará el caudal adicional asumido por los escenarios simulados. Así, las extracciones asumidas por este escenario, corresponden al caudal inicial a partir del cual se calcularán los porcentajes de caudal adicional asumidos por el resto de escenarios. La Tabla 10-17 muestra los porcentajes calculados.

Tabla 10-17. Porcentaje de extracciones asumidas por el modelo numérico en comparación con el escenario base

ESCENARIO	PORCENTAJE DE EXTRACCIONES ASUMIDAS POR EL MODELO	
	Cuenca del río Imperial (%)	Cuenca del río Toltén (%)
E2	97,16	95,52
E3	90,80	88,55
E4	95,85	93,02
E5	94,65	88,92

Los resultados indican que tras el aumento de caudal el Escenario 3 presenta un porcentaje de extracciones asumidas por el modelo que no alcanza el 95%. El Escenario 4 logra extraer más del 95% de las mismas en la cuenca del río Imperial, y un 93% en la cuenca del río Toltén. Si bien este último valor no alcanza el 95%, cabe destacar que el escenario base extrae un 95,5% en esta cuenca, por lo que el aumento en las extracciones de este escenario produce un descenso del caudal asumido por el modelo de solamente el 2,5%.

En el Escenario 5 las extracciones asumidas por el modelo disminuyen en un 1,2% respecto al escenario 4 para la cuenca del río Imperial, mientras que en la cuenca del río Toltén, disminuyen en un 4,1%.

- 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.

El análisis de este criterio se realiza mediante la obtención del número de pozos que no logran extraer el caudal asignado debido a descensos del espesor saturado y que, por tanto, al final de la simulación presentan un caudal de extracción igual a cero. Los modelos numéricos presentan una opción de simulación de pozos de bombeo en la que cuando el pozo no es capaz de extraer todo el caudal, MODFLOW lo reduce automáticamente hasta un valor que es posible extraer por el pozo de bombeo, o bien, si el nivel disminuye bajo la profundidad del pozo, el pozo deja de extraer caudal, siendo este último caso el que se evalúa para identificar los pozos que se secan y cuyo caudal asignado no es sustentable.

Para el cálculo del porcentaje de pozos que dejan de extraer caudal en el escenario de simulación, se obtienen en primer lugar los pozos con caudal igual a cero en el escenario base (Escenario 1). Los pozos adicionales a éstos que presenten un caudal nulo en el escenario de simulación, representan el porcentaje de pozos que no debe superar el 5% del total de pozos que no se secan en el Escenario 1, y que son 392 pozos en la cuenca del río Imperial, y 987 en la cuenca del río Toltén.

En la Tabla 10-18 se muestra el número y porcentaje de pozos que se secan en los escenarios simulados.

Tabla 10-18. Porcentaje de pozos secos en los escenarios simulados

ESCENARIO	CUENCA DEL RÍO IMPERIAL			CUENCA DEL RÍO TOLTÉN		
	Pozos sin reducción de caudal en Escenario Base	Pozos adicionales con reducción de caudal en Escenario de simulación	% de pozos con caudal reducido	Pozos sin reducción de caudal en Escenario Base	Pozos adicionales con reducción de caudal en Escenario de simulación	% de pozos con caudal reducido
E2	392	16	4,1%	987	8	0,8%
E3	392	79	20,2%	987	56	5,7%
E4	392	23	5,9%	987	22	2,2%
E5	392	46	11,7%	987	56	5,7%

El porcentaje de pozos secos es inferior al 5% para el Escenario 2. Sin embargo en el Escenario 3, que muestra un aumento del 50% en las extracciones, el porcentaje de pozos secos aumenta hasta un 20,2% en la cuenca del río Imperial, y un 5,7% en la cuenca del río Toltén. Cabe destacar que los pozos que se secan corresponden en su gran mayoría a pozos someros. Para el Escenario 4 se consigue reducir el número de pozos secos en un 5,9% para la cuenca del río Imperial y un 2,2% para la cuenca del río Toltén.

En el Escenario 5 aumenta el número de pozos a un 11,7% en la cuenca del río Imperial y a un 5,7% en la cuenca del río Toltén. Este aumento es debido a la reducción de la recarga en la simulación. Sin embargo, el análisis de los pozos que se secan en este escenario refleja que, al igual que en los escenarios anteriores, los pozos que dejan de extraer caudal corresponden con pozos someros, ya que en la cuenca del río Imperial todos los pozos que se secan se encuentran en la capa 1 del modelo numérico (acuífero somero), y en la cuenca del río Imperial solamente 3 pozos secos se encuentran en el acuífero profundo, mientras que el resto se localizan en el acuífero somero.

10.12.4 Caudal Óptimo Sustentable

Tras el análisis de los resultados obtenidos en los escenarios realizados, se ha determinado los caudales sustentables para las cuencas del sector de estudio, los cuales se indican en la Tabla 10-19.

Tabla 10-19. Caudales óptimos de extracción

CUENCA DEL RÍO IMPERIAL			CUENCA DEL RÍO TOLTÉN		
ESCENARIO	CAUDAL ÓPTIMO		ESCENARIO	CAUDAL ÓPTIMO	
	L/s	Mill de m^3/año		L/s	Mill de m^3/año
E4	9.420,3	297,08	4	3.481,1	109,78

Si comparamos el caudal óptimo de extracción en cada cuenca con el caudal del Escenario 2, que presenta las extracciones correspondientes a los derechos otorgados y en trámite, obtenemos el caudal adicional susceptible de ser otorgado. En la Tabla 10-20 se indica este caudal en L/s y en millones de metros cúbicos por año.

Tabla 10-20. Caudal adicional susceptible de ser otorgado

CUENCA DEL RÍO IMPERIAL			CUENCA DEL RÍO TOLTÉN		
ESCENARIO	CAUDAL ÓPTIMO		ESCENARIO	CAUDAL ÓPTIMO	
	L/s	Mill de m^3/año		L/s	Mill de m^3/año
E4	1.570	49,51	4	580,1	18,29

10.13 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El modelo numérico está formado por parte de las cuencas del río Imperial y el río Toltén que incluyen las zonas de relleno formadas por la UH-1 (Depósitos no consolidados actuales), UH-2 (Depósitos no consolidados antiguos) y UH-3 (Depósitos volcano-sedimentarios).

Se ha subdividido el modelo en tres capas con el fin de modelar las piezometrías de los dos acuíferos presentes en el sector según la información de niveles, la cual muestra que en determinados sectores existen diferencias del nivel 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.

Tras la calibración del modelo la conductividad hidráulica en la capa 1 oscila entre un rango de 0,125 y 25 m/día, en la capa 2 entre 0,01 y 25 m/día, y en la capa 3 oscila entre 0,1 y 100 m/día.

Las condiciones de borde están formadas por una cota de nivel constante en el sector Este, Sur y Norte del modelo, por los cauces superficiales, los lagos Villarrica y Collico y la recarga superficial en función de las zonas de recarga definidas en el estudio hidrológico.

El ajuste del modelo cumple los criterios sugeridos por SEA (2012), con un error de balance de masas bastante inferior a 1%.

El aporte lateral subterráneo hacia el acuífero es de 15,18 m^3/s, el cual está formado por la entrada de flujo desde el límite Este y desde el sector Sur y los lagos Villarrica y Collico.

El intercambio neto entre el acuífero y el río indica que existe un flujo de descarga hacia el río de 30,37 m^3/s, el cual se estima como el valor neto de los tramos asignados (*river* y *drain*) a los ríos Imperial y Toltén.

La recarga superficial total es de 19,54 m^3/s, que está formada por la infiltración asignada en las distintas zona de recarga y los pozos de inyección en el sector de la cordillera de la costa.

A partir de la modelación en régimen permanente se han realizado cinco escenarios en régimen transiente con un periodo de simulación de 50 años, en los cuales se aumentarán los caudales de bombeo en el sector para evaluar los derechos de agua subterránea susceptibles de ser otorgados. Estas simulaciones evalúan el caudal de extracción máximo sustentable en base al cumplimiento de los cuatro criterios exigidos.

Los resultados de las simulaciones indican un caudal óptimo susceptible de ser otorgado de 1.570 L/s (49,51 MM m^3/año) para la cuenca del río Imperial, y de 580,1 L/s (18,29 MM m^3/año) para la cuenca del río Toltén.

Cabe destacar que el escenario de caudales óptimos presenta los pozos adicionales en la capa 3 (acuífero profundo), ya que los pozos situados en la capa 1 presentan una mayor tendencia a secarse tras la simulación de escenarios a 50 años, por lo que se alcanza más fácilmente el criterio de afectación a pozos de terceros y el caudal asumido por el modelo. Por tanto, el acuífero profundo tiene una mayor capacidad de extracción de nuevos derechos.

Se ha realizado un escenario con cambios en la recarga superficial (Escenario 5), el cual presenta una tasa de recarga correspondiente a una serie hidrológica histórica, en la cual se han reemplazado los años húmedos por años con hidrología normal. Los resultados de este escenario indican un aumento en los pozos que reducen el caudal de extracción y un menor caudal de salida hacia los cauces superficiales. Debido a esto los pozos someros son los que presentan una mayor influencia de esta variable, produciéndose un aumento de los pozos secos principalmente en la capa 1 del modelo (acuífero somero).

En cuanto a la calibración y limitaciones del modelo numérico, se destaca que el acuífero somero presenta un espesor muy inferior al acuífero profundo, ya que el primero presenta un espesor de 20 m. Debido a esto, la calibración de ambos acuíferos en determinados sectores donde los niveles de ambos difieren, presenta una mayor dificultad de ajuste, ya que la información de conductividad hidráulica y la distribución de las distintas unidades hidrogeológicas que forman las capas del modelo (acuíferos y acuitardo), permiten una extensión limitada de esta información a todo el dominio del modelo. No obstante, los resultados obtenidos para ambos acuíferos son satisfactorios y los estadígrafos de calibración muestran un ajuste razonable.

11 RESULTADOS TERCER TALLER INFORMATIVO

La presente entrega corresponde a la sistematización, evaluación y análisis de la tercera ronda de talleres informativos realizados los días 04-05-06 y 07 de agosto del año 2015 en la Región de La Araucanía. Estos talleres se realizan para presentar los avances del Estudio Hidrogeológico de la Región y buscan recoger las consultas de los asistentes y esclarecer las dudas en torno al estudio.

Para el desarrollo de estos Talleres, se invitó a participar a todas aquellas comunas que dependen de las cuencas de los ríos Toltén, Imperial y cuencas costeras de la Región, y se definieron 4 zonas para realizarlos, en consideración de que serían puntos centrales para los convocados. Las cuatro comunas serían: Villarrica (Curarrehue, Gorbea, Loncoche, Pitrufquén, Pucón), Temuco (Chol − Chol, Cunco, Freire, Galvarino. Lautaro, Melipeuco, Padre de Las Casas, Perquenco, Vilcún), Carahue (Nueva Imperial, Puerto Saavedra, Toltén, Teodoro Schmidt).Victoria (Curacutín, Los Sauces, Lumaco, Purén, Traiguen).

Cabe destacar que las actividades realizadas de la IX región de La Araucanía, se desarrollaron en un contexto de sensibilidad relacionada por un lado por los temas de agua, los cuales en el último tiempo se ha considerado como una preocupación por su creciente escasez y por otro lado, ésta región se destaca por su alto componente indígena, en particular por el Pueblo Mapuche lo que para fines de este proceso se abordará según los lineamiento de la legislación nacional.

11.1 OBJETIVO

El objetivo de estos talleres es informar, recoger y/o validar información con grupos representativos de la comunidad, los avances del Estudio Hidrogeológico realizados hasta la fecha. Además de levantar las inquietudes de la comunidad, y en la medida de lo posible incluir en el desarrollo del estudio.

La información recabada y su análisis ayudarían a la elaboración del instrumento de gestión del recurso hídrico.

11.2 METODOLOGÍA DE LOS TALLERES INFORMATIVOS

A continuación se presenta la metodología de los cuatro talleres realizados durante agosto del 2015.

Estos cuatro talleres fueron fue realizados por dos profesionales de Arcadis, para las reuniones de Villarrica y Temuco, y de un profesional durante los talles de Carahue y Victoria.

En cuanto la selección de actores se convocó a los usuarios del recurso hídrico de la zona de estudio, entre ellos los Comités de Agua Potable Rural y los beneficiarios de obras de riego y drenaje y dueños de derechos de agua. Por otro lado, la Intendencia de la Región de La Araucanía cuenta con un Protocolo Regional, el que contiene una nómina de autoridades, servicios, direcciones y consejeros regionales e instituciones que debiesen ser invitadas a las actividades de difusión de sus proyectos, a las cuales se convocó por medio telefónico y correo electrónico. Además se les envío una

invitación personalizada, vía correo certificado, al Intendente de la región de La Araucanía, al Gobernador de la Provincia de Cautín y de Malleco, y a los respectivos alcaldes de cada una de las comunas.

La convocatoria fue reforzada en terreno durante la semana del 27 al 31 de julio por medio de la entrega de invitaciones a los encargados del Programa de Desarrollo Local (en adelante PRODESAL) de 22 comunas, con el objetivo de que estos puedan invitar a una mayor cantidad de personas que pudiesen estar interesados en el estudio, así como también a funcionarios de los equipos técnicos de las municipalidades. A los prodesales de las 5 comunas restantes (Toltén, Puerto Saavedra, Vilcún, Cunco y Milipeuco) previo aviso vía correo electrónico, se les envío 15 invitaciones a cada uno con el mismo objetivo. Estos servicios no fueron visitados personalmente por la distancia que implicaba acudir a esas comunas, optando en tanto por asistir a una mayor cantidad de comunas. Cabe destacar que la cantidad de invitaciones entregadas a cada uno de los servicios que colaboraron con la difusión, fue estimada por estos mismos.

A los cuatro talleres realizados, asistió, en representación de la DGA, la Señora Vivianne Fernandez, Directora Regional de la Dirección de General de Aguas, quien además reforzó la convocatoria por medio del envío de correos electrónicos a las autoridades regionales.

En relación a los temas abordados en los talleres, primero se presentaron las distintas etapas que abordaron el estudio, el modelo hidrogeológico elaborado, los distintos tipos de mediciones que éste realiza y algunos resultados preliminares respecto a las características territoriales de la región.

Por último, como soporte de registro visual se utilizó la cámara fotográfica, el cuaderno de campo y la grabación de audio, de manera de registrar todos aquellos temas que se abordaron durante los talleres.

11.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

Los talleres informativos realizados en las comunas de Villarrica, Temuco, Carahue y Victoria, se realizaron con el objetivo de dar a conocer, a los diversos actores locales, pertenecientes a las comunas aledañas a las cuencas de los ríos Toltén, Imperial y cuencas costeras de la Región, los avances del Estudio Hidrogeológico de la Región de La Araucanía.

Como evaluación final, y analizando la convocatoria en cada uno de los talleres, los resultados de las encuestas de evaluación, las observaciones, preguntas y comentarios realizados en la actividad, se concluye que se cumplieron los objetivos de informar sobre el Estudio, asumir observaciones, y de dar respuestas a las inquietudes de la población en torno a éste.

Con el fin de mejorar algunos aspectos para el próximo y último taller de participación ciudadana, se establecen las siguientes recomendaciones y consideraciones.

Respecto a la logística, los establecimientos escogidos según la encuesta fueron bien evaluados, sin embargo es importante seguir precisando y mejorando algunos aspectos, como por ejemplo la disponibilidad de sillas y asegurar un espacio amplio para el próximo taller en Temuco, y una mayor calefacción para el taller de Victoria.

En cuanto a la convocatoria, la participación de la población en cada uno de los talleres superó con creces el promedio de personas que generalmente asiste a este tipo de actividad, la cual bordea un total de 40 asistentes. Si bien en Victoria se registró una participación que bordea ese promedio, éste fue más bajo en comparación a los otros talleres, lo que desafía a la consultora en la próxima convocatoria, a invertir mayores esfuerzos en terreno a la hora de entregar invitaciones, y alcanzar una mayor cobertura en los llamados telefónicos. Así también para el caso de habitantes de aquellos sectores donde se registró una baja participación, como Toltén, Teodoro Schmidt, Melipeuco y Curarrehue porque no existe un fácil acceso, se propenderá a asegurar locomoción.

Uno de los aspectos más cuestionados, principalmente en los talleres de Temuco y Carahue, fue la presentación realizada para exponer los avances del estudio. La mayoría de las observaciones y sugerencias apuntaron hacia éste ámbito; la de simplificar la presentación en un lenguaje menos técnico, y mejorar el power point por medio de elementos más didácticos, con una menor presencia de gráficos y mapas. Las encuestas de evaluación reflejaron la importancia de mejorar éste aspecto. La clasificación de los asistentes de Carahue a la actividad como "regular" fue mediada por las amplias críticas a la presentación. A diferencia de Victoria donde la presentación fue mejorada por el especialista de ARCADIS y calificada posteriormente como buena y entendible.

Es por lo anterior que para el próximo taller, de los resultados finales, la presentación será previamente practicada y revisada junto al equipo social de ARCADIS, con el fin de propender a la utilización de un lenguaje simple, con un power point comprensible que contenga una menor cantidad de láminas, una mayor cantidad de imágenes que sean claras y auto explicativas. El power point de éste último taller, así como un resumen de las etapas del estudio, será impreso y entregado a cada una de las personas que asistan.

Por último, dentro de las consultas e inquietudes más frecuentes están las relacionadas a que si la información que se levanta servirá para uso local de las APR y si ésta estará disponible a la ciudadanía. Si bien una vez finalizado el estudio éste presentará los principales resultados en la página web y podría ser otorgado completamente previa solicitud, se recomienda entregar una copia del estudio en CD o en un formato comprensible a cada uno de los PRODESALES o departamentos de desarrollo rural de las comunas involucradas, con el objetivo de que las comunidades puedan acceder a ello sin mayor inconvenientes, considerando además que muchas de ellas son adultos mayores y no cuentan con acceso a internet.

11.4 CUARTO Y ÚLTIMO TALLER

El cuarto y último taller se realizará entre los meses de agosto y septiembre de 2016.

12 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El estudio hidrogeológico de la Región de La Araucanía corresponde al primer esfuerzo del Gobierno Regional por caracterizar los principales acuíferos de la región, con la finalidad de establecer un adecuado nivel de entendimiento de su funcionamiento y generar herramientas (modelo) que permitan el análisis de diferentes escenarios de explotación de los recursos hídricos, junto a la recopilación, levantamiento y sistematización de una gran cantidad de información que facilitará en el futuro el análisis de situaciones particulares y la toma de decisiones en el ámbito de la administración de los recursos hídricos, a nivel regional, por parte de la autoridad.

En particular se han estudiado los sistemas acuíferos que conforman las cuencas del río Toltén e Imperial y las cuencas costeras de la región (Río Budi, río Queule y cuencas costeras entre Río Budi y Río Toltén). Entre otros aspectos, se caracterizó y/o estableció la geometría de las principales unidades hidrogeológicas, las propiedades hidráulicas de los acuíferos, la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, y los derechos y usos de las agua subterráneas. Para complementar la información bibliográfica disponible se realizaron campañas de exploración hidrogeológica que incluyeron prospecciones geofísicas, pozos de exploración, pruebas de bombeo, muestreo hidroquímicos, catastro de terreno y levantamientos geológicos.

En función de la conceptualización realizada, se confeccionó un modelo numérico que permite representar el sistema hidrogeológico regional y por ende, constituye una valiosa herramienta de apoyo que permitirá una mejor gestión de los recursos hídricos de la región. Con este modelo se han simulado diversos escenarios de disponibilidad y/o uso del recurso hídrico subterráneo.

El desarrollo del estudio permitió la ejecución de todas las actividades definidas como parte de los alcances del estudio, cumpliéndose a cabalidad con los objetivos planteados. A continuación se resumen las principales actividades realizadas y los resultados obtenidos:

Recopilación de Antecedentes: Esta actividad incluyó la recopilación y análisis de antecedentes, realizándose como parte de ella las visitas de reconocimiento general del área de estudio. Se revisaron en detalle 44 estudios disponibles en la región, los que permitieron entender las principales características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de las cuencas en estudio.

Sistematización Demandas y Usos: Esta actividad incluyó el catastro de más de 3.000 captaciones subterráneas y la sistematización de la información de derechos y usos de los mismos, recopilándose información tanto de niveles como de calidad de aguas de un total de 2.569 captaciones. El uso principal de los recursos subterráneos de la región corresponde a agua para Consumo Humano y Animal (55%), agua para Riego (33%), aguas para Uso Industrial (10%) y agua para Otros Usos (2%). En lo que respecta a 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.

Levantamiento de Información: Esta actividad incluyó una caracterización hidrológica, geológica, geofísica (gravimetría y TEM), hidroquímica (muestreo y análisis de aguas superficiales y subterráneas) e hidrogeológica del área, definiéndose con esta información los acuíferos principales y sus características, así como su relación con los cursos superficiales. Asimismo, se realizó la perforación de tres sondajes de exploración en los sectores de Padre Las Casas, Freire y Nueva Imperial. Adicionalmente, se ejecutó un total de 25 pruebas de bombeo, tanto en pozos existentes como en los pozos nuevos perforados.

La caracterización hidrológica consistió en la recopilación y análisis de la estadística de interés (Pluviometría, Fluviometría, Evaporación y Temperaturas), generándose más de 30 años de información estadística en la región. En lo que respecta a la pluviometría, se recopilaron datos de más de 47 estaciones, mientras que en el caso de estaciones fluviométricas, 40 estaciones fueron analizadas. Lo anterior se llevó a cabo mediante el levantamiento de información desde distintas fuentes (DGA, CMDC, entre otros), evaluando la consistencia de los datos recopilados así como su homogeneidad.

La información hidrológica permitió la construcción de 3 modelos (cuenca del río Imperial, cuenca del río Toltén y cuencas costeras) que permitieron caracterizar de manera adecuada los recursos hídricos superficiales en las cuencas de estudio. Los modelos fueron implementados en el software ExtendSim, de gran flexibilidad operacional y que permite la generación de rutinas que se pueden acoplar fácilmente y que permiten representar los diferentes procesos involucrados (zonas de riego, ríos, embalses, etc.). El objetivo principal de la modelación hidrológica fue estimar la recarga de los acuíferos, información que se requiere posteriormente para la modelación hidrogeológico, es decir, del funcionamiento de los acuíferos. Se estimaron valores de recarga a los acuíferos en los distintos sectores de estudio (recargas medias m^3/s): Imperial (20,6 m^3/s); Toltén (30,7 m^3/s); Budi (0,56 m^3/s); Costeras B-T (0,28 m^3/s), y; Quele (1,94 m^3/s).

La caracterización geológica, en tanto, consistió en el análisis de la geología superficial (obtenida principalmente de los mapas geológicos obtenidos durante la recopilación de antecedentes y visitas a terreno para validar las unidades y contacto principales), y de la geología subsuperficial. Esta última se obtuvo a partir del análisis de 284 perforaciones con información litológica, incluyendo los tres pozos perforados durante la realización de este proyecto. En la región se reconocen en superficie una serie de unidades geológicas que abarcan desde el Devónico (Paleozoico) hasta el presente, dentro de las que destacan complejos metamórficos y batolitos en la Cordillera de La Costa principalmente, que corresponden a las rocas más antiguas de la región y constituirían el basamento geológico de ésta. Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, lutitas) del Triásico, secuencias marinas, volcánicas marinas y continentales del Jurásico, rocas volcánicas del Cretácico fueron depositadas al este de la actual Cordillera de La Costa, e intruidas localmente por intrusivos Cretácicos.

Desde el Paleoceno en adelante, sobre las rocas descritas anteriormente se suceden depósitos sedimentarios de cuencas de intraarco con secuencias volcánicas de los arcos magmáticos desarrollados en la Cordillera Principal. Durante el Mioceno se produce un mayor desarrollo del volcanismo en la Cordillera Principal, y una mayor depositación de rocas sedimentarias marinas dentro de la Depresión Intermedia. A esto se le suman los numerosos plutones exhumados por la erosión glaciar iniciada en el Plioceno. Desde esta edad se produce un volcanismo continuo y alzamiento de la Cordillera Principal, lo que también genera la depositación de potentes abanicos aluviales y lahares en la Depresión Intermedia. Producto de las glaciaciones que afectaron a la zona desde el Pleistoceno, se generaron depósitos morrénicos y glaciofluviales desde la Cordillera Principal hasta el sector oriental de la Cordillera de la Costa. Finalmente, los depósitos sedimentarios no consolidados del Holoceno se distribuyen a través de ríos, esteros, quebradas, playas, llanuras de inundación, deltas de ríos y cabeceras de valles.

En resumen, 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.

La caracterización geofísica consistió en el levantamiento de información mediante la ejecución de 481 estaciones TEM, con tamaños de espiras que variaron entre 25 m y 200 m, y 680 estaciones gravimétricas a lo largo de toda la región. La información levantada fue utilizada para la construcción integra del modelo hidrogeológico conceptual 3D. Es importante destacar que en la gran mayoría de los perfiles confeccionados, en base a la inversión 1D de cada estación TEM, no fue posible determinar cambios de resistividad en profundidad asociados al nivel estático, o correlacionales directamente con la estratigrafía descrita de pozos cercanos. Este hecho sugiere que este método no es el más recomendable para caracterizar hidrogeológicamente el subsuelo en ambientes hidrogeológicos similares.

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 y que cubre un área aproximada de 30.976 km^2. La información generada permitió obtener un mapa de profundidad del basamento, utilizando un modelo de inversión "tipo cuenca", que consta de dos unidades de densidad uniforme: la unidad superior representa un promedio de los sedimentos, mientras que la inferior corresponde al basamento (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). 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. El error promedio de la estimación de profundidad es del orden de 100 m. El resultado indica que hay zonas en que el basamento se encuentra a más de 2600 m de profundidad (ej. al este de Victoria) de donde está el depocentro principal de la cuenca sedimentaria. Es importante mencionar que los estudios gravimétricos 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).

La construcción del modelo conceptual hidrogeológico 3D, se llevó a cabo utilizando toda la información disponible, complementada con la construcción de 3 pozos y el levantamiento geofísico. Si bien las 481 estaciones TEM y 680 estaciones gravimétricas abarcan gran parte de la región, la falta de información geológica primaria (pozos profundos) de buena calidad, no permite establecer una buena correlación entre la información geofísica con las unidades hidrogeológicas presentes. La información geofísica es de mucho valor cuando existe información primaria suficiente para traspasar dicha información a una delimitación confiable de unidades hidrogeológicas tanto en profundidad como en su extensión horizontal. En la Región de La Araucanía la información geológica primaria de buena calidad es insuficiente para interpretar la gran cantidad de información geofísica levantada, lo que en términos prácticos se traduce en una disminución de la confiabilidad de la geometría definida para las unidades hidrogeológicas. La gran mayoría de las captaciones con solicitudes de derechos de aprovechamiento, presentan información estratigráfica de mala calidad asociada la descripciones litológicas que se incluyen en los expedientes, además de representar sólo a las zonas geológicas más someras.

La caracterización hidroquímica consistió en el desarrollo de cuatro campañas de muestreo hidroquímico en toda la región, analizándose un total de 512 muestras (369 muestras de aguas superficiales y 143 de aguas subterráneas). En el marco de estas campañas, se muestrearon y analizaron 74 puntos de aguas superficiales y 43 captaciones subterráneas, así como 19 estaciones de precipitaciones. En términos generales, es posible señalar que la composición química de las aguas superficiales y subterráneas de las cuencas estudiadas en la región de La Araucanía corresponde en su mayoría a aguas frescas del tipo bicarbonatado intermedio. Cabe destacar que para el análisis hidroquímico, las aguas subterráneas se separaron en aguas someras (pozos con profundidades menores a 20 m) y aguas profundas (pozos con profundidades mayores a 20 m).

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. En el interior de la región, no se aprecian diferencias importantes en la composición de las aguas. Estas 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. En resumen se considera que el agua en la región tiene una buena calidad química, acuíferos costeros 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.

Funcionamiento de los Acuíferos: Conforme a los antecedentes y a las actividades previamente desarrolladas, se formuló un modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos en estudio, en donde se caracterizó. La conceptualización hidrogeológica se basó en las descripciones geológicas de superficie y subsuperficie, identificándose, según sus propiedades hidrogeológicas, 6 Unidades Hidrogeológicas (UH) principales a nivel regional: Basamento e Intrusivos (UH6), Depósitos Consolidados (UH5), Rocas Volcánicas (UH4), Secuencias Volcanosedimentarias (UH3), Depósitos no consolidados antiguos (UH2) y Depósitos no consolidados Actuales (UH1).

Con esta información, se construyó un modelo hidrogeológico en 3D (generado utilizando el software Leapfrog Hydro), apoyado tanto con la geología de subsuperficie como en las campañas geofísicas (TEM y gravimetría) y los 3 pozos perforados en terreno. El modelo hidrogeológico 3D consideró el levantamiento de información de 464 expedientes disponibles, analizándose un total de 75 Pruebas de Bombeo con el objetivo de obtener las propiedades hidráulicas de los sistemas acuíferos. Dentro de esta misma tarea, se ejecutaron en terreno 25 Pruebas de Bombeo adicionales en pozos de particulares, pozos existentes de la DGA y en tres (3) pozos nuevos perforados con motivo del presente estudio, denominados como : PPA-01 (Padre Las Casas); PPA-02 (Freire) y PPA-04 (Nueva Imperial). Con ello, se dispuso de una base de datos adecuada y espacialmente distribuida en la región, correspondientes a 100 pruebas de bombeo analizadas, incorporándose dicha información al modelo 3D. El análisis de esta información muestra que los valores de conductividad hidráulica no varían de manera significativa a lo largo del dominio de la zona de estudio.

Durante el desarrollo del catastro de captaciones realizado, se levantó información de niveles estáticos. 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. 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. No fue posible reconocer en base a la estratigrafía disponible de los pozos un único acuitardo regional, pero los niveles registrados evidencian su existencia.

Modelación Hidrogeológica Numérica: Esta actividad incluyó la formulación e implementación de un modelo numérico de flujo, incluyendo su calibración y operación bajo distintos escenarios de explotación.

El modelo numérico desarrollado incorpora las cuencas del río Imperial y el río Toltén en una sola herramienta de simulación. Esto permite evaluar de forma integrada los recursos hídricos subterráneos de ambas cuencas, evitando tener que introducir condiciones de borde simplificadas y arbitrarias en el límite intercuencas. Es importante señalar que tanto la modelación conceptual como numérica están desarrolladas a escala regional y por tanto la herramienta de modelación construida es apta para generar información a esta escala.

La herramienta numérica 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 esto, se ha configurado un modelo de tres capas con el fin de modelar los dos acuíferos presentes en el sector, según la información de niveles, la cual muestra que en determinados sectores existen 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.

Para simular el flujo se ha empleado el código MODFLOW-USG sobre la plataforma gráfica Groundwater Vistas 6 para pre- y post- procesamiento. El dominio del modelo se subdividió empleando una grilla no-estructurada de elementos cuadrados, que considera un tamaño variable de celdas de 86,69 m como mínimo a un máximo de 342,75 m. La mayor resolución de la grilla se ha focalizado en torno a las zonas donde hay mayores gradientes hidráulicos, es decir, en los cauces de los ríos (Imperial, Toltén, Allipen, Cholchol, etc.), en las zonas de explotación de aguas subterráneas, en las zonas de ingreso de flujo subterráneo en límite oeste, etc. De esta forma el modelo se obtuvo una grilla con 559.675 celdas activas.

Las condiciones de borde empleadas permiten representar los flujos subterráneos de entrada y salida (paquete CHD), en particular el intercambio en los cauces superficiales (paquete RIV) que representa el principal elemento que domina la dinámica del sistema de flujo subterráneo, los lagos Villarrica y Colico (paquete CHD), la recarga superficial (paquete RCH) estimada con el modelo hidrológico y las extracciones desde el acuífero somero y profundo (paquete WEL).

El modelo fue calibrado en régimen permanente empleado un conjunto de datos provenientes del catastro de pozos realizado como parte del estudio, para lo cual se

ajustaron las permeabilidades de cada unidad. Los resultados de la calibración muestran que:

- La conductividad hidráulica en la capa 1 oscila entre un rango de 0,125 y 25 m/día, en la capa 2 entre 0,01 y 25 m/día, y en la capa 3 oscila entre 0,1 y 100 m/día.
- El ajuste del modelo cumple los criterios sugeridos por SEA (2012), con un error de balance de masas inferior a 1%.
- La entrada de agua por flujos subterráneos desde fuera del límite del modelo es del orden de 15,2 m^3/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 el río de ~30,4 m^3/s.
- La recarga superficial total se estima en ~19,5 m^3/s, la cual ocurre en las distintas zonas de recarga y pozos de inyección en el sector de la cordillera de La Costa.

Tomando como base el modelo calibrado en régimen permanente, se construyeron 5 escenarios de simulación transiente que consideran un período de 50 años. Estos escenarios se diseñaron para evaluar la disponibilidad hídrica para otorgar mayores derechos de explotación frente a diferentes situaciones de otorgamiento de derechos, considerando los actuales derechos, las solicitudes en trámite y un incremento de éstas en el tiempo.

Los escenarios evaluados consideraron:

- Escenario 1: Bombeo de la totalidad de los derechos otorgados (9.851,7 L/s en 1.492 pozos). Hidrología histórica.
- Escenario 2: Bombeo de la totalidad de los derechos otorgados más los derechos en trámite (10.751,2 L/s en 1.665 pozos). Hidrología histórica.
- Escenarios 3 y 4: Determinación del volumen sustentable considerando cumplimiento de los 4 criterios DGA. Hidrología histórica.
- Escenario 3: Presenta un aumento progresivo de caudal del 50% respecto al Escenario 2.
- Escenario 4: Presenta un aumento progresivo de caudal del 20% respecto al Escenario 2.
- Escenario 5: Caudales obtenidos en el Escenario 4 (escenario óptimo de extracción) considerando una recarga superficial correspondiente a una combinación de años de hidrología normal y años secos, sin años húmedos. La recarga del escenario es un 22% menor que la hidrología promedio.

Los resultados de estas simulaciones se evalúan en base al cumplimiento de los cuatro criterios exigidos por la DGA para la explotación sostenible de acuíferos:

- Criterio 1: Descensos sostenibles en el tiempo.
- Criterio 2: Afectación sobre aguas superficiales.

- Criterio 3: Cumplimiento de la demanda impuesta.
- Criterio 4: Afectación a pozos de terceros.

Respecto a estas simulaciones es posible señalar lo siguiente:

- Los caudales óptimos de explotación (Escenario 4) son de 9.420 L/s (297,08 MM m^3/año) para la cuenca del río Imperial y de 3.481 L/s (109,78 MM m^3/año) para la cuenca del río Toltén.
- Con base a lo anterior, se estima que el caudal adicional que es posible de ser otorgado es de 1.570 L/s (49,51 MM m^3/año) para la cuenca del río Imperial, y de 580,1 L/s (18,29 MM m^3/año) para la cuenca del río Toltén.
- El escenario de caudales óptimos incluye pozos adicionales en la capa 3 (acuífero profundo), ya que los pozos situados en la capa 1 presentan una mayor tendencia a secarse durante los 50 años de simulación. Traspasando una mayor factibilidad de acoger mayores derechos hacia el acuífero profundo.

Integración de la información: Finalmente, con la comprensión acabada de los acuíferos en estudio, se desarrolló la integración y análisis de toda la información recopilada, y levantada durante el estudio. Paralelamente se integró toda la información un (SIG), de modo de ir conformando un proyecto que permita visualización y entendimiento de cada una de las variables incorporadas y su respectiva interacción. Esto, con el fin último de que ésta corresponda a la herramienta básica en la gestión de recursos hídricos.

A pesar de todas las limitantes técnicas y de información, 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.

13 RECOMENDACIONES

En la región y en particular en las cuencas del río Imperial y río Toltén, la cantidad de agua que escurre de forma superficial es ampliamente superior al flujo subterráneo. Esto domina el comportamiento hidrogeológico del sistema, lo cual se ve reflejado en el funcionamiento del modelo numérico construido y la interacción que tienen los acuíferos con los cursos de agua superficial. El acuífero superior definido en este estudio, está directamente ligado a los cursos superficiales, por ende su comportamiento está relacionado a los caudales superficiales y sus cambios temporales. Este hecho sugiere que para mejorar la comprensión y caracterización del sistema acuífero somero es necesario estudiar en detalle la relación río-acuífero, y su comportamiento dinámico, de acuerdo a las variaciones de caudales en el tiempo. El acuífero profundo tiene una dependencia menor con respecto a los cursos superficiales, pero es imprescindible estudiar su relación también, ya que corresponde a la zona hidrogeológica de mayor potencial. En este mismo tenor, es muy relevante estudiar de mejor forma los eventos o periodos de recarga al acuífero, producto de la precipitación y el riego.

En este escenario se torna necesario 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.

Las principales recomendaciones de este trabajo son las siguientes:

- Implementar una red permanente de pozos de monitoreo, que registre información periódicamente (mensual) de nivel y calidad química (trimestral), con pozos habilitados en el acuífero profundo, buscando observar las variaciones estacionales del acuífero durante el año. Específicamente se recomienda la siguiente priorización para el acuífero profundo en los siguientes sectores (Figura 9-30):
    - Cuenca río Imperial:
        - Aguas arriba de Curacautin,
        - Lautaro,
        - Aguas abajo y al Sureste de Vilcún,
        - Galvarino,
        - Al Sur de Lumaco,
        - Carahue
    - Cuenca río Tolten:
        - Aguas arriba lago Villarica,

        - Villarica,
        - Sureste de Gorbea,
    - Respecto de las características constructivas resulta fundamental que los pozos profundos, estén debidamente sellados en 20 a 30 primeros metros, se debe evaluar caso a caso en función de la litología específica del sector. En este sentido es importante destcar que los pozos de la red actual, no se encuentran sellados y por lo tanto, la medición es la mezcla de los niveles piezométricos de ambos acuíferos.
    - Los pozos deben estar ubicados a más de 500 m de un pozo de bombeo,
    - Los pozos de monitoreo deben considerar prueba de bombeo para estimar parámetros elásticos del acuífero. Se recomienda que al menos el 50% de ellos cuente con pozo de observación, de modo de poder estimar el coeficiente de rendimiento específico y coeficiente de almacenamiento específco.
    - Evaluar implementación de telemetría e instalación de transductores de presión.
- Respecto de la red de monitoreo del acuífero superficial se debe considerar lo siguiente:
    - Dado que no existe información temporal del comportamiento de este acuífero, no es posible priorizar por sectores específico. Sin perjuicio de lo anterior, se recomienda ubicaciones generales en los puntos siguientes.
    - La profundidad de los pozos de observación debe ser inferior a 20 m,
    - Se considera que se necesita una red de al menos 30 pozos, distribuidos 20 pozos en la cuenca de Imperial y 10 en la cuenca de Tolten,
    - Dentro de cada cuenca los pozos deben estar distribuidos a menos de 500 m del cauce principal, y proporcionalmente concentrando una mayor cantidad de ellos (60 a 70%) en la parte alta de la cuenca, desde coordenada Este: 720.000 m al este aproximadamente.
    - Los pozos deben estar ubicados a más de 500 m de un pozo de bombeo.
    - Evaluar implementación de telemetría e instalación de transductores de presión,
    - Los pozos de monitoreo deben considerar prueba de bombeo para estimar parámetros elásticos del acuífero. Se recomienda que al menos el 50% de ellos cuente con pozo de observación, de modo de poder estimar el coeficiente de rendimiento específico y coeficiente de almacenamiento específco
    - Frecuencia de monitoreo de nivel mensual, calidad química frecuencia trimestral.
- Respecto de los análisis de calidad se debe considerar como mínimo lo siguiente:

- Parámetros que contribuyen a la caracterización hidroquímica de las aguas: elementos mayores (Na, Mg, Ca, Cl, SO_4 y HCO_3) parámetros físico químicos (TDS, pH, alcalinidad) y datos in situ (CE, pH, Tº, OD),
- Parámetros que influyen en la calidad de las aguas según usos: potable y riego: parámetros considerados por NCh 1333 y NCh 409.
- En cada nuevo pozo de la red de monitoreo construido se debe considerar la toma de muestra y posterior análisis isótopos estables (Deuterio y O^{18}).

- Revisión de detalle de zonas de relación río acuífero, para lo cual se requiere lo siguiente:
  - Modelo de elevación de terreno, aledaño a los cauces aproximadamente una banda de 1 km, debe necesariamente incluir el sector donde se ubiquen los pozos de monitoreo del acuífero superficial,
  - Confección de perfiles topobatimétricos en los principales ríos, cada 10 km y en la intersección de 2 cauces,
  - Complementar la red de estaciones de aforo, se recomienda instalar en lo siguientes sectores:
    - Cuenca Río Toltén
      - En las inmediaciones Pitrufquén, río Toltén aguas abajo de la junta con el río Allipén,
      - Antes de la junta del río Toltén y río Allipén.
    - Cuenca río Imperial
      - Río Quillén, cercano a Perquenco, existe estación suspendida,
      - Río Imperial en Carahue,
      - Río Cautín inmediatamente aguas abajo de Temuco,
- Mejorar el control de nivel en los lagos, la DGA regional debe contar con esta información de manera sistemática,
- Desarrollo Estudio del impacto del cambio de uso de suelo en la dinámica del sistema subterráneo, debe incluir un levantamiento del comportamiento histórico del uso del suelo,
- Mejorar la calidad de la información litológica que se incluye en los expedientes que acompañan las solicitudes de agua de la región,
- Respecto de los trabajos de modelación, se recomienda que no se realice una actualización antes de contar con al menos 2 años de información de niveles, en ambas redes de monitoreo propuestas (acuífero profundo y acuífero superficial), es decir, es prioritario mejorar el entendimiento de la dinámica del acuífero (monitoreo) antes de realizar nuevas mejoras a la modelación.
- En términos generales respecto de este tipo de estudios, se recomienda que las bases técnicas sean más flexibles de manera de optimizar los recursos con miras a cumplir con los objetivos planteados en el proyecto.

ANEXOS

ANEXOS CAPÍTULO 2

A. ANEXO A

A.1. FICHAS INFORMES PRINCIPALES

A.2. PLANILLA EXPEDIENTES ARAUCANÍA

A.2.1 DGA-Expedientes concedidos y solicitados

A.3. PLANO UBICACIÓN DE CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS

A.3.1 Mapa Expedientes (tamaño A1)

A.3.2 Mapa Expedientes Estratigrafía (tamaño A1)

ANEXOS CAPÍTULO 3

B.1. CATASTRO DGA DERECHOS OTORGADOS Y SOLICITUDES EN PROCESO

B.1.1 Catastro DGA derechos otorgados

B.1.2 Catastro DGA solicitudes en proceso

B.2. BASE DE DATOS CATASTRO TERRENO Y DGA

B.3. FICHAS DE TERRENO

B.3.1 Índice de Fichas

B.3.2 Compilado fichas con fotos

B.4. DEMANDA DE AGUA POTABLE

B.5. DEMANDAS DE RIEGO

ANEXOS CAPÍTULO 4 y CAPÍTULO 5

C.1. ESTADÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS RECOPILADAS (BNA)

C.2. RESULTADOS DEL MÉTODO DE LOS RESIDUOS ACUMULADOS PARA ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

C.3. REGRESIONES DE ESTADÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS

C.4. ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIONES RELLENADAS

C.5. R2 PARA REGRESIONES DE AUTOCORRELACIÓN DE ESTADÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS

C.6. CARACTERÍSTICAS PROBABILÍSTICAS DE LAS PRECIPITACIONES

C.7. ESTADÍSTICAS FLUVIOMÉTRICAS RECOPILADAS (BNA)

C.8. RESULTADOS DEL MÉTODO DE LOS RESIDUOS ACUMULADOS PARA ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS

C.9. REGRESIONES DE ESTADÍSTICAS FLUVIOMÉTRICAS

C.10. ESTADÍSTICAS DE CAUDALES RELLENADAS

C.11. CARACTERÍSTICAS PROBABILÍSTICAS DE LOS CAUDALES

C.12. ESTADÍSTICAS EVAPORIMÉTRICAS RECOPILADAS (DGA)

C.13. RESULTADOS DEL MÉTODO DE LOS RESIDUOS ACUMULADOS PARA ESTACIONES EVAPORIMÉTRICAS

C.14. REGRESIONES DE ESTADÍSTICAS EVAPORIMÉTRICAS

C.15. ESTADÍSTICAS DE EVAPORACIÓN RELLENADAS

C.16. CARACTERÍSTICAS PROBABILÍSTICAS DE LA EVAPORACIÓN

C.17. ESTADÍSTICAS DE TEMPERATURA RECOPILADAS (DGA Y DMC)

C.18. RESULTADOS DEL MÉTODO DE LOS RESIDUOS ACUMULADOS PARA ESTACIONES DE TEMPERATURA

C.19. REGRESIONES DE ESTADÍSTICAS DE TEMPERATURA

C.20. ESTADÍSTICAS DE TEMPERATURA RELLENADAS

C.21. CARACTERÍSTICAS PROBABILÍSTICAS DE LA TEMPERATURA

C.22. RESULTADOS EXTEND SIM

C.22.1 Cuencas río Imperial

C.22.2 Cuencas río Toltén

C.22.3 Cuencas Costeras

C.22.4 Análisis de Sensibilidad

C.23. RESPALDO MÉTODO RESIDUOS ACUMULADOS ESTACIONES PLUVIOMETRICAS

C.24. RESPALDO MÉTODO RESIDUOS ACUMULADOS ESTACIONES FLUVIOMETRICAS

C.25. RESPALDO MÉTODO RESIDUOS ACUMULADOS ESTACIONES EVAPORIMÉTRICAS

C.26. RESPALDO MÉTODO RESIDUOS ACUMULADOS ESTACIONES TEMPERATURA

ANEXOS CAPÍTULO 6

D.1. PLANO GEOLÓGICO ESCALA 1:400.000

D.2. ESTRATIGRAFÍA DE POZOS

D.2.1 Planilla maestra con toda la información de las captaciones recopiladas en el presente estudio

D.2.2 Expedientes digitalizados (concedidos, solicitados y otros)

D.3. DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA DETALLE POR SUBCUENCA

D.4. POZOS PERFORADOS EN ESTE ESTUDIO

D.4.1 Pozos perforados en este estudio

D.4.2 Estratigrafía pozo PPA-01

D.4.3 Estratigrafía pozo PPA-02

D.4.4 Estratigrafía pozo PPA-04

D.4.5 Esquema de estratigrafía y habilitación pozo PPA-04

ANEXOS CAPÍTULO 7

E.1. INFORMES GEODATOS TEM Y GRAVIMETRÍA

E.1.1 Informe Geodatos

E.1.2 Figuras informe Geodatos

E.1.2.1 Figuras Finales Sector Cholchol

E.1.2.2 Figuras Finales Sector Curacautin

E.1.2.3 Figuras Finales Sector Labranza

E.1.2.4 Figuras Finales Sector Lautaro Victoria
E.1.2.5 Figuras Finales Sector Los Laureles
E.1.2.6 Figuras Finales Sector Los Sauces
E.1.2.7 Figuras Finales Sector Malalcahuello
E.1.2.8 Figuras Finales Sector Melipeuco
E.1.2.9 Figuras Finales Sector Nueva Imperial
E.1.2.10 Figuras Finales Padre Las Casas
E.1.2.11 Figuras Finales Sector Pitrufquen
E.1.2.12 Figuras Finales Sector Pucon
E.1.2.13 Figuras Finales Sector Puren
E.1.2.14 Figuras Finales Puerto Saavedra
E.1.2.15 Figuras Finales Sector Tolten
E.1.2.16 Figuras Finales Sector Traiguen
E.1.2.17 Figuras Finales Sector Villarrica
E.1.3 Anexos Informe Geodatos
E.1.3.1 Anexo A Gravimetría
E.1.3.2 Anexo B Inversión TEM
E.1.3.3 Anexo C TEM Aislados
E.1.3.4 Anexo D Modelo TEM

E.2. DENSIDAD DE ROCAS

E.2.1 Planilla con resumen de muestreo en terreno
E.2.2 Figura con distribución muestras de roca
E.2.3 Resultados laboratorio análisis de densidad

E.3. ESTACIONES TEM

E.3.1 Mapa Geológico Estaciones TEM (tamaño A1)

E.4. INFORME GEODATOS TEM LOOP 200

ANEXOS CAPÍTULO 8

F.1. PROTOCOLO DE MUESTREO

F.2. PUNTOS DE MUESTREO

F.3. INFORMES DE LABORATORIO

F.4. COMPILACIÓN RESULTADOS HIDROQUÍMICOS

ANEXOS CAPÍTULO 9

G.1. RESUMEN PROPIEDADES HIDRÁULICAS

G.2. ANÁLISIS DE PRUEBAS DE BOMBEO (METODOLOGÍA Y RESUMEN)

G.2.1 Metodología de análisis de pruebas de bombeo

G.2.2 Análisis de pruebas de bombeo existentes

G.2.3 Análisis pruebas de bombeo nuevas

G.3. ARCHIVOS LEAPFROG

G.3.1 Archivo Ejecutable Modelo Conceptual 3D (Modelo Hidrogeologico Araucania entrega.aproj)

G.3.1 Archivos Leapfrog Modelo Conceptual 3D

ANEXOS CAPÍTULO 10

H.1. RESULTADOS MODELACIÓN

ANEXO SIG