



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

ESTUDIO CUENCAS PRINCIPALES REGIÓN DE LOS RÍOS

INFORME FINAL

**REALIZADO POR:
AMPHOS 21 CONSULTING CHILE LTDA
S.I.T. N° 293**

Santiago, Diciembre 2012

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Sra. María Loreto Silva Rojas

Director General de Aguas (T.P.)
Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe de División Estudios y Planificación
Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Sr. Miguel Ángel Caro Hernández

Inspector Fiscal Subrogante
Sr. Juan Carlos Salgado G.

Profesionales Dirección Regional de Aguas
Sr. Patricio Gutiérrez Luarte

AMPHOS 21 CONSULTING CHILE LTDA

Jefe de Proyecto
Hidrogeólogo Wolf von Igel Grisar

Profesionales:

Hidrogeólogo Iker Juárez Álvarez
Hidrogeóloga Pilar Enguita López
Ingeniero Civil Freddy Cortez
Ingeniero Forestal Daniel Montaner Fernández
Geólogo Jaime Barrera Salazar
Ingeniero Civil Juan Francisco Sanhueza

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS Y ALCANCE	2
2. ESTUDIO DE LA CUENCA RÍO VALDIVIA	3
2.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO	3
2.1.1 <i>Recopilación y análisis de la información existente.....</i>	3
2.1.2 <i>Prospección geofísica</i>	4
2.1.3 <i>Trabajo de catastro</i>	4
2.1.4 <i>Depuración del C.P.A.</i>	9
2.1.5 <i>Análisis e interpretación de la información obtenida.....</i>	13
2.1.6 <i>Definición de componentes del modelo.....</i>	13
2.1.7 <i>Cuantificación del balance hídrico</i>	15
2.1.8 <i>Funcionamiento del modelo conceptual</i>	15
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	17
2.2.1 <i>Ubicación de la zona de estudio</i>	17
2.2.2 <i>Geomorfología</i>	18
2.3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	20
2.3.1 <i>Climatología</i>	20
2.3.2 <i>Temperatura.....</i>	22
2.3.3 <i>Régimen de precipitaciones</i>	23
2.3.4 <i>Evapotranspiración real.....</i>	26
2.3.5 <i>Análisis de la información Fluviométrica</i>	27
2.3.6 <i>Actualización de los límites de las cuencas y subcuencas.....</i>	30
2.3.7 <i>Red de drenaje y Diagramas unifilares.....</i>	31
2.4 MARCO GEOLÓGICO	33
2.4.1 <i>Geología general</i>	33
2.4.2 <i>Estratigrafía de la zona de estudio.....</i>	34
2.4.3 <i>Columna estratigráfica</i>	41
2.4.4 <i>Geología estructural</i>	43
2.5 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	44
2.5.1 <i>Contexto hidrogeológico.....</i>	44
2.5.2 <i>Caracterización de las Unidades Hidrogeológicas Acuíferas</i>	44
2.5.3 <i>Parámetros hidráulicos.....</i>	51
2.5.4 <i>Piezometría y flujos de agua subterránea</i>	53
2.5.5 <i>Estimación de la recarga</i>	54
2.6 DEFINICIÓN DE COMPONENTES DEL MODELO	57
2.6.1 <i>Límites y geometría del basamento</i>	57
2.6.2 <i>Límites y geometría del sistema acuífero</i>	68
2.6.3 <i>Parámetros hidráulicos del modelo conceptual</i>	71
2.6.4 <i>Áreas de recarga y descarga.....</i>	74
2.6.5 <i>Estimación de la recarga en la zona de estudio</i>	75
2.6.6 <i>Uso de agua y extracciones</i>	78
2.6.7 <i>Condiciones de borde.....</i>	78
2.6.8 <i>Interacción Río – Acuífero</i>	80
2.6.9 <i>Piezometría y dirección de flujo.....</i>	81
2.7 BALANCE HÍDRICO PRELIMINAR	83
2.7.1 <i>Balance hídrico del sistema acuífero</i>	83

2.7.2	<i>Cuantificación estimativa del balance hídrico</i>	84
2.8	FUNCIONAMIENTO DEL MODELO CONCEPTUAL	86
2.9	MODELO NUMÉRICO	88
2.9.1	<i>Metodología</i>	88
2.9.2	<i>Estructura del modelo</i>	90
2.9.3	<i>Condiciones de contorno</i>	94
2.9.4	<i>Distribución de los Parámetros</i>	97
2.9.5	<i>Calibración del modelo</i>	100
2.9.6	<i>Escenarios planteados</i>	103
3.	ESTUDIO DE LA CUENCA DE RIO BUENO	115
3.1	METODOLOGÍA DE TRABAJO	115
3.1.1	<i>Recopilación y análisis de la información existente</i>	115
3.1.2	<i>Prospección geofísica</i>	117
3.1.3	<i>Trabajo de catastro</i>	120
3.1.4	<i>Depuración del C.P.A.</i>	125
3.1.5	<i>Análisis e interpretación de la información obtenida</i>	129
3.1.6	<i>Cuantificación del balance hídrico</i>	129
3.1.7	<i>Funcionamiento del modelo conceptual</i>	130
3.2	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	131
3.2.1	<i>Ubicación de la zona de estudio</i>	131
3.2.2	<i>Geomorfología</i>	132
3.3	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	134
3.3.1	<i>Climatología</i>	134
3.3.2	<i>Temperatura</i>	135
3.3.3	<i>Régimen de precipitaciones</i>	136
3.3.4	<i>Evapotranspiración real</i>	138
3.3.5	<i>Análisis de la información Fluviométrica</i>	138
3.3.6	<i>Actualización de los límites de las cuencas y subcuencas</i>	141
3.3.7	<i>Red de drenaje y Diagrama unifilar</i>	142
3.4	MARCO GEOLÓGICO	145
3.4.1	<i>Geología general</i>	145
3.4.2	<i>Estratigrafía de la zona de estudio</i>	146
3.4.3	<i>Columna estratigráfica</i>	155
3.4.4	<i>Geología estructural</i>	157
3.5	INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA	158
3.5.1	<i>Estratigrafía geoelectrica de los sedimentos (TEM)</i>	158
3.5.2	<i>Morfología y profundidad del basamento</i>	159
3.5.3	<i>Conclusiones de la geofísica</i>	160
3.6	CARATERIZACION HIDROGEOLÓGICA	161
3.6.1	<i>Contexto hidrogeológico</i>	161
3.6.2	<i>Caracterización de las Unidades Hidrogeológicas Acuíferas</i>	161
3.6.3	<i>Parámetros hidráulicos</i>	166
3.6.4	<i>Piezometría y flujos de agua subterránea</i>	170
3.6.5	<i>Estimación de la recarga</i>	171
3.7	DEFINICION DE COMPONENTES DEL MODELO	175
3.7.1	<i>Límites y geometría del basamento</i>	175
3.7.2	<i>Caracterización de los acuíferos principales</i>	178
3.7.3	<i>Límites y geometría del sistema acuífero</i>	180
3.7.4	<i>Parámetros hidráulicos del modelo conceptual</i>	183
3.7.5	<i>Uso de agua y extracciones</i>	186

3.7.6	<i>Estimación de la recarga en la zona de estudio</i>	186
3.7.7	<i>Áreas de recarga/descarga</i>	189
3.7.8	<i>Condiciones de borde</i>	191
3.7.9	<i>Interacción Río – Acuífero</i>	192
3.7.10	<i>Piezometría y dirección de flujo</i>	193
3.8	BALANCE HÍDRICO PRELIMINAR	195
3.8.1	<i>Balance hídrico del sistema acuífero</i>	195
3.8.2	<i>Cuantificación estimativa del Balance Hídrico</i>	196
3.9	FUNCIONAMIENTO DEL MODELO CONCEPTUAL	198
3.10	MODELO NUMÉRICO	201
3.10.1	<i>Metodología</i>	201
3.10.2	<i>Estructura del modelo</i>	203
3.10.3	<i>Condiciones de contorno</i>	207
3.10.4	<i>Distribución de los Parámetros</i>	209
3.10.5	<i>Calibración del modelo</i>	213
3.10.6	<i>Escenarios planteados</i>	217
4.	RECOMENDACIONES	228
	BIBLIOGRAFÍA	229
	ANEXO A – FICHAS DE ANTECEDENTES	231
	ANEXO A.1 – EXISTENTES DISPONIBLES (ED)	231
	ANEXO A.2 – EXISTENTES NO DISPONIBLES (END)	237
	ANEXO B – FICHAS DE CATASTRO	243
	ANEXO C – CATASTRO PÚBLICO DE AGUAS	244
	ANEXO D – ANÁLISIS HIDROLÓGICO	250
	ANEXO E – MAPA GEOLÓGICO	251
	ANEXO F – GEOFÍSICA	252
	ANEXO F.1 – GEOFÍSICA CUENCA RIO BUENO	252
	ANEXO F.2 – LÍNEAS GRAVIMETRÍA CUENCA RIO BUENO	253
	ANEXO F.3 – TEM CUENCA DE RÍO BUENO	264
	ANEXO G – HIDROGEOLOGÍA	278
	ANEXO H – MODELO NUMÉRICO	279
	ANEXO I – ENSAYOS DE AFORO	280
	ANEXO I.1 – INTRODUCCIÓN	280
	ANEXO I.2 – METODOLOGÍA	280
	ANEXO I.3 – RESULTADOS	286
	ANEXO I.4 – CONCLUSIONES	286
	ANEXO I.5 – GRUPO DE TRABAJO	288
	ANEXO J – MODELO NUMÉRICO	290
	ANEXO K – PLANOS Y FIGURAS	291

Índice de figuras

Figura 2-1. Esquema de muestreo (cuadrícula y celdas), (Amphos 21).....	6
Figura 2-2. Ficha de agua para el catastro en la cuenca (Amphos 21)	8
Figura 2-3. Ficha de predio para el catastro en la cuenca del río Valdivia	8
Figura 2-4. Estructura general de los campos presentes en la Base de Datos, previa a su depuración (Amphos 21)	10
Figura 2-5. Localización de la zona de estudio. Elaboración: Amphos 21.....	17
Figura 2-6. Relieve de la cuenca del río Valdivia. Elaboración: Amphos 21.	19
Figura 2-7. Figura con las precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) medias mensuales (basado en las estaciones meteorológicas del sector precordillerano de la cuenca).Elaboración: Amphos 21.....	21
Figura 2-8. Figura con las precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) medias mensuales (basado en las estaciones meteorológicas del sector centro y bajo de la cuenca). Elaboración: Amphos 21.....	21
Figura 2-9. Distribución de las isotermas en la Cuenca de Valdivia. Elaboración: Amphos 21.	22
Figura 2-10. Curvas de la desviación acumulada anual de la precipitación distribuidas en la Cuenca. Elaboración: Amphos 21.....	24
Figura 2-11. Precipitación media mensual en estaciones meteorológicas de la cuenca. Elaboración Amphos 21.	25
Figura 2-12. Relación de la precipitación anual y la elevación (periodo 1995-2011). (Amphos 21).....	26
Figura 2-13. Localización de las Estaciones Fluviométricas interpretadas en la Cuenca. Amphos 21.	27
Figura 2-14. Variación media mensual de las estaciones pluviales. Elaboración Amphos 21.	29
Figura 2-15. Variación media mensual de las estaciones pluvio-nivales. Elaboración Amphos 21.	29
Figura 2-16. Actualización de los límites de las Cuencas y subcuencas de la cuenca río Valdivia. Elaboración Amphos 21.	30
Figura 2-17. Diagrama unifilar río Cruces. Elaboración Amphos 21.....	31
Figura 2-18. Diagrama unifilar río Calle Calle. Elaboración Amphos 21.....	32
Figura 2-19. Contexto Geológico de la región de Los Ríos y Los Lagos (Sernageomin, 2002).....	33
Figura 2-20. Mapa hidrogeológico de la cuenca de Valdivia (modificado de Sernageomin, 2008).....	49
Figura 2-21. Corte hidrogeológico A-B correspondiente al mapa de la Figura 2-20 (modificado de Sernageomin, 2008).	51
Figura 2-22. Corte hidrogeológico C-D correspondiente al mapa de la Figura 2-20 (modificado de Sernageomin, 2008).	51
Figura 2-23. Mapa de isopiezas (msnm) en el acuífero de la cuenca de río Valdivia (Amphos 21).....	54
Figura 2-24. Distribución de precipitación (mm/año) en relación con la altitud en la cuenca (Amphos 21).....	55
Figura 2-25. Distribución de los perfiles geofísicos en el acuífero caracterizado (Amphos 21).	59
Figura 2-26. Morfología del basamento del acuífero (Amphos 21).	68
Figura 2-27. Distribución de los sistemas acuíferos en perfil A-B en el sector estudiado Modificado de Sernageomin 2008).	70

Figura 2-28. Distribución de los sistemas acuíferos en perfil C-D del sector estudiado (Modificado de Sernageomin 2008) y leyenda esquemática del mapa (Struckmeir, W; Margar, J, 1995).....	71
Figura 2-29. Mapa de isoconductividades hidráulicas del acuífero de la cuenca del Río Valdivia (Amphos 21).....	72
Figura 2-30 Distribución de precipitación (mm/año) en relación con la altitud en la cuenca (Amphos 21).....	76
Figura 2-31. Condiciones de borde establecidas para el acuífero principal (Amphos 21). 80	
Figura 2-32. Ejemplo de la interacción río-acuífero que se produce en algunos sectores (cauce efluente).	81
Figura 2-33. Mapa de isopiezas (msnm) en el acuífero de la cuenca de río Valdivia (Amphos 21).....	82
Figura 2-34. Esquema de funcionamiento del sistema hídrico (Amphos 21).....	83
Figura 2-35. Modelo conceptual previo de la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).....	87
Figura 2-36. Dominio de la modelación de la cuenca del río Valdivia con las simplificaciones descritas. La línea de color negro es el límite acuífero y la línea azul, la hidrografía de los cauces principales de la cuenca (Amphos 21).....	90
Figura 2-37 Dominio del modelo numérico en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21)....	92
Figura 2-38. Superficie topográfica del área modelada (entre 0 -azul- y 1400 msnm -rojo-). (Amphos 21).....	93
Figura 2-39. Malla regional del modelo numérico de la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).	94
Figura 2-40. Condiciones de contorno del modelo (caudal nulo en los bordes, condición de río -azul-, condición de nivel fijo -marrón- y puntos de bombeo del agua subterránea), (Amphos 21).....	95
Figura 2-41. Distribución y valores de la recarga en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).	97
Figura 2-42. Distribución de la conductividad hidráulica en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).....	98
Figura 2-43. Distribución del coeficiente de almacenamiento específico en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21)	99
Figura 2-44. Distribución de los puntos de observación del nivel freático (Amphos 21).100	
Figura 2-45. Calibración de niveles en el modelo de flujo de Valdivia (Amphos 21).	101
Figura 2-46. Balance de agua del modelo calibrado con el 10% de Derechos Concedidos (Amphos 21).....	103
Figura 2-47. Caso Base con la explotación del 10% (superior) de los Derechos de Agua Concedidos Subterráneos (equidistancia de la piezometría igual a 2,5 m), (Amphos 21).	104
Figura 2-48. Caso Base sin la explotación del 10% (superior) de los Derechos de Agua Concedidos Subterráneos (equidistancia de la piezometría igual a 2,5 m), (Amphos 21).	104
Figura 2-49. Situación de niveles en el área de Valdivia en el caso de la explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (equidistancia de 1 m entre curvas de nivel), (Amphos 21).....	107
Figura 2-50. Balance de agua del modelo con la explotación de los Derechos de Agua Concedidos (Amphos 21).....	108
Figura 2-51. Escenario de explotación de un 10% de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).	110
Figura 2-52. Balance de agua del modelo con la explotación de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite (10%) (Amphos 21).	111

Figura 2-51. Escenario de explotación de un 10% de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).	113
Figura 2-52. Balance de agua del modelo con la explotación de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite (10%) (Amphos 21).	114
Figura 3-1. Esquema de muestreo (cuadrícula y celdas) (Amphos 21).	122
Figura 3-2. Ficha de agua para el catastro en la cuenca (Amphos 21).	124
Figura 3-3. Ficha de predio para el catastro en la cuenca del río Bueno (Amphos 21). ..	124
Figura 3-4. Estructura general de los campos presentes en la Base de Datos, previa a su depuración (Amphos 21)	126
Figura 3-5. Localización de la zona de estudio. Elaboración: Amphos 21.	131
Figura 3-6. Relieve de la cuenca del río Bueno. Elaboración: Amphos 21.	133
Figura 3-7 Figura con las precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) medias mensuales (basado en las estaciones meteorológicas de la cuenca). Elaboración: Amphos 21.	135
Figura 3-8. Distribución de las isotermas en la Cuenca de río Bueno. (Amphos 21)	136
Figura 3-9. Precipitación media mensual en estaciones meteorológicas de la cuenca (1994-2011). Elaboración: Amphos 21.	137
Figura 3-10 Relación de la precipitación anual y la elevación. Elaboración: Amphos 21.	138
Figura 3-11 Localización de las Estaciones Fluviométricas interpretadas en la Cuenca del río Bueno. Elaboración: Amphos 21.	139
Figura 3-12. Variación media mensual de las estaciones pluviales. Elaboración: Amphos 21.	141
Figura 3-13. Variación media mensual de las estaciones pluvio-nivales. Elaboración: Amphos 21.	141
Figura 3-14 Actualización de los límites de las cuencas y subcuencas de la cuenca del río Bueno. Elaboración: Amphos 21.	142
Figura 3-15. Diagrama unifilar río Bueno. Elaboración: Amphos 21.	144
Figura 3-16. Marco Geológico de la región de Los Ríos y Los Lagos (SERNAGEOMIN, 2002).	145
Figura 3-17. Límites de los acuíferos de la cuenca de río Bueno. Fuente: SERNAGEOMIN 2008.	165
Figura 3-18. Corte hidrogeológico A-B (N-S) de la cuenca de río Bueno (ver Figura 3-17). Fuente: SERNAGEOMIN, 2008.	166
Figura 3-19. Distribución de la permeabilidad (m/s) en el acuífero. Elaboración: Amphos 21.	167
Figura 3-20. Mapa de isopiezas (msnm) en el acuífero de la cuenca de río Bueno. (Amphos 21).	171
Figura 3-21. Distribución de precipitación (mm/año) en relación con la altitud en la cuenca (Amphos 21).	172
Figura 3-22. Distribución de los perfiles geofísicos en el acuífero caracterizado (Amphos 21).	175
Figura 3-23. Morfología del basamento del acuífero. Elaboración: Amphos 21.	177
Figura 3-24. Ubicación de los acuíferos principales de la cuenca de río Bueno (Amphos 21).	180
Figura 3-25. Corte hidrogeológico A-B (N-S) de la cuenca de río Bueno (ver Figura 3-24 para ubicación) Fuente: SERNAGEOMIN, 2008.	182
Figura 3-26 .Distribución de la permeabilidad (m/d) en el acuífero (Amphos 21).	183
Figura 3-27 Mapa de distribución de la S (Escalona 2004).	185
Figura 3-28 Distribución de precipitación (mm/año) en relación con la altitud en la cuenca. Elaboración: Amphos 21.	187
Figura 3-29. Condiciones de borde para el acuífero de Río Bueno (Amphos 21).	192
Figura 3-30. Ejemplo de la interacción río-acuífero que se produce (cauce efluente). ..	193

Figura 3-31. Mapa de isopiezas (msnm) en el acuífero de la cuenca de río Bueno (Amphos 21).....	194
Figura 3-32. Esquema de funcionamiento del sistema hídrico. Elaboración: Amphos 21.	195
Figura 3-33. Esquema del modelo conceptual previo de la cuenca del río Bueno (Amphos 21).	200
Figura 3-34. Superficie topográfica del área modelada (entre 0 y 1.400 msnm) (Amphos 21).	204
Figura 3-35. Basamento rocoso del área modelada (entre 0 y -2300 msnm) (Amphos 21).	205
Figura 3-36. Espesor del acuífero modelado (entre 0 y 3.500 m) (Amphos 21).....	205
Figura 3-37. Malla regional del modelo numérico de la cuenca de Río Bueno (Amphos 21).	206
Figura 3-38. Condiciones de contorno del modelo (caudal nulo en los bordes, condición de río y principales puntos de bombeo del agua subterránea) (Amphos 21).....	207
Figura 3-39 Distribución y valores de la recarga en el dominio modelado (Amphos 21).210	
Figura 3-40. Distribución de la conductividad hidráulica en el acuífero (Amphos 21)....	211
Figura 3-41. Distribución del coeficiente de almacenamiento específico y capacidad específica en el dominio modelado (Amphos 21).....	212
Figura 3-42. Ubicación de los puntos con información de niveles obtenidos en la campaña de terreno en las regiones de Los Ríos y Los lagos (Amphos 21).....	213
Figura 3-43. Distribución final de la conductancia de las celdas tipo río en el modelo numérico del Río Bueno para el Caso Base después de la calibración (Amphos 21).	215
Figura 3-44. Valores de los niveles observados y calculados por el modelo del Río Bueno junto con los parámetros estadísticos obtenidos después de la calibración del Caso Base (Amphos 21).....	217
Figura 3-45. Balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de los Derechos Concedidos (Amphos 21).	218
Figura 3-46. Caso Base con la explotación total de un 10% de los Derechos de Agua Concedidos (equidistancia de la piezometría igual a 10 m) (Amphos 21).	220
Figura 3-47. Situación de niveles en el área de Río Bueno en el caso de la explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (equidistancia de la piezometría igual a 10 m) (Amphos 21).....	221
Figura 3-48. Balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 100% de los Derechos Concedidos (Amphos 21).	222
Figura 3-49. Escenario de explotación de un 10% de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite en el acuífero del Río Bueno (equidistancia de la piezometría igual a 10 m) (Amphos 21).....	223
Figura 3-50. Balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de los Derechos Concedidos y en Trámite (Amphos 21).	224
Figura 3-51. Escenario de explotación de un 100% de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite en el acuífero del Río Bueno (equidistancia de la piezometría igual a 10 m) (Amphos 21).....	225
Figura 3-50. Balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de los Derechos Concedidos y en Trámite (Amphos 21).	226

Índice de tablas

Tabla 2-1. Estaciones representativas en la zona de estudio (Amphos 21).	20
Tabla 2-2. Estaciones Fluviométricas interpretadas de la Cuenca del río Valdivia.....	28
Tabla 2-3. Valores de transmisividad de la cuenca del río Valdivia.....	53
Tabla 2-4. Estimación de la precipitación a partir de la ecuación altura-precipitación en la cuenca (Amphos 21).	55
Tabla 2-5. Parámetros hidráulicos calculados para la cuenca de Valdivia (Amphos 21)...	73
Tabla 2-6. Estimación de la precipitación a partir de la ecuación altura-precipitación en la cuenca (Amphos 21).	77
Tabla 2-7. Valores de infiltración estimados para la cuenca del río Valdivia.	77
Tabla 2-8. Conductividades hidráulicas calibradas para el Caso Base (Amphos 21).....	102
Tabla 2-9. Valores de recarga del Caso Base (Amphos 21).....	102
Tabla 2-10. Balance en estado estacionario para el Caso Base (volumen), (Amphos 21).	102
Tabla 2-11. Balance en estado estacionario para el caso de explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (volumen).	108
Tabla 2-12. Balance en estado estacionario para el caso de explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (volumen).	111
Tabla 2-12. Balance en estado estacionario para el caso de explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (volumen).	113
Tabla 3-1 Descripción de las líneas gravimétricas trazadas en el estudio.....	118
Tabla 3-2. Estaciones representativas en la zona de estudio.	134
Tabla 3-3. Estaciones Fluviométricas interpretadas de la Cuenca del río Bueno.....	140
Tabla 3-4. Unidades geoeléctricas de la cuenca.	158
Tabla 3-5. Valores de la conductividad hidráulica (m/s) de la cuenca de río Bueno.....	168
Tabla 3-6. Valores de la transmisividad en la cuenca del río Bueno (Amphos 21).....	169
Tabla 3-7. Coeficiente de almacenamiento en diferentes captaciones (Escalona 2004). 169	
Tabla 3-8. Estimación de la precipitación a partir de la ecuación altura-precipitación en la cuenca (Amphos 21).	173
Tabla 3-9. Coeficiente de almacenamiento en diferentes captaciones (Escalona 2004). 184	
Tabla 3-10. Estimación de la precipitación a partir de la ecuación altura-precipitación en el acuífero (Amphos 21).....	188
Tabla 3-11. Ubicación de los puntos con información de niveles utilizados en la calibración del modelo numérico del Río Bueno.	214
Tabla 3-12. Conductividades hidráulicas del Caso Base después de calibración (Amphos 21)	216
Tabla 3-13. Valores de Ss para los acuíferos en el Caso Base después de calibración (Amphos 21).....	216
Tabla 3-14. Resumen del balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con el 10% de Derechos Concedidos (Amphos 21).....	219
Tabla 3-15. Resumen del balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de Derechos Concedidos (Amphos 21).	222
Tabla 3-16. Resumen del balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de Derechos Concedidos y en Trámite (Amphos 21).....	224
Tabla 3-16. Resumen del balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 100% de Derechos Concedidos y en Trámite (Amphos 21).....	226
Tabla 3-17. Resumen del balance hídrico global para los 3 escenarios de modelación (Amphos 21).....	227

Resumen

En el 2012 la Dirección General de Aguas encargó a la empresa Amphos 21 Consulting Chile Ltda. la realización del estudio de las cuencas principales de la Región de Los Ríos.

En el marco de este proyecto se ha realizado el estudio de las cuencas de los ríos Valdivia y Rio Bueno. Se han realizado labores de catastro de puntos de agua (pozos, norias, bocatomas, centrales hidroeléctricas,...) superficiales y subterráneos, para la integración y depuración del Catastro Público de Aguas. Además se ha construido una Base de Datos (BDD) referencial para mejorar la consulta de estos datos. Además, se ha realizado una recopilación de los antecedentes disponibles de la zona, acudiendo a fuentes diversas en el territorio nacional (DGA, CIRH, CNR, DOH, CIREN,...).

En cada una de las cuencas mencionadas, la empresa Amphos 21 ha realizado la definición de las componentes del ciclo hidrológico (hidrología, geomorfología, geología e hidrogeología), dando forma a los modelos conceptuales de funcionamiento de las mismas.

El estudio se ha completado con la construcción de un modelo numérico de cada cuenca analizada que refleja el conocimiento adquirido y permitirá realizar una mejora en la gestión de las aguas subterráneas, tanto en el presente como en el futuro.

1. Introducción

La DGA se encarga de promover la gestión y administración del recurso hídrico en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente, como también de proporcionar y difundir la información generada por su red hidrométrica y la contenida en el Catastro Publico de Aguas con el objeto de contribuir a la competitividad del país y mejorar la calidad de vida de las personas.

Chile, al ser un país con una geografía diversa, distribuido entre latitudes tropicales y australes, dispone de recursos hídricos también diversos, presentes de forma muy dispar a lo largo y ancho del territorio. En el Norte, la mayor disponibilidad de agua se encuentra de manera subterránea, lo cual obliga a aproximarse a ella con énfasis en la hidrogeología. Hacia el Sur, y sobre todo en la zona austral, la disponibilidad es principalmente superficial, con lo cual el estudio del recurso se centra en la hidrología de las cuencas. La zona Centro Sur es una zona de transición, habiendo cuencas con avanzada explotación de aguas subterráneas y superficiales, y otras con explotaciones subterráneas incipientes.

Específicamente, las cuencas principales de la Región de los Ríos si bien son aprovechadas principalmente de manera superficial, los acuíferos están siendo cada vez más explotados, lo cual responde a demandas para el desarrollo de diferentes actividades productivas en el territorio, principalmente riego, industria y agua potable.

En este caso, el otorgamiento de derechos ha sido sólo de acuerdo a un análisis local, que ha involucrado la evaluación de la disponibilidad a nivel de la fuente a través de una prueba de bombeo. Este procedimiento se estima válido para el tipo de acuíferos en la zona Sur, considerando que exhiben montos elevados de recarga y renovables anualmente.

Las unidades acuíferas que integran las Cuencas Principales de la Región de Los Ríos se observan sin problemas para satisfacer la demanda de agua subterránea. Sin embargo, es fundamental investigar y medir el recurso hídrico, el cual permita conocer y avanzar en el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas de manera sustentable.

1.1 Objetivos y alcance

El objetivo principal del presente estudio es realizar un levantamiento de la información hidrogeológica para el desarrollo de un modelo conceptual y numérico de los acuíferos de las Cuencas Principales de la Región de los Ríos. Para ello se deben cumplir algunos objetivos específicos que se detallan a continuación:

- Generar la geometría de los acuíferos principales mediante método geofísicos.
- Revisar los catastros de demanda agrícola, sanitaria e industrial.
- Definir y caracterizar los principales acuíferos presentes en el área de estudio.
- Realizar un levantamiento de pozos y niveles en los acuíferos reconocidos.
- Representar y estimar los flujos de agua subterránea.
- Identificar las zonas de recarga y descarga.
- Obtener los parámetros hidráulicos de los acuíferos.
- Incorporar toda la información hidrológica e hidrogeológica del estudio en un Sistema de Información Geográfico (SIG).
- Definir modelos conceptuales de funcionamiento hidrogeológico para los acuíferos reconocidos.
- Elaborar modelos numéricos de flujo de agua subterránea preliminar para los principales acuíferos reconocidos.

Los alcances del estudio fueron los siguientes:

- 1) Recopilación y análisis de la información disponible.
- 2) Metodología de la elaboración del catastro y estimación de la demanda agrícola, sanitaria, minera e industrial en la zona de estudio.
- 3) Análisis Hidrológico de la Cuenca.
- 4) Estudio de prospección geofísica para determinar la geometría de los acuíferos.
- 5) Caracterización de las formaciones acuíferas principales.
- 6) Identificación y/o verificación de las principales zonas de recarga y descarga.
- 7) Definición de los componentes del modelo.
- 8) Cuantificación estimativa del balance hídrico.
- 9) Funcionamiento del modelo conceptual.
- 10) Modelación numérica de los acuíferos identificados.

2. Estudio de la Cuenca Río Valdivia

2.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1.1 Recopilación y análisis de la información existente

En esta actividad, Amphos 21 ha realizado una recopilación y actualización de los antecedentes existentes que pueden aportar datos al desarrollo del estudio. Se considera dentro de esta actividad la revisión de los trabajos publicados en: congresos, informes, estudios, tesis, expedientes, estadísticas, datos puntuales, etc., que sean de dominio público a través de instituciones como la Dirección General de Aguas (DGA), el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Comisión Nacional de Riego (CNR), Centro de Información Recursos Naturales (CIREN), Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), Instituto Desarrollo Agropecuario, Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), Conservador de Bienes Raíces; Instituto Geográfico Militar (IGM), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Empresas de Servicios Sanitarios en la Región, Universidades, Centros de Investigación, etc.

De los principales trabajos que entregan información de interés para la evaluación hidrogeológica de la Cuenca de Valdivia se citan los siguientes antecedentes:

- ✓ *Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos, Chile* (2011). Banco Mundial, Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- ✓ *Mejoramiento y ampliación de la red de aguas subterráneas, regiones VII a X* (2010) MOP-DGA.
- ✓ *Caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Valdivia*. (2010). Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- ✓ *Caracterización de los acuíferos del área de Valdivia* (2002). Sernageomin.

Los antecedentes existentes disponibles de la zona de estudio se han recopilado en una base de datos destacando la fuente, año, autor, título, descripción, información destacada y resumen, entre otros. Además se ha realizado una ficha resumen con la información relevante (Anexo A – Fichas de antecedentes) y un resumen con los estudios existentes no disponibles para el presente.

2.1.2 Prospección geofísica

En la zona de estudio se realizó un estudio de prospección geofísica mediante el método de gravimetría para representar la geometría del acuífero sedimentario. La gravimetría consiste en la medición de la gravedad terrestre para determinar la distribución de la densidad de las rocas bajo la superficie. Entre las aplicaciones más frecuentes de los levantamientos gravimétricos, están la determinación de la profundidad del basamento rocoso en cuencas sedimentarias, aprovechando el contraste de densidad entre el relleno de la cuenca y las rocas del basamento.

Durante las campañas de terreno realizadas en septiembre de 2012, Geodatos levantó 18 perfiles (longitudinales y transversales) en la cuenca del río Valdivia, abarcando 300 km de longitud, con un total de 191 estaciones gravimétricas. Dichos perfiles se han concentrado mayoritariamente en esta Cuenca debido a que se dispone de diversos perfiles geofísicos existentes en la cuenca de Río Bueno.

2.1.3 Trabajo de catastro

Los trabajos de catastro realizados por Amphos 21 para el presente estudio se han desarrollado en las siguientes fases:

✓ Visita a terreno inicial:

Durante los días 11 y 12 de septiembre se realizó una visita a terreno en compañía del inspector fiscal con el fin de validar el sistema de trabajo en terreno, comprobar condiciones de accesibilidad, condiciones hidrológicas e hidrogeológicas relevantes descritas en antecedentes previos.

✓ Planificación y metodología del trabajo de catastro:

Para realizar una buena planificación de la fase de levantamiento de información en terreno, es necesario reconocer en gabinete el orden de magnitud de los distintos parámetros a capturar. A partir de estos se ha definido una estrategia de detalle para abordar de manera eficiente el catastro de puntos de agua de la zona.

Se analizaron bases de datos con información catastral, expedientes de derechos de aguas, catastros previos e información cartográfica. Estas bases fueron depuradas debido al gran volumen de información, presencia de datos poco organizados y abundantes errores, entre los que se encuentran:

1. Campos desplazados o sin información (caudal, coordenadas, etc.).
2. Registros incompletos.
3. Diferentes sistemas de proyección y huso, unidades, duplicados y errores de transformación geográfica.
4. Coordenadas fuera de área o inexistentes de acuerdo a sistema de proyección
5. Unidades de caudales distintas (l/s, m³/d, lt/min) en un mismo campo.
6. Magnitud de caudales erróneos, debido a la acumulación de datos procedentes de distintas fuentes no unificadas (Ej.: uso de puntos en lugar de comas, siendo 15,0 l/s, 15.000 l/s).
7. Registro temporal de las concesiones de caudales mensuales erróneos y en algunos casos inexistentes.

La información errónea y/o incompleta mencionada anteriormente, fue depurada mediante los expedientes físicos provistos por la DGA. En aquellos casos en los que la información no fue posible verificar, estos fueron tomados en cuenta para su validación en terreno (criterio de filtrado 1).

Como resultado del análisis de los datos presentes en la zona de estudio, se establecieron los siguientes criterios de selección de puntos a catastrar en terreno (criterio de filtrado 2):

✓ Puntos subterráneos:

Puntos de agua subterráneas en donde los caudales se encuentren entre 10 y 150 l/s, dado su altos valores en relación los usos de agua descritos. Adicionalmente se seleccionaron todos los pozos con caudal inferior a 0,05 l/s (excesivamente bajos).

✓ Puntos superficiales:

Puntos de agua superficiales corrientes y detenidos con:

- a. Caudales inferiores a 0,05 l/s (es inusual encontrar concesiones superficiales tan bajas por lo que se hace conveniente realizar una validación *in-situ*).

- b. Caudales superiores a 1.000 l/s, que no pudieron ser verificados por no disponer de su expediente de derechos de agua, para uso de riego, minería y/o industria.

En base al total de puntos seleccionados, se diseñó una campaña de muestreo para la zona de estudio organizada en cuadrículas y celdas, integrando los puntos de agua superficial y subterránea, accesos, roles e información logística disponible (

Figura 2-1).

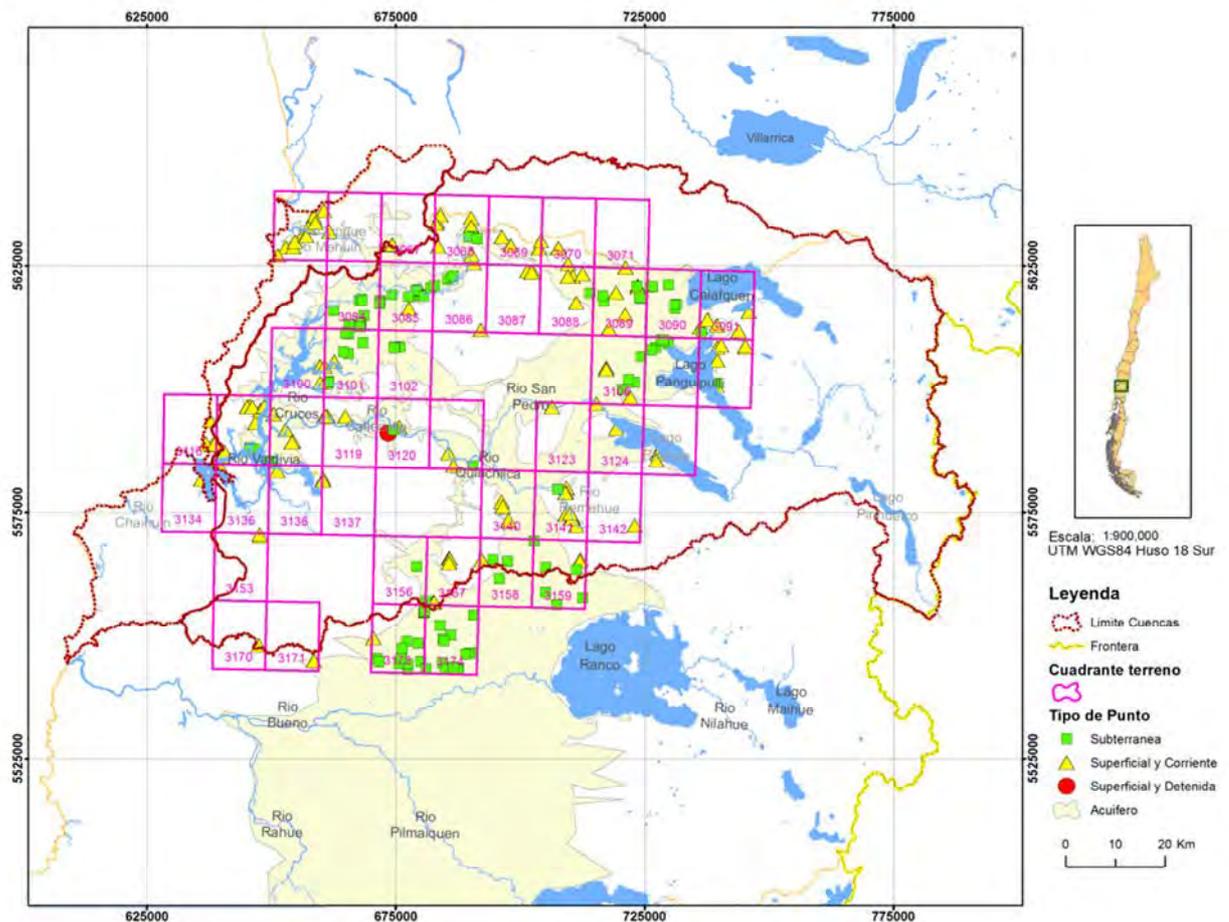


Figura 2-1. Esquema de muestreo (cuadrícula y celdas), (Amphos 21).

En la planificación de terreno se ha considerado catastrar aproximadamente 6 a 8 registros diarios con sus predios correspondientes y se estima un tiempo aproximado de 4 semanas.

Se elaboraron fichas de encuesta en terreno (Anexo B – Fichas de catastro) en las que se recolectó el siguiente tipo de información: la configuración de uso de las aguas que riegan el predio, identificando pozos, bocatomas, canales, ríos, áreas de cultivo y tipos de cultivos. Además se añadieron croquis de la ubicación de cada punto.

En cada punto de agua visitado, tales como bocatomas, tranques nocturnos y pozos, se georreferenció la ubicación, se tomó una fotografía y un video de corta duración que da cuenta del lugar y de la distribución de las aguas.

En el caso de los pozos y norias se incluyó la medida del nivel estático o dinámico de las aguas subterráneas, datos de captación (comuna, nombre del predio, propietario, tipo de captación) y uso de captación (riego, agua potable, industrial, otros). Fue especificado el estado de su uso y las características constructivas del pozo. Se incluyó la potencia de la bomba y su caudal máximo de extracción, en caso de existir la información.

Finalmente, en consenso con el inspector fiscal se preparó una ficha de catastro de terreno, para una mejor organización de la información de cada predio y punto de agua visitado. Dichas fichas se pueden observar en las Figura 2-2 y Figura 2-3.

AMPHOS 21 FICHA DEL PUNTO DE AGUA			
CÓDIGO DGA	Coordenadas UTM	X	
CONCESIÓN	WGS84 HUSO 18S	Y	
PROVINCIA	COTA m.s.n.m	Z	
COMUNA			
COD_INTERNO A21	Fecha/hora		
NOMBRE DEL PROPIETARIO			
PREDIO			
ENTREVISTADO			
CUENCA			
ACUÍFERO(S)			
Uso del Agua	<input type="checkbox"/> Minería <input type="checkbox"/> Doméstico <input type="checkbox"/> Industrial <input type="checkbox"/> Riego <input type="checkbox"/> Otro		
N° resolución DGA	Año	Inscripción CBR	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Pendiente
PUNTO DE AGUA SUBTERRÁNEA <input type="radio"/> Pozo <input type="radio"/> Noria <input type="radio"/> Oren <input type="radio"/> Fuente			
Equipo de bombeo		Régimen de bombeo	
Motor	MES		
Potencia/HP	DIA/MES		
	HORAS/DIA		
	Q medio	Unidad	L/seg.
EXTRACCIÓN			
Marca	Material de la Camisa		
	Diámetro del Pozo		
Capacidad Nominal	Profundidad (m)		
	Estado de Agua: <input checked="" type="checkbox"/> En Uso <input type="checkbox"/> Sin Uso <input type="checkbox"/> Turbia <input type="checkbox"/> Pozo Seco <input type="checkbox"/> Contaminado		
Foto N°	Video N°		
Medida de Nivel de Agua			
Fecha/hora de la medida	Prof. Del nivel del agua (m)		
Referencia de la medida (h)	(estático/dinámico)		
PUNTO DE AGUA SUPERFICIAL <input type="radio"/> Bocatoma <input type="radio"/> Canal <input type="radio"/> Vertiente			
Nombre del Canal/Bocatoma		Caudal	
Comunidad de aguas		Volumen	
Nombre del Río/Estero/Lago/Vertiente asociado			
Temporada de Riego		Tipo de punto: <input type="checkbox"/> Captación <input type="checkbox"/> Resultado	
Tipo Bocatoma: <input type="checkbox"/> Bocatoma Alta Montaña (rejís) <input type="checkbox"/> Bocatoma Plástica <input type="checkbox"/> Bocatoma profunda			
Foto N°	Video N°		

EMBALSE Y TRANQUES	
<input type="radio"/> Embalse <input type="radio"/> Tranque	
Nombre	Superficie Regada (Ha)
Comunidad de aguas	
Dimensiones	Funcionamiento
Fecha inicio operación	Embalse (hr/turno)
Volumen Máximo	Volumen Mínimo
Temperatura de Riego	Filtraciones
Fotos N°	Videos N°
PUNTOS DE DESCARGA	
TIPO	OBS (Color, Olor)
<input type="checkbox"/> Hidroeléctrica <input type="checkbox"/> Industri <input type="checkbox"/> Agua Potable <input type="checkbox"/> Agua Servida <input type="checkbox"/> Alcantarillado <input type="checkbox"/> Piscicultura	
Caudal	
Foto N°	Video N°
OBSERVACIONES E INCIDENCIAS	
Persona responsable del catastro	
Observaciones y actividades del entorno (usos del suelo, mineras cercanas, vertidos, etc.)	
¿Se ha podido inventariar el punto de agua?	<input checked="" type="radio"/> SI <input type="checkbox"/> No se ha localizado al propietario <input type="checkbox"/> Dato del contacto incorrecto <input type="checkbox"/> Cambio de propietario (indicar nuevos datos) <input type="checkbox"/> Punto abandonado/en mal estado/sellado <input type="checkbox"/> Ha cambiado las condiciones de entorno
Croquis de localización	

Figura 2-2. Ficha de agua para el catastro en la cuenca (Amphos 21)

AMPHOS 21 FICHA DE PREDIO			
CÓDIGO DGA	Coordenadas UTM	X	
CONCESIÓN	WGS84 HUSO 18S	Y	
PROVINCIA	COTA m.s.n.m	Z	
COMUNA			
COD_A21	Fecha/hora		
NOMBRE DEL PROPIETARIO			
PREDIO			
ENTREVISTADO			
CUENCA/SUBCUENCA			
ACUÍFERO(S)			
Tipos de puntos en el predio: <input type="checkbox"/> Pozo <input type="checkbox"/> Noria/Oren <input type="checkbox"/> Bocatoma <input type="checkbox"/> Embalse/Tranque <input type="checkbox"/> Canal <input type="checkbox"/> Descarga			
ROL PROPIEDAD O PREDIO			
ROL PROPIEDAD o PREDIO			
Dimensiones (largo x ancho)			
N° Foto entorno/entrada predio			
USO DE SUELO			
<input type="checkbox"/> Residencial <input type="checkbox"/> Equipamiento <input type="checkbox"/> Infraestructura <input type="checkbox"/> Espacio Público <input type="checkbox"/> Areas Verdes <input type="checkbox"/> Forestal <input type="checkbox"/> Actividades			
USO DEL AGUA			
<input type="checkbox"/> Pesca/Recreo <input type="checkbox"/> Agricultura <input type="checkbox"/> Ganadería <input type="checkbox"/> Industrial <input type="checkbox"/> Residencial <input type="checkbox"/> Betún/Usos domésticos <input type="checkbox"/> Forestal			
<input type="checkbox"/> Minería <input type="checkbox"/> Agua Potable <input type="checkbox"/> Agua Servida <input type="checkbox"/> Hidroeléctrica			
FUENTE DEL AGUA			
<input type="checkbox"/> Pozo <input type="checkbox"/> Noria <input type="checkbox"/> Oren <input type="checkbox"/> Bocatoma <input type="checkbox"/> Embalse <input type="checkbox"/> Tranque <input type="checkbox"/> Descarga			
Tipo de Riego			
<input type="checkbox"/> Surco (S) <input type="checkbox"/> Alporción (A) <input type="checkbox"/> Por Bordos (B) <input type="checkbox"/> Inundación (I) <input type="checkbox"/> Por Diques (C) <input type="checkbox"/> Goteo (G) <input type="checkbox"/> Otro (O)			
Tipo y áreas de cultivo			
Tipo de Cultivo	Sistema de Riego	Variedad	Superficie
			Fuente de Agua (Para riego)
Foto N°:	Video N°:		
OBSERVACIONES E INCIDENCIAS			
Persona responsable del catastro			
Observaciones y actividades del entorno (usos del suelo, mineras cercanas, vertidos etc.)			
¿Se ha podido inventariar el predio?	<input checked="" type="radio"/> SI <input type="checkbox"/> No se ha localizado al propietario <input type="checkbox"/> Dato del contacto incorrecto <input type="checkbox"/> Cambio de propietario (indicar nuevos datos) <input type="checkbox"/> Punto abandonado/en mal estado/sellado <input type="checkbox"/> Ha cambiado las condiciones de entorno		
Croquis de localización			
Observaciones			

Figura 2-3. Ficha de predio para el catastro en la cuenca del río Valdivia

2.1.4 Depuración del C.P.A.

2.1.4.1 Antecedentes

A partir de los archivos del CPA recopilados para la Región de Los Ríos, se conformó el archivo general de base de datos de CPA, que agrupa solicitudes concedidas desde comienzo del 1900 hasta mediados de 2012. La información estaba organizada en 41 campos relacionados con información de carácter administrativo como: unidad de resolución, Código de expedientes, N° y fecha de resolución, etc. Información asociada al punto como: Tipo de punto, coordenadas y sistemas de proyección, usos de agua, naturaleza, caudal, unidades de caudal, entre otros.

Por otra parte, los registros de la BDD recopilan cada alteración de la solicitud por cada punto y caudal asociado, existiendo expedientes con más de 120 alteraciones. En total, la BDD presenta 52.539 registros, que representan un total de 4.066 expedientes (con coordenadas UTM válidas).

A pesar de presentar una estructura definida en los campos y registros mencionados, los datos presentaban numerosas deficiencias de diferente naturaleza. Estas son los errores más frecuentes que se localizaron en la BDD:

- ✓ Campos sin información.
- ✓ Datos en campos no correspondientes (frecuentemente campos contiguos).
- ✓ Caudales en diferentes unidades (Lt/seg- Lt/min - Lt/día - m³/año -m³/mes - m³/día - m³/min- m³/seg).
- ✓ Caudales sin unidades.
- ✓ Magnitudes de caudales y datos numéricos amplificadas.

Ejemplo:

Pozo con caudal CPA 2.500 Lt/seg. - Caudal expediente 2,5 Lt/seg.

- ✓ Coordenadas inexistentes.
- ✓ Coordenadas fuera de área.
- ✓ Sistema de proyección y Datum no definidos.
- ✓ Magnitud de coordenadas erróneas.

Ejemplo:

Coordenada UTM Este con valor 5.629.583.000 (la magnitud Este debe estar cercana a cientos de miles, alrededor de 500.000 metros).

Coordenada UTM Norte con valor 674.587.000 (la magnitud Norte debe ser en millones de metros).

Cabe señalar que no todos los registros se encuentran asociados a coordenadas geográficas. Solo el 15% (7.852 registros) posee coordenadas en algún sistema geográfico, que representan el 87% de los expedientes obtenidos en la recopilación de antecedentes. Existe, por el contrario, otro 13% que no ha podido ser localizado al no contar con sus coordenadas.

Por otra parte, se encontraron errores de consistencia en la información, en los que se modificaban datos básicos para la interpretación de los registros (tipo de caudal,...)

La estructura general de los campos presentes en la BDD se muestra en la Figura 2-4:

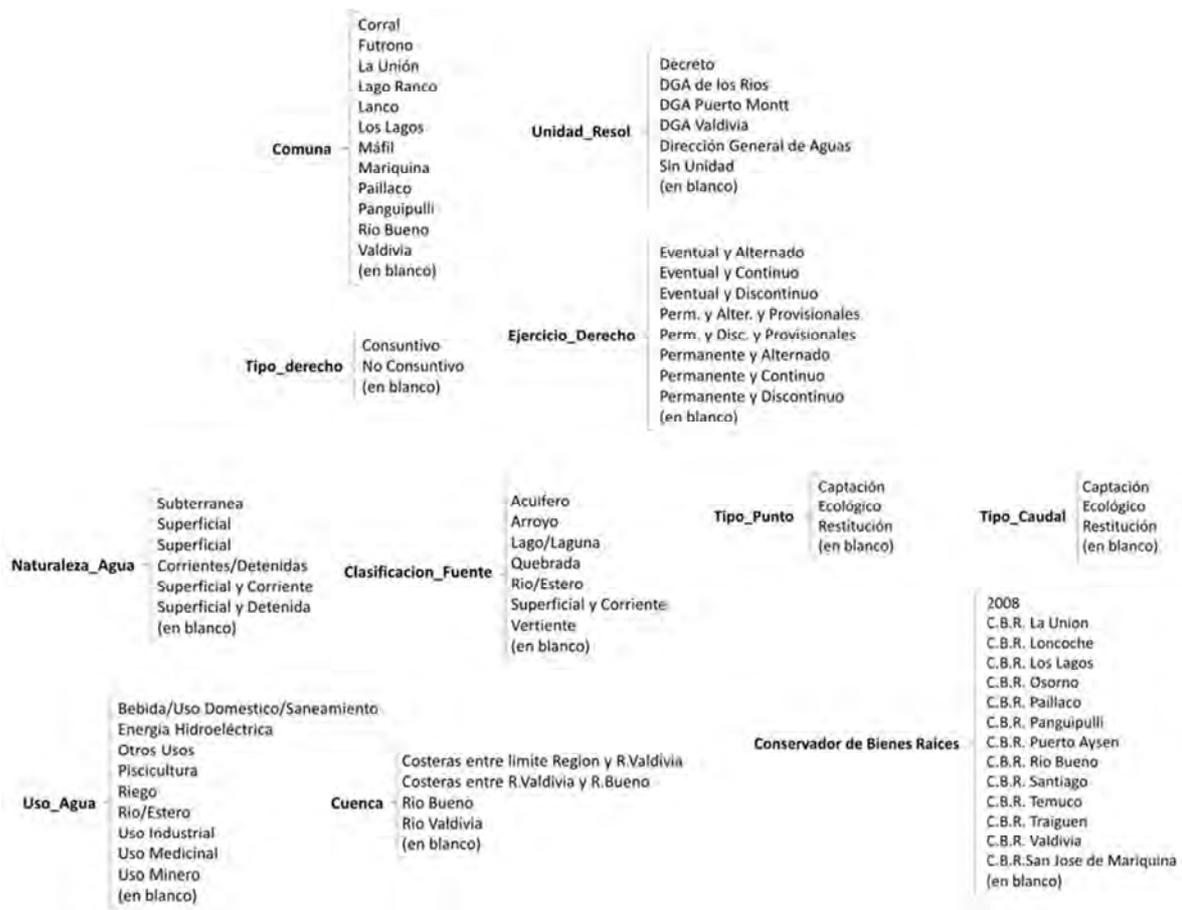


Figura 2-4. Estructura general de los campos presentes en la Base de Datos, previa a su depuración (Amphos 21)

2.1.4.2 Objetivos y alcance

Tras la sistematización y depuración de los datos de CPA, se incorporaron los datos validados en terreno (catastro) al set de datos existentes y verificados, en conjunto a los expedientes.

La totalidad de los datos recopilados han sido incorporados en una BDD tipo Access, pudiendo ser consultables y actualizados de forma continua, con la posibilidad de ser integrados en cualquier sistema de administración de base de datos.

2.1.4.3 Metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se realizaron los siguientes procedimientos:

2.1.4.3.1 Recopilación de antecedentes y archivos CPA

Se realizó la recopilación de los antecedentes disponibles en DGA relativos al Catastro Público de Aguas (CPA), esta información fue recibida en formato Excel en archivos de Derechos de Agua Concedidos (4) y Derechos de Agua en Trámite (4).

A su vez se recopilaron más de 9.000 archivos en formato digital, con información escaneada de Expedientes de Derechos de Agua, equivalente a más 60 Gb de información.

2.1.4.3.2 Unificación de información y formato

La información fue unificada en un único archivo, previa validación de los campos y tipos de datos presentes en cada planilla. Finalmente se creó un archivo con un total de 52.539 registros.

2.1.4.3.3 Verificación de errores lógicos

Tras analizar las inconsistencias en la información, se procedió a identificar los errores sistemáticos producto del copiado y pegado de diferentes fuentes, sin verificación previa de los datos. Estos constituyen caracteres numéricos no reconocidos, o valores numéricos con órdenes de magnitud mayores o menores que el dato real.

2.1.4.3.4 Jerarquización de errores presentes en la BDD

Dada la multitud de errores presentes en la BDD, se realizó una jerarquización de las variables más importantes, definiendo las de mayor interés en verificar.

Se determinó, en conjunto con el Inspector Fiscal, que 22 de los 41 campos existentes debían ser considerados en la BDD final. Los campos seleccionados son los siguientes:

Archivo, Nombre, Apellido_Paterno, Apellido_Materno, Código_Expediente, Nro_Sol, Comuna, Unidad_Resol, Fecha, Nro_Resol, Tipo_Derecho, Ejercicio_Derecho, Naturaleza_Agua, Uso_Agua, Tipo_Punto, UTM_Norte, UTM_Este, Huso, Datum_UTM, Tipo_Caudal, Mes, Caudal (Lt/seg).

De este grupo de variables se estableció que el Caudal Concedido era el campo de mayor importancia para la construcción de los balances y modelos, estableciendo la prioridad y orden de revisión de expedientes.

Posteriormente a la revisión de expedientes por caudales, se revisaron los registros y/o expedientes con coordenadas erróneas o con rango de datos diferentes a los UTM correctos para la zona en estudio.

2.1.4.3.5 Definición de estructura y modelo de datos

Tras el análisis de los campos de la BDD y su combinación, se concluyó la imposibilidad de dividir los datos en sub tablas funcionales al no existir 2 o más campos comunes que sean capaces de interrelacionarlas. Esto imposibilita realizar consultas de excesiva complejidad, pero siendo posible realizar otras más simples, reportes y formularios.

En aquellos casos en que el tipo derecho sea No Consuntivo, se han agregado los registros de Caudales de Restitución actualmente omitidos, en favor de registrar los datos necesarios al momento de generar consultas sobre los Derechos de Agua.

A su vez, en las situaciones en que exista más de un punto de captación (que comparta caudal o grupos de puntos con caudal autorizado en conjunto), se ha ingresado a cada punto el caudal promedio, de manera que la suma total de caudales sea coincidente con el expediente. Esto facilita la realización de operaciones matemáticas sobre los caudales, que de otra manera estarían sobredimensionados.

2.1.4.3.6 Depuración de datos mediante verificación de expedientes

Los datos han tenido que ser verificados, en su mayoría, a través de la revisión individual de los expedientes digitales. De esta forma se ha podido obtener una base de datos útil y funcional, que permita posteriormente la toma de decisiones.

Tras la verificación de los expedientes, se procedió al traspaso de los datos a una estructura final de BDD (Anexo C – Catastro Público de Aguas).

2.1.5 Análisis e interpretación de la información obtenida

La interpretación de los resultados se realizó a partir de la correlación de toda la información correspondiente a estudios previos de las cuencas principales de la Región de los Ríos, información obtenida de las estaciones meteorológicas y fluviométricas y de los datos obtenidos de las campañas de terreno realizadas.

Se ha realizado el análisis hidrológico donde se han revisado los datos de precipitaciones y temperatura de las estaciones pluviométricas de la DGA existentes en el área de estudio. Dichas estaciones se han correlacionado a fin de completar y rellenar la información. Para los caudales se han utilizado los datos de las estaciones fluviométricas de la DGA, analizando los caudales medios mensuales y medios anuales en los distintos cursos y puntos de las cuencas delimitadas. Por último se ha realizado una caracterización de la red de drenaje superficial y se ha actualizado un diagrama unifilar de los ríos y esteros.

También en esta Etapa 1 se ha trabajado sobre los acuíferos principales de la Región de los Ríos, específicamente en el acuífero sedimentario de la cuenca del río Valdivia, donde la demanda por derechos de aguas subterráneas ha aumentado considerablemente en los últimos años. Este estudio considera el levantamiento de información hidrogeológica de los acuíferos del río Valdivia, con el objeto de formular un modelo que represente los flujos del sistema hidrogeológico, priorizando la generación de un modelo conceptual más detallado para los respectivos rellenos sedimentarios.

2.1.6 Definición de componentes del modelo

Acorde con el trabajo realizado en la Etapa 1 anterior, se han definido los límites del modelo conceptual que incluye los acuíferos de la cuenca de Río Valdivia, estableciéndose la geometría en 3D, de las unidades hidrogeológicas que fueron identificadas y caracterizadas mediante sus parámetros hidráulicos.

1. Límites y geometría del basamento: Los límites y geometría del basamento se han definido en base a la prospección geofísica realizada entre agosto-septiembre de 2012, analizando sus resultados y realizando su interpolación en la cuenca del río Valdivia.
2. Caracterización de acuíferos principales: La caracterización consistió en la revisión de los antecedentes disponibles y una interpretación hidrogeológica en base a las columnas litológicas, antecedentes hidrogeológicos, geofísica, niveles de agua y ensayos de bombeo recopilados.

3. Límites y geometría del sistema acuífero: Los límites y geometría del acuífero han sido trazados considerando el mapa geológico trazado del Sernageomin (2003) y los mapas hidrogeológicos de la zona (Sernageomin, 2008), en consonancia con la distribución de los aprovechamientos de agua subterránea.
4. Parámetros hidrogeológicos del modelo conceptual: Para la estimación de los parámetros hidrogeológicos del medio acuífero se ha realizado una revisión de las pruebas de bombeo disponibles en la zona, procedentes de los Expedientes de Derechos de Agua e informes de construcción de APR y AP. Para el cálculo de la transmisividad se utilizó la siguiente fórmula:
5. Áreas de recarga y descarga: Se realizó una definición de las áreas de recarga y descarga en la cuenca del río Valdivia, tomando como eje principal las observaciones realizadas en terreno, acoplando esta información al análisis hidrológico e hidrogeológico, junto a la revisión de antecedentes.
6. Estimación de la recarga en la zona de estudio: La estimación de la recarga se ha realizado en base a la revisión bibliográfica, en función de los materiales a través de los que se produzca la infiltración, teniendo en consideración las zonas de recarga y descarga observadas.
7. Uso de agua y extracciones: La evaluación del uso del agua en la cuenca del río Valdivia se realizó a través del análisis del Catastro Público de Aguas (CPA) y las observaciones realizadas en la campaña de terreno. De ello se derivan datos importantes para la estimación del balance hídrico considerado en el Capítulo 2.7.
8. Condiciones de borde: Se han determinado en base a los contactos roca-relleno sedimentario de la cuenca, y los niveles del agua en los ríos, lagos y en el Océano Pacífico. Todo ello en base a los análisis realizados y expuestos en el presente documento.
9. Interacción río-acuífero: La interacción río-acuífero se ha analizado a través del catastro de terreno (observaciones de terreno) y la revisión del Catastro Público de Aguas.
10. Piezometría y dirección de flujo: El mapa piezométrico elaborado en el marco del presente estudio, es resultado de los trabajos de catastro de puntos de agua realizado entre los meses de septiembre-octubre de 2012. De esta manera se han considerado

todos aquellos pozos y norias encuestadas, en las que ha sido factible la medición del nivel freático.

2.1.7 Cuantificación del balance hídrico

Se ha propuesto un balance hídrico, en el que se han estimado las entradas y salidas del sistema acuífero, definiéndose las zonas donde se realizarán los balances y el método utilizado para la evaluación de cada componente.

Una tarea importante ha sido el establecimiento de la interacción entre las componentes superficial y subterránea del flujo. Esto se ha realizado mediante la integración y análisis de la información de:

- Catastro de puntos de agua (niveles freáticos y piezométricos).
- Caudales recopilados y aforados, cuyas entradas principales están dadas por las infiltraciones de lluvias y riego, así como las recargas difusas, laterales, fluviales y de canales, y de redes de agua potable y aguas servidas, y por las salidas dadas principalmente por los bombeos de los pozos, las recargas a ríos y esteros.
- Geometría de los acuíferos reconocidos (obtenida a través de la prospección geofísica)
- Estructuras geológicas que realicen un control sobre los cursos superficiales o que puedan establecer una condición de borde para los acuíferos.
- Observaciones de terreno.

Finalmente se ha combinado toda esta información para establecer el Funcionamiento del Sistema Acuífero del Río Valdivia.

2.1.8 Funcionamiento del modelo conceptual

A partir de los antecedentes generados en la etapa 1 y las actividades antes mencionadas en la etapa 2, se ha procedido a desarrollar el Modelo Conceptual Hidrogeológico de la cuenca del río Valdivia.

El modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero del río Valdivia explica el funcionamiento hidrogeológico, relacionando la recarga a los acuíferos, el flujo subterráneo y superficial, las descargas a los ríos o sistemas superficiales y las extracciones a través de los bombeos en pozos y norias.

Las condiciones de contorno se han definido de forma que no tengan ambigüedad en su definición ni parametrización. Estas condiciones de borde son entendidas como ajustadas a la realidad, de forma que permiten incorporar la variabilidad hidrológica en las zonas de entrada establecidas.

Por último mencionar que, se han determinado los valores de los parámetros de entrada al modelo, de acuerdo a los antecedentes y a toda la información recabada para este estudio en las actividades anteriores.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.2.1 Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio se encuentra en la Región de los Ríos. Este sector abarca la Cuenca Hidrográfica del Río Valdivia, comprendiendo la zona entre las coordenadas Norte= 5.562.615 y 5.649.337; y las Este=608.443 y 792.449 (en WGS84, 18S). Los límites son el Río Tolten y Bueno por el norte y sur respectivamente, el Océano Pacífico hacia el oeste, extendiéndose hasta la frontera con Argentina por el este (Figura 2-5). Los centros urbanos de mayor importancia corresponden a las ciudades de Valdivia, Lanco, San José de la Mariquina, Los Lagos, Panguipulli y Corral.

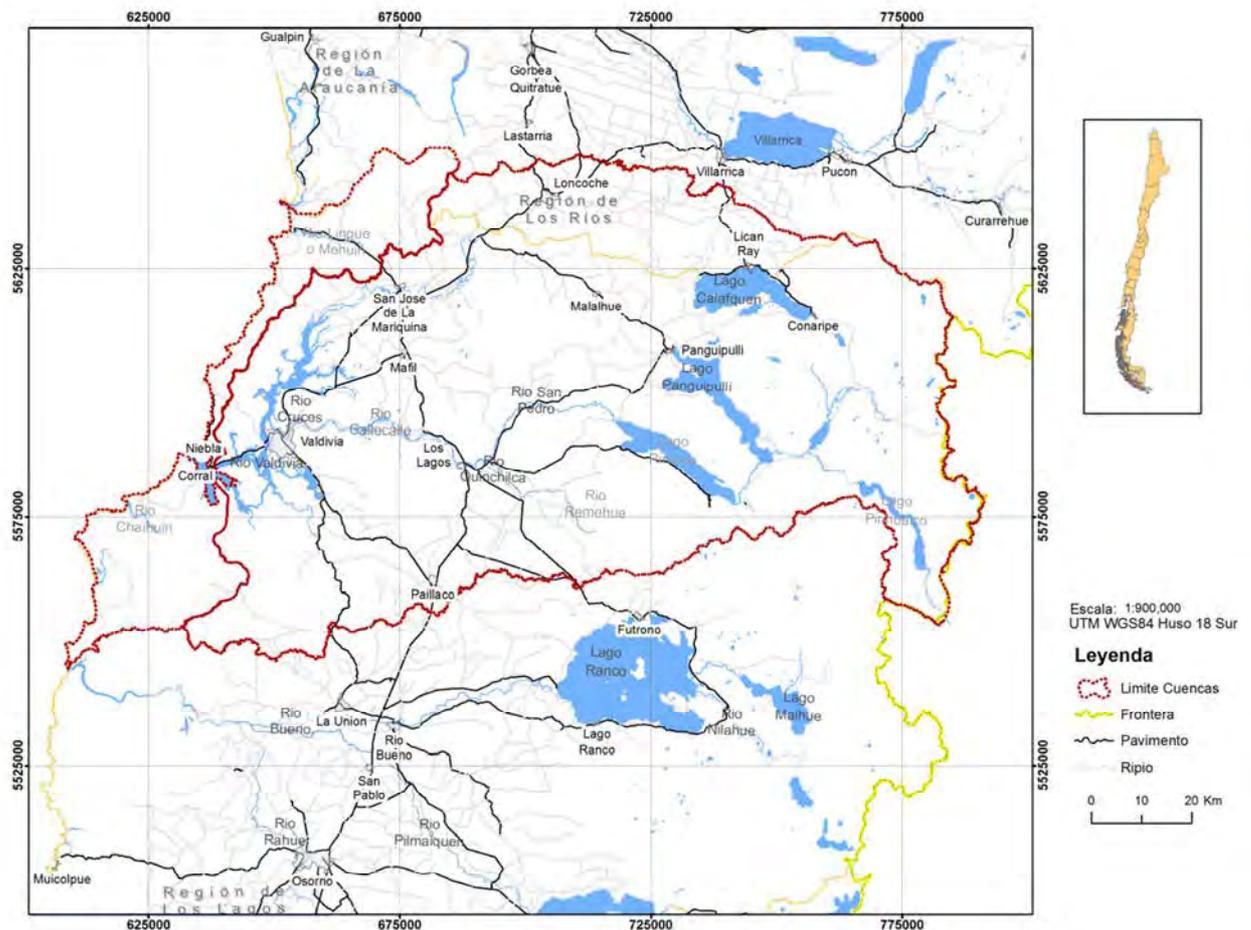


Figura 2-5. Localización de la zona de estudio. Elaboración: Amphos 21.

2.2.2 Geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico, existe una serie de elementos fisiográficos que se pueden identificar claramente. Los grupos principales son:

- Cordillera de los Andes volcánica activa.
- Precordillera morrénica.
- Depresión Intermedia o Llano Central con Morrenas y Conos.
- Cordillera de la Costa.
- Planicies Litorales.

La cordillera volcánica activa se caracteriza por la presencia principalmente de sierras y cordilleras que se empinan entre los 1.000 y 1.600 msnm. Se define como un relieve fuertemente rebajado por la erosión de los glaciales y ríos. La morfología dominante de la cordillera volcánica activa corresponde a los nevados conos volcánicos que en forma aislada se levantan al extremo oriental de los grandes lagos (volcán Choshuenco, 2.415 msnm).

La Precordillera, posee un carácter de acumulación de sedimentos fluvio - glaciovolcánicos. En esta zona se presenta como formas del relieve de lomas sometidas a una intensa acción erosiva lineal por los cuerpos fluviales y lacustres. La depresión Intermedia presenta una topografía fuertemente ondulada y los ríos se profundizan creando los sistemas aluviales.

Las Planicies Litorales de sedimentación fluvio marina en esta zona se presentan muy estrechas e interrumpidas por un muro costero que se empina sobre los 600 m de altitud (Cerro Oncol, 715 msnm).

2.3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

El análisis hidrológico de la zona de estudio se ha basado en la información de las estaciones meteorológicas de la Dirección General del Agua (Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Estaciones representativas en la zona de estudio (Amphos 21).

Código	Nombre Estación	UTM X	UTM Y	Elevación
		(WGS_84_18S)	(WGS_84_18S)	m.s.n.m.
10141001-3	Catamutún	655929	5552229	129
10106001-2	Coñaripe	757230	5615158	472
10312001-2	El Llolly	703227	5562060	209
10137002-K	Huichaco	693552	5602239	96
10106002-0	Lago Calafquén	744727	5618651	337
10111002-8	Lago Riñihue	717709	5594340	451
10102002-9	Liquiñe	769927	5597774	651
10123004-K	Llancahue	655804	5586625	63
10100004-4	Pirihueico en Pirihueico	779749	5564596	824
10134002-3	San José Mariquina	680524	5619832	19

Para completar y extender las estadísticas de las estaciones incompletas en la cuenca se realizaron correlaciones lineales (Gumbel y Goodrich, dobles acumuladas y correlación ortogonal), con diversas estaciones base donde se disponía de series más extensas y completas.

2.3.1 Climatología

La zona de estudio se caracteriza por presentar dos regímenes claramente definidos: el Clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea (en el sector centro y bajo de la cuenca) y Clima templado frío lluvioso con influencia mediterránea (sector precordillerano de la cuenca):

- ✓ Clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea: se caracteriza por presentar precipitaciones a lo largo de todo el año aunque los meses de verano presentan menor pluviosidad que los meses invernales. Las temperaturas no sufren una gran variación por latitud, siendo la unidad térmica y lo poco significativo de las oscilaciones, una notable característica de este clima (Figura 2-7).

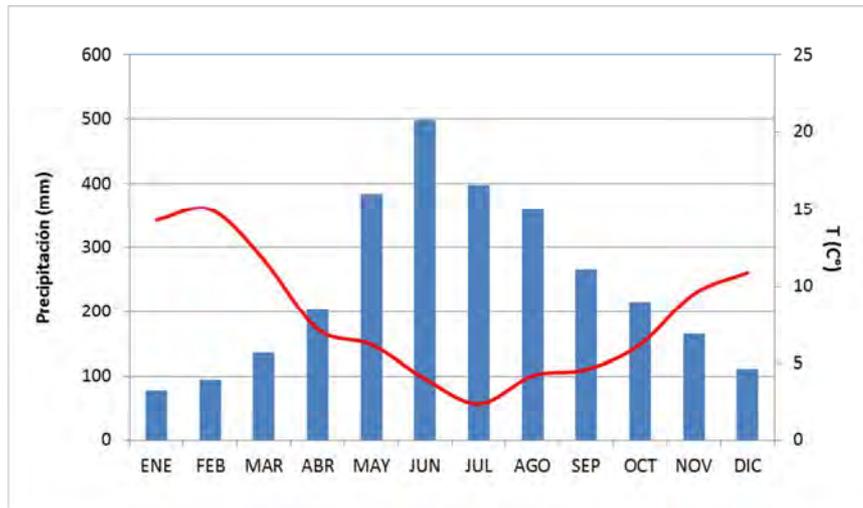


Figura 2-7 Figura con las precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) medias mensuales (basado en las estaciones meteorológicas del sector precordillerano de la cuenca).Elaboración: Amphos 21.

- ✓ Clima templado frío lluvioso con influencia mediterránea: se caracteriza por las bajas temperaturas durante todo el año y el aumento de las precipitaciones con la altura, las cuales llegan a los 3.000 mm anuales, sobre los 1.200 msnm (Figura 2-8).

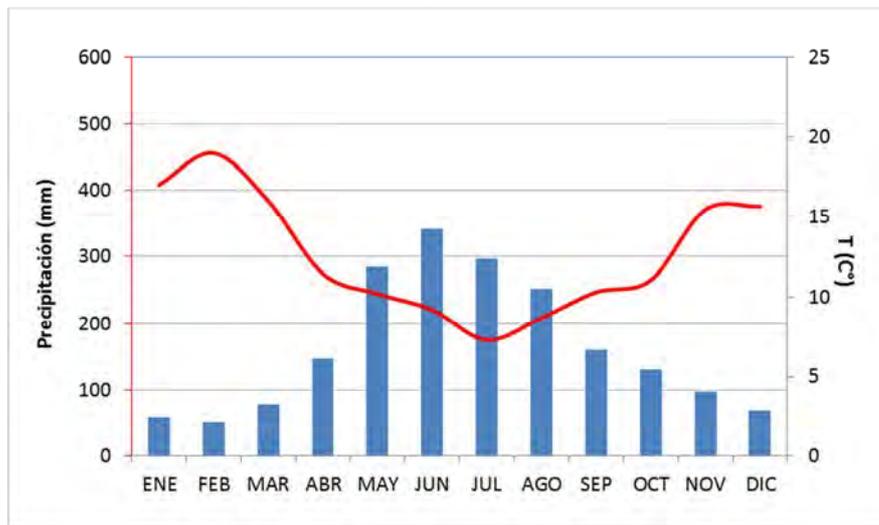


Figura 2-8 Figura con las precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) medias mensuales (basado en las estaciones meteorológicas del sector centro y bajo de la cuenca). Elaboración: Amphos 21.

2.3.2 Temperatura

Las temperaturas mínimas se alcanzan durante los meses de junio, julio y agosto. Dentro de las cuencas precordilleranas la diferencia entre la temperatura máxima absoluta y mínima absoluta alcanza hasta los 20°C (entre 18°C y -3°C), especialmente en estos meses más fríos. La media del mes más cálido supera los 10°C.

Se dispone de la información de la temperatura mensual de algunas estaciones de la cuenca hasta el 2011 por lo que se ha actualizado las isotermas del mapa hidrogeológico de Chile de 1987 correspondientes a la zona de estudio (Figura 2-9).

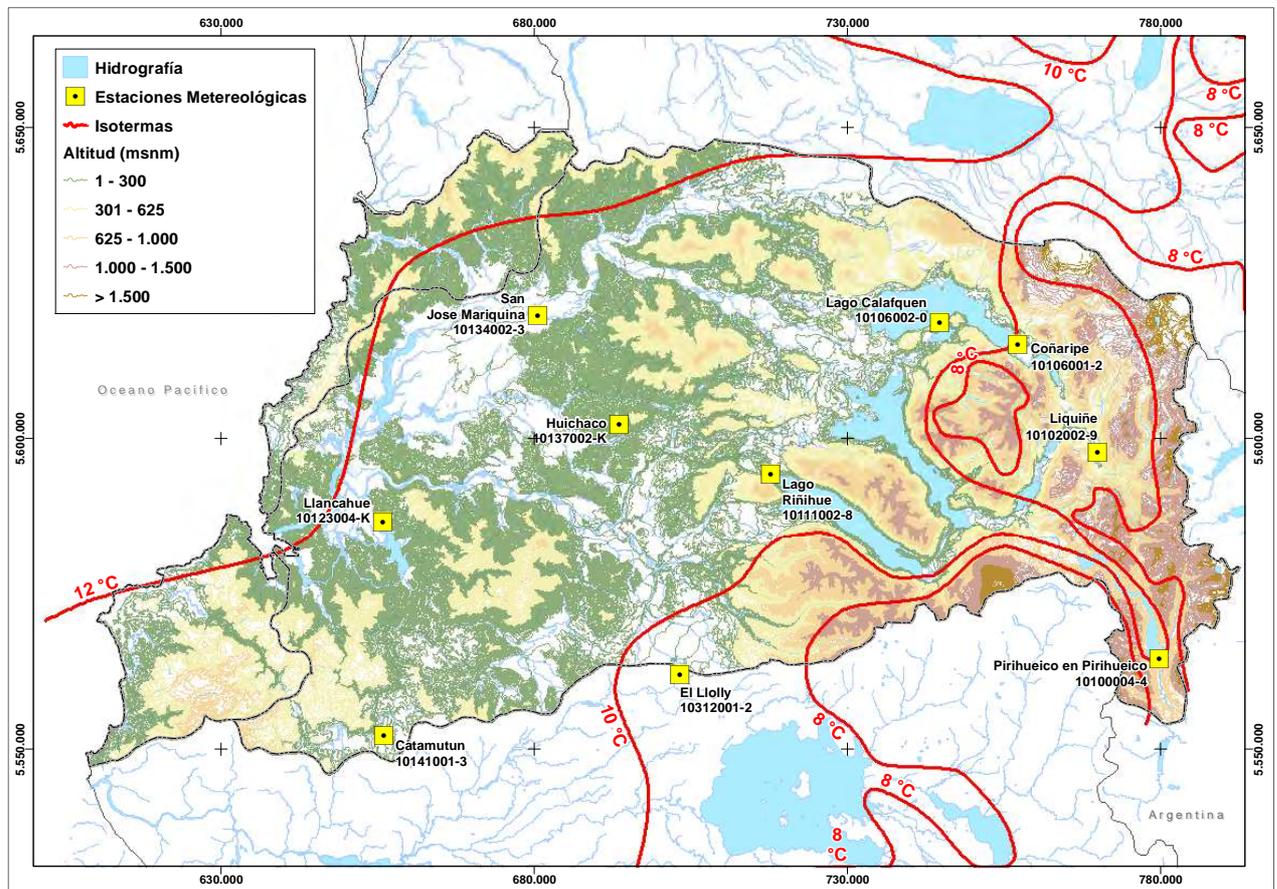


Figura 2-9. Distribución de las isotermas en la Cuenca de Valdivia. Elaboración: Amphos 21.

2.3.3 Régimen de precipitaciones

Para conocer la variabilidad espacial y temporal del régimen de precipitación, se han calculado las curvas de desviación acumulada de las estaciones mencionadas en la Tabla 4.1. Dichas curvas se han interpretado con el programa HIDROBAS 3 definiendo los años tipo, dando los valores mensuales de precipitación u otro parámetro climático característico de cada uno de ellos (Anexo D – Análisis hidrológico).

A partir del análisis de las precipitaciones mensuales acumuladas durante 36 años (1976 – 2012) en la estación Llancahue (próxima a Valdivia), y de 15 años en el resto de las estaciones, se han establecido una serie de ciclos secos, medios y húmedos. En la Figura 2-10 se muestra las precipitaciones de 10 estaciones pluviométricas que se encuentran en la cuenca de estudio. A partir de estas gráficas se han obtenido las siguientes conclusiones:

- En general, las estaciones estudiadas indican un comportamiento cíclico de periodos secos y húmedos.
- Las estaciones localizadas en el sector precordillerano (Lago Calafquen, Coñaripe, Liquiñe y Pirihueco) presentan regímenes de precipitación más similares, observándose un ciclo seco desde el 1997 hasta el 1999 (coincidiendo con la sequía de 1998 y 1999). Posteriormente se sucede un periodo húmedo que abarca hasta finales de 2006 y a partir del 2007 comienza un ciclo seco que continua en la actualidad.
- En la estación de Llancahue se dispone de información pluviométría desde 1976, por lo que se pueden observar sucesivos ciclos seco-húmedo-seco.
- Las estaciones San José de Mariquina, Huinaco, Catamutún y El Llolly con datos de precipitación 1995-2011 reflejan dos periodos: uno seco desde 1995 hasta 2001 y otro bastante húmedo que va cambiando la tendencia a medio-seco en los últimos años.

La zona de estudio pasa constantemente por períodos en que se presenta un superávit o, por el contrario, un déficit en las precipitaciones, cuestiones que están relacionadas con la presencia de dos ciclos o corrientes marinas, El Niño y La Niña, respectivamente. Cuando ocurre este último fenómeno, se viven intensas sequías en la nación austral, las que afectan fuertemente a dos sectores vitales de la economía chilena: la agricultura, actividad económica fundamental en el centro-sur del país, y la generación de energía eléctrica.

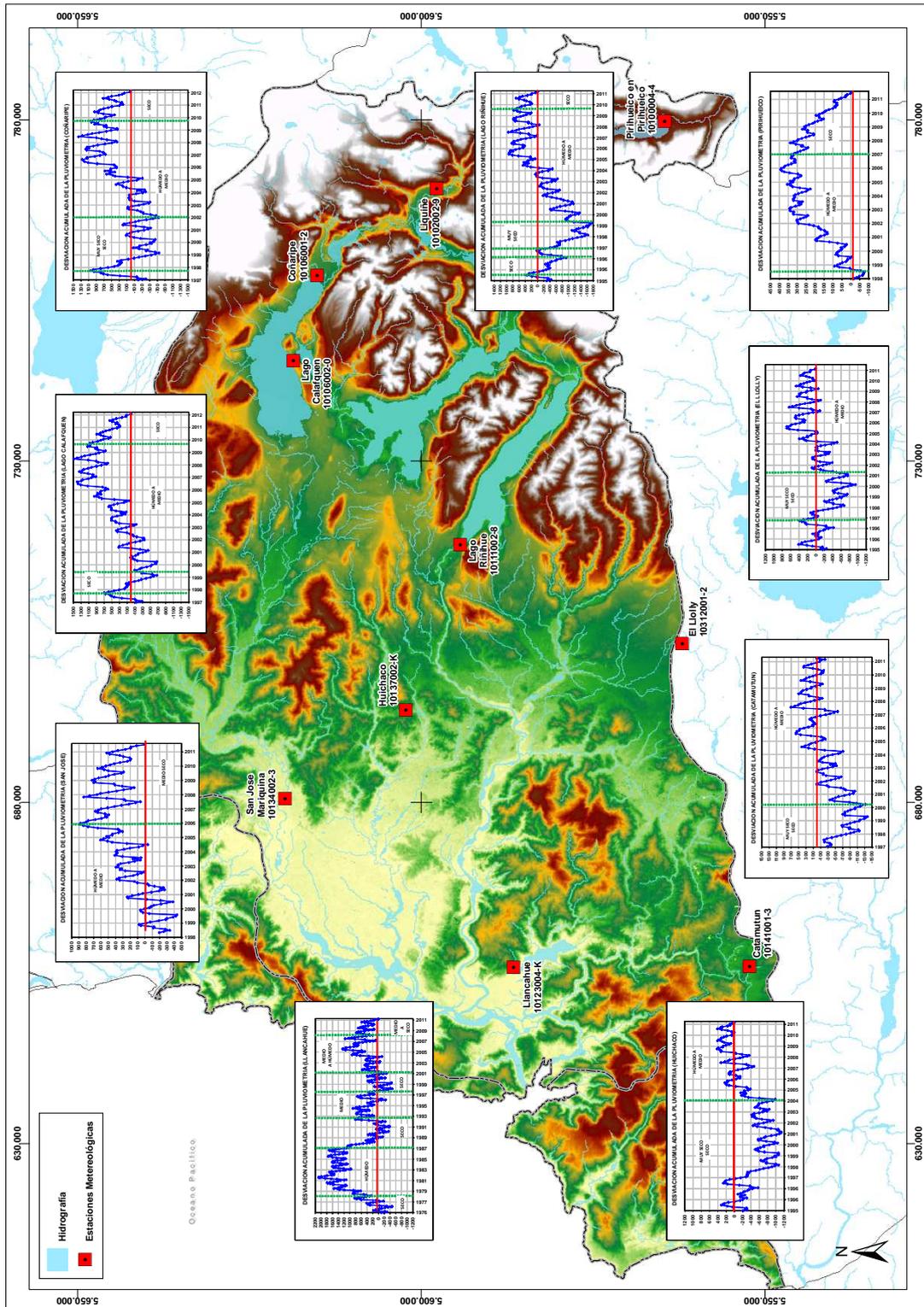


Figura 2-10 Curvas de la desviación acumulada anual de la precipitación distribuidas en la Cuenca. Elaboración: Amphos 21.

En la Figura 2-11 se representa la variación temporal de la precipitación media mensual durante los años indicados. En esta se puede observar con claridad las dos estaciones definidas. Los años promediados son los siguientes:

- Estación Catamutún: 1997-2012.
- Estación Coñaripe: 1997-2012.
- Estación El Lolly: 1995-2012.
- Estación Huichaco: 1995-2012.
- Estación Lago Calafquen: 1997-2012.
- Estación Lago Riñihue: 1995-2012.
- Estación Liquiñe: 1994-2012.
- Estación Llancahue: 1976-2012.
- Estación Pirihueico en Pirihueico: 1998-2012.
- Estación San José Mariquina: 1997-2012.

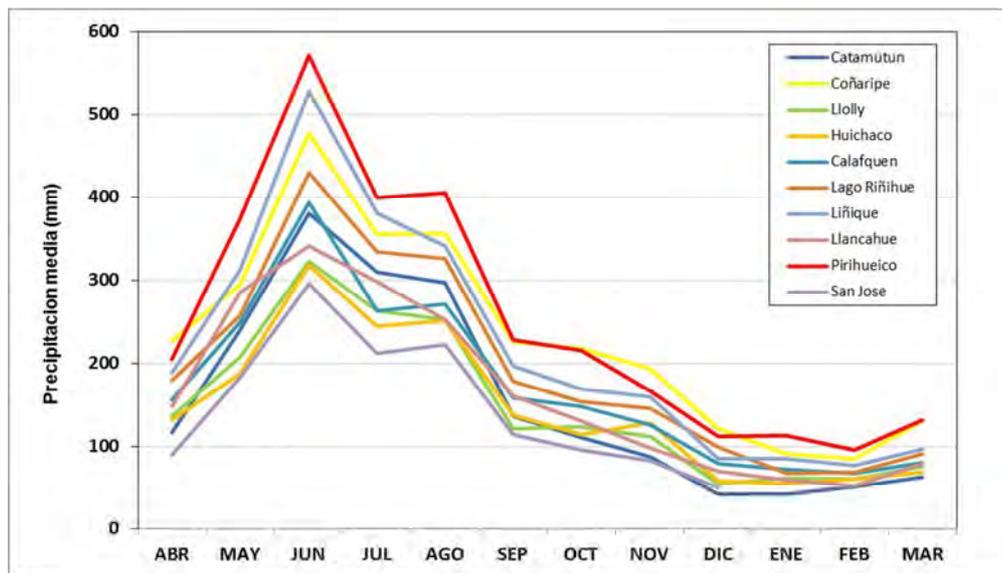


Figura 2-11 Precipitación media mensual en estaciones meteorológicas de la cuenca. Elaboración Amphos 21.

Según las estaciones meteorológicas estudiadas, la cuenca se caracteriza por presentar dos regímenes pluviométricos anuales claramente definidos:

- El primero, más seco, que se produce entre los meses de noviembre a abril.
- El segundo, muy húmedo, comprendido entre los meses de mayo a octubre.

En la cuenca del río Valdivia se ha realizado una regresión con datos de las estaciones y se estima un gradiente de precipitación de 170 mm cada 100 m ($P = 1,766E + 1579,7$). En la Figura 2-12 se muestra la relación de la precipitación con la altitud, donde se ha actualizado la gráfica con valores de precipitación anual (mm) durante el periodo 1995 - 2011.

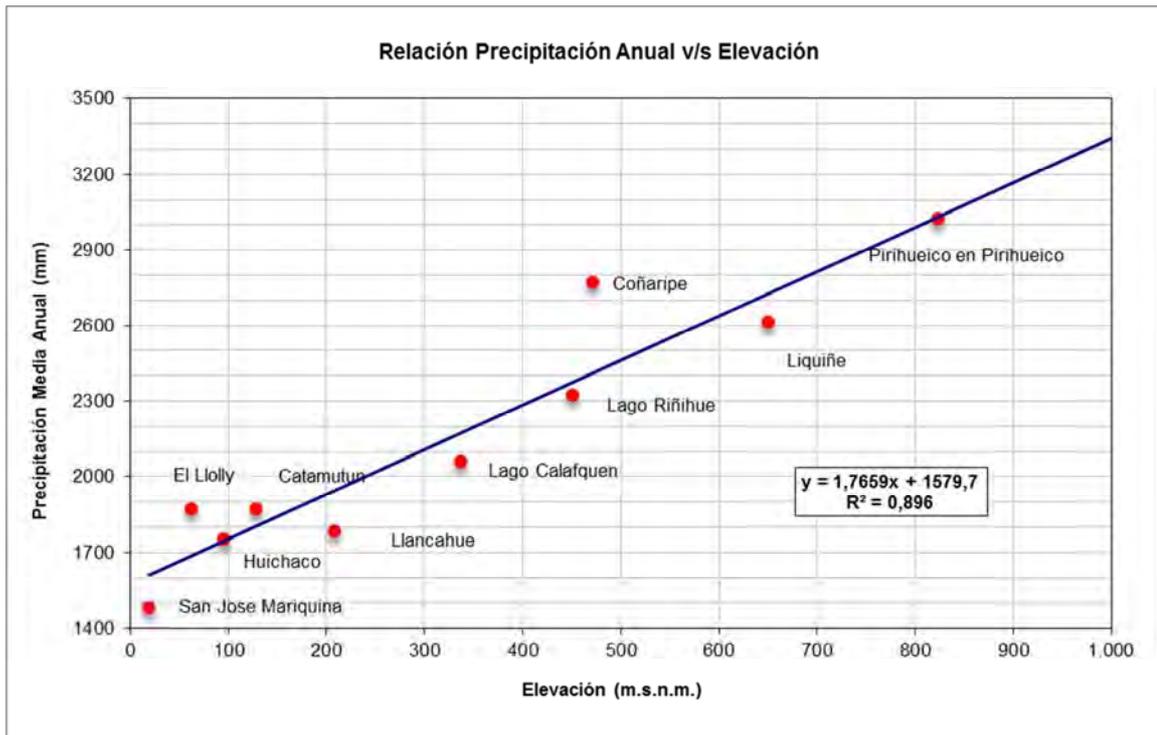


Figura 2-12 Relación de la precipitación anual y la elevación (periodo 1995-2011). (Amphos 21).

2.3.4 Evapotranspiración real

La evapotranspiración real tomada de Balance Hidrológico (1987) presenta en las zonas de menor altitud de la cuenca valores medios de 600 mm/año, y en las zonas más elevadas, con altitudes que oscilan entre los 1.500 y 2.000 m, valores medios de ETR de 500 mm/año.

2.3.5 Análisis de la información Fluviométrica

La cuenca del río Valdivia está compuesta principalmente por las subcuencas de los ríos Cruces y Calle-Calle. El río Cruces nace en la parte noreste de la cuenca, en la vertiente occidental de los cerros situados entre los lagos Villarrica y Calafquén, para luego tomar un curso suroriental hasta la confluencia con el río Calle Calle, dando origen al río Valdivia, en la ciudad homónima. Por su parte, la subcuenca del río Calle Calle, la cual corresponde a una hoya trasandina, se origina en el extremo poniente del lago Lacar, en el nacimiento del río Huahum, en territorio argentino. La parte de esta subcuenca que se ubica en territorio nacional abarca desde el paso internacional Huahum hasta la confluencia del Calle Calle con el río Cruces. En la parte alta de esta subcuenca existe un número importante de grandes lagos conectados entre sí, entre los cuales destacan los lagos Calafquén, Pirihueico, Neltume, Panguipulli y Riñihue (Figura 2-13).

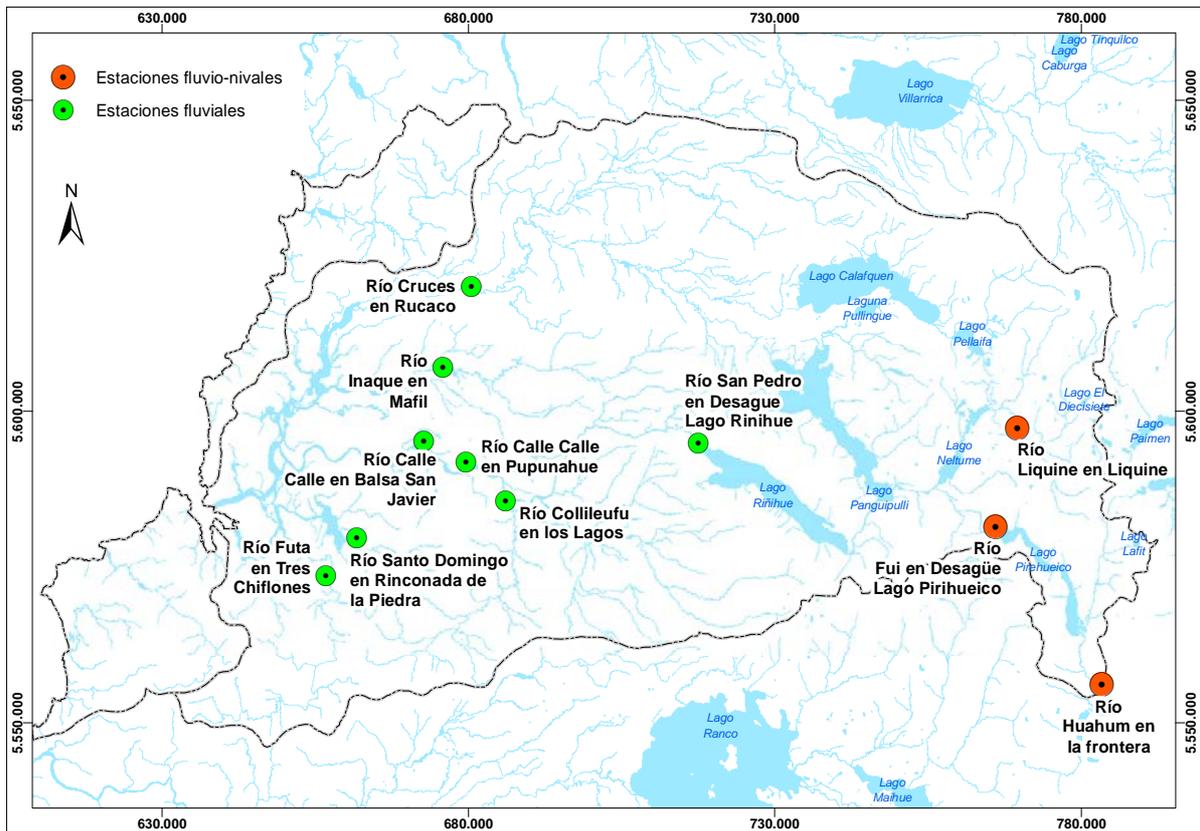


Figura 2-13. Localización de las Estaciones Fluviométricas interpretadas en la Cuenca. Amphos 21.

En el análisis de la información hidrológica la información utilizada para la realización del presente estudio hidrológico ha sido proporcionada por el Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH) de la Dirección General de Aguas (Tabla 2-2):

Tabla 2-2. Estaciones Fluviométricas interpretadas de la Cuenca del río Valdivia

Nombre	Código	UTM X (WGS_84_18S)	UTM Y (WGS_84_18S)	Tipo	Información	Estado
Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico	10100002-8	766.000	5.581.516	Pluvio-nival	2003 - 2011	Vigente
Río Liquine en Liquine	10102001-0	769.615	5.597.417	Pluvio-nival	1992 - 2011	Vigente
Río Huahum en la frontera	10100006-0	783.377	5.556.216	Pluvio-nival	2002 - 2011	Vigente
Río Santo Domingo en Rinconada de la Piedra	10140001-8	661.724	5.579.662	Pluvial	1992 - 2011	Vigente
Río San Pedro en Desagüe Lago Rinihue	10111001-K	717.535	5.595.024	Pluvial	1986 - 2011	Vigente
Río Collileufu en los Lagos	10121001-4	686.049	5.585.702	Pluvial	1987 - 2011	Vigente
Río Calle Calle en Balsa San Javier	10122001-K	672.712	5.595.270	Pluvial	1987 - 2008	Suspendida
Río Calle Calle en Pupunahue	10122003-6	679.559	5.591.843	Pluvial	2007 - 2011	Vigente
Río Cruces en Rucaco	10134001-5	680.434	5.620.080	Pluvial	1970 - 2011	Vigente
Río Inaque en Mafil	10137001-1	675.840	5.607.137	Pluvial	1987 - 2011	Vigente
Río Futa en Tres Chiflones	10142003-5	656.736	5.573.671	Pluvial	2002 - 2011	Vigente

En general esta cuenca presenta un régimen pluvial, salvo los ríos Liquiñe, Huahum y Fui, que presentan leves influencias nivales, mostrando un régimen pluvio - nival. Para el análisis hidrológico se han utilizado dos grupos de estaciones, donde el primero es de régimen pluvial, y el segundo de régimen pluvio - nival.

- ✓ **Grupo 1. Régimen Pluvial:** compuesto por las estaciones fluviométricas que coinciden con el sector medio y bajo de la cuenca. En la Figura 2-14 se observa que las estaciones del río Calle-Calle y San Pedro en desagüe del Lago Rinihue, presentan caudales más elevados que el resto. La distribución estacional muestra un comportamiento similar al régimen de las precipitaciones estudiado.

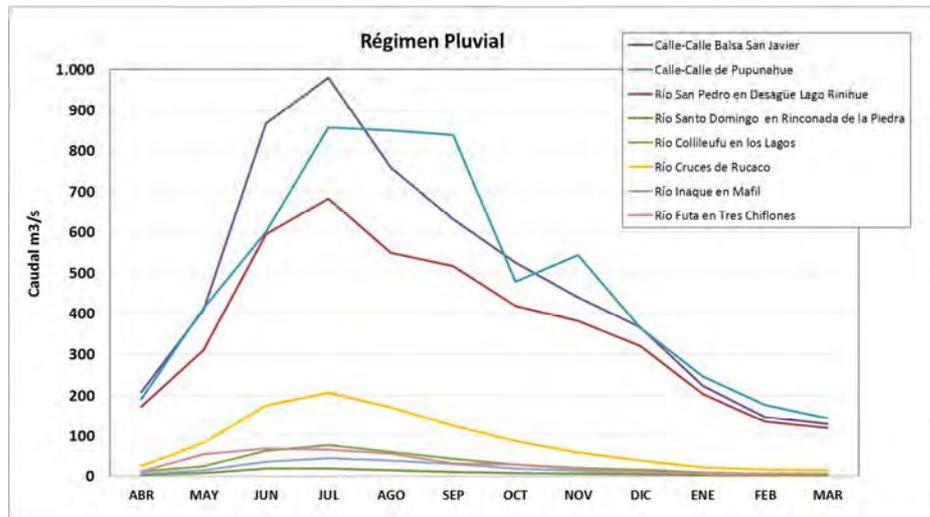


Figura 2-14 Variación media mensual de las estaciones pluviales. Elaboración Amphos 21.

- ✓ **Grupo 2. Régimen Pluvio - Nival:** Este grupo está formado por las estaciones fluviométricas Liquiñe en Liñique, el río Huahum en la frontera y Río Fui en Desagüe Lago Pirihueico ubicadas en las partes más altas de la cuenca (Figura 2-15)

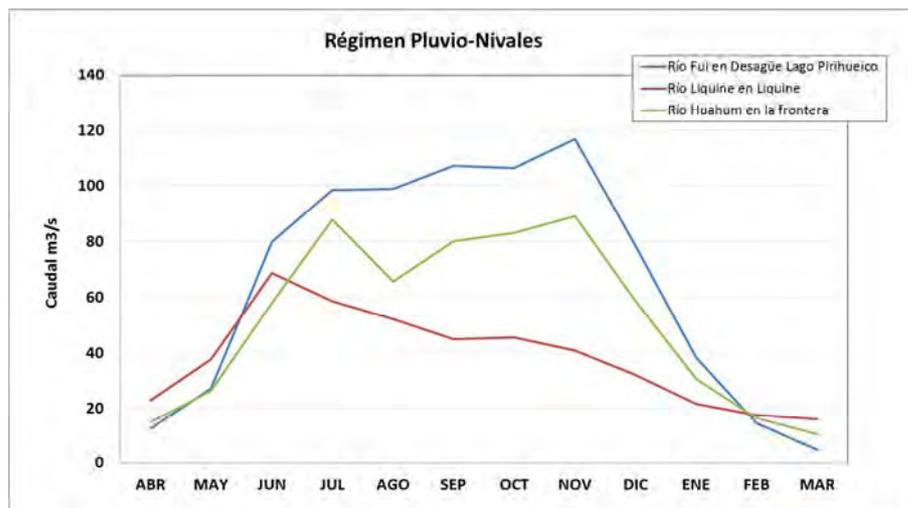


Figura 2-15 Variación media mensual de las estaciones pluvio-nivales. Elaboración Amphos21.

2.3.6 Actualización de los límites de las cuencas y subcuencas

La forma de una superficie determina el modo en que el agua pueda fluir a través de la misma. Las herramientas de análisis hidrológico de ArcGIS (ArcHydro 2.0) proveen un método que permite describir las características físicas de una superficie. Utilizando un modelo de elevación digital (DEM), es posible delinear un sistema de drenaje y cuantificar las características del sistema.

Las cuencas pueden ser delineadas automáticamente a partir del DEM, utilizando como entrada la información de dirección de flujos, lo cual posibilita conocer el área de contribución de agua. Asimismo, a partir de la cuenca río de Valdivia dada, ha sido factible actualizar las delineaciones de las subcuencas.

A continuación en la Figura 2-16 de exponen los nuevos límites de la cuenca río de Valdivia y la actualización de las subcuencas que la integran.

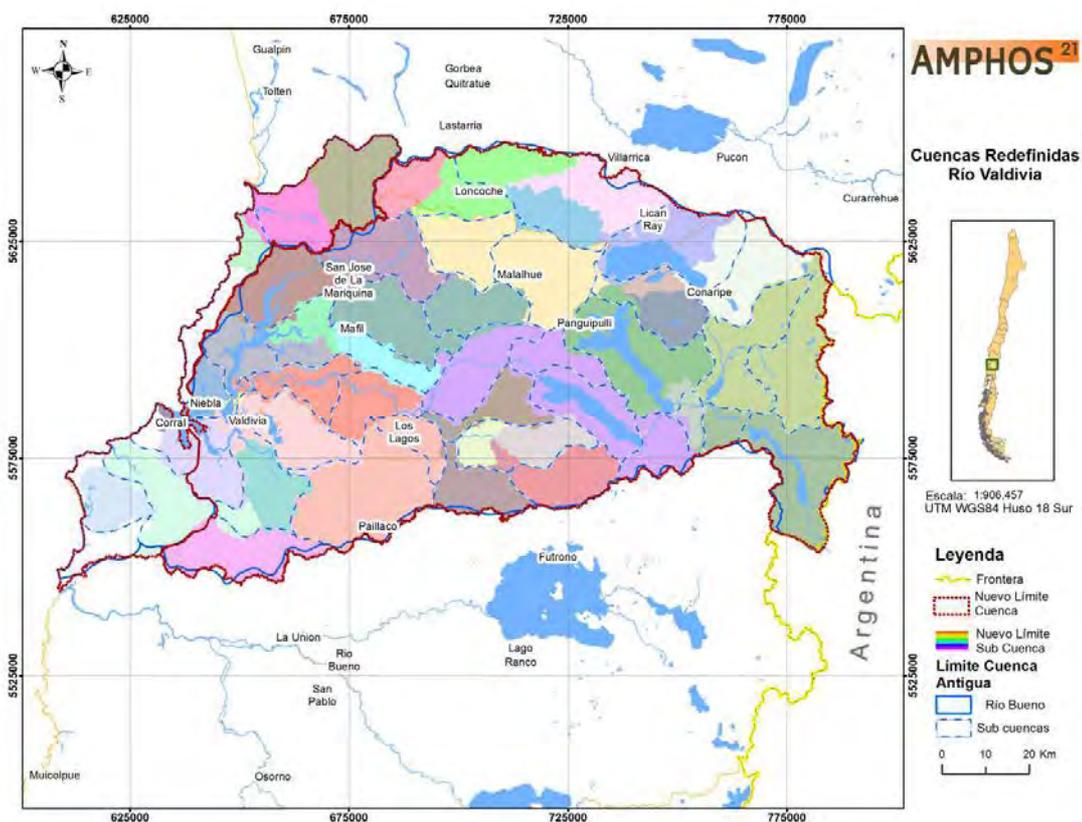


Figura 2-16. Actualización de los límites de las Cuencas y subcuencas de la cuenca río Valdivia. Elaboración Amphos 21.

2.3.7 Red de drenaje y Diagramas unifilares

Una de las principales características de la geografía de la región de los ríos corresponde a sus cursos hidrográficos. La región posee alrededor de 6.900 km de ríos y esteros destacando entre ellos los ríos Valdivia, Cruces y Calle-Calle, entre otros. Además, presenta una serie de lagos y lagunas, las cuales cubren alrededor de 380 km² de extensión, siendo el Lago Calafquén el más extenso de la Cuenca del Río Valdivia.

El río Valdivia es la unión del río Cruces que proviene del norte de la Región de Los Ríos y nace a partir de Esteros y quebradas; y el río Calle-Calle cuyas aguas provienen principalmente de los lagos Riñihue, Panguipulli y Calafquén.

De acuerdo con la hidrografía de la cuenca del río Valdivia, se han desarrollado dos diagramas unifilares de los ríos de Calle-Calle y Cruces. Estos se entregan de forma gráfica en las Figura 2-17 y Figura 2-18.

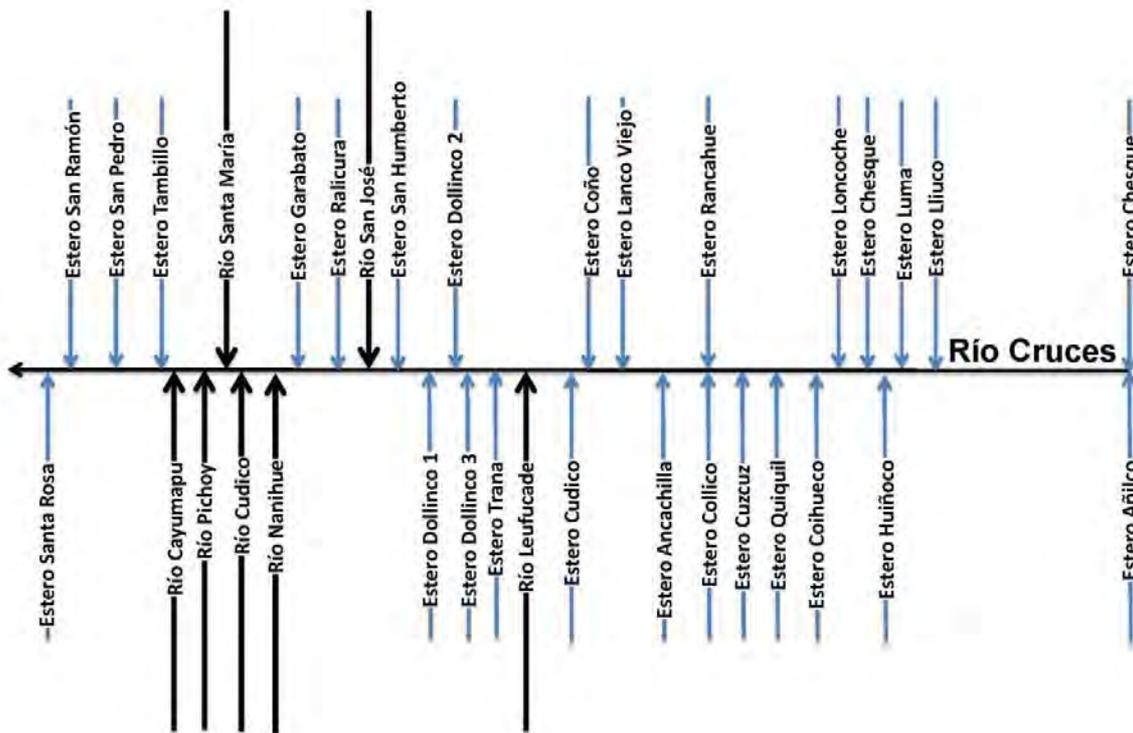


Figura 2-17 Diagrama unifilar río Cruces. Elaboración Amphos 21.

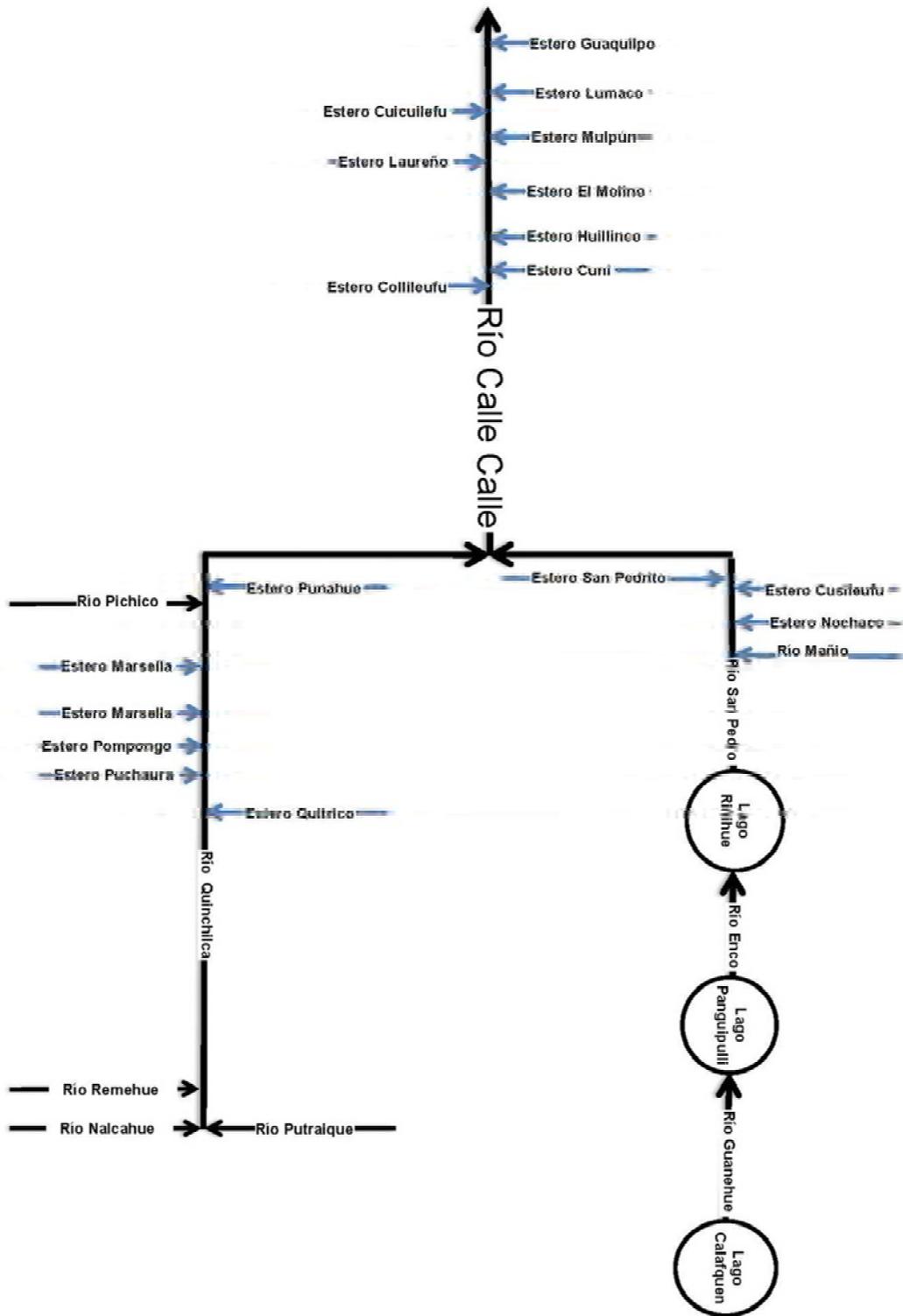


Figura 2-18 Diagrama unifilar río Calle Calle. Elaboración Amphos 21.

2.4 MARCO GEOLÓGICO

2.4.1 Geología general

La Región de los Ríos y parte Norte de la región de los Lagos presentan un conjunto de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de edades que fluctúan entre Paleozoico superior y Holoceno. Hacia el W, se presenta un basamento metamórfico del Paleozoico-Triásico perteneciente al Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM) o Serie Oeste que forma casi en su totalidad la Cordillera de la Costa con rocas sedimentarias Cenozoicas subordinadas. El valle central se encuentra constituido por rocas sedimentarias y volcánicas Cenozoicas, además de presentar depósitos sedimentarios glaciares, fluviales, glaciofluviales y piroclásticos Cuaternarios. Hacia el oeste constituyendo la Cordillera de los Andes se encuentran Rocas intrusivas graníticas y volcánicas Paleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas (Figura 2-19 y Anexo E – Mapa Geológico).

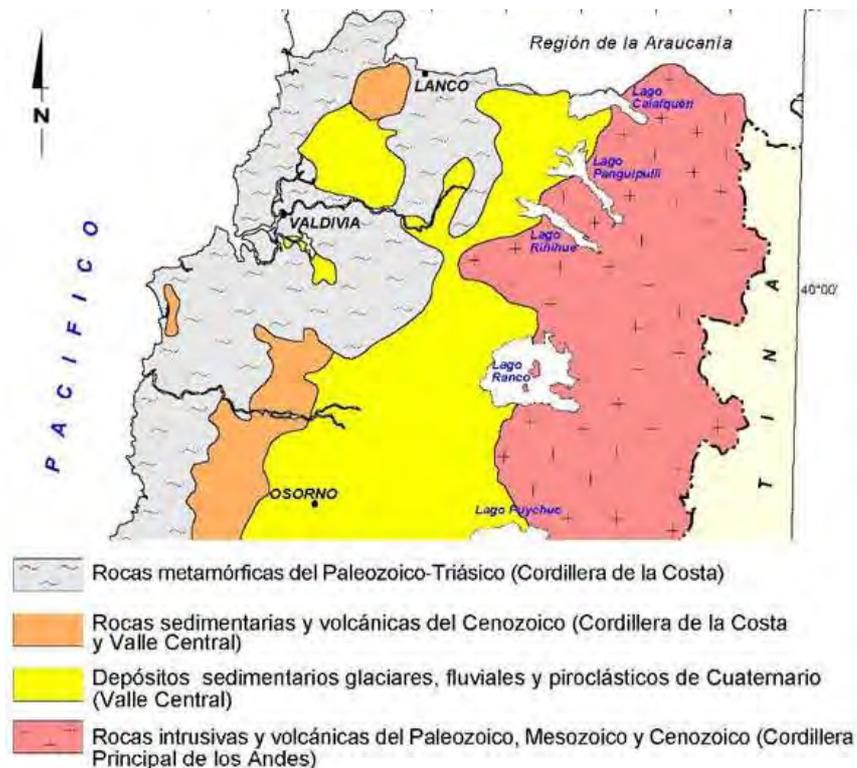


Figura 2-19. Contexto Geológico de la región de Los Ríos y Los Lagos (Sernageomin, 2002).

La zona entre los 38°-42° S presenta todos los rasgos generales de un sistema de arco volcánico de borde continental: una fosa oceánica, un arco externo no-volcánico (Cordillera de la Costa), una depresión central y un arco interno volcánico (Cordillera de los Andes). Otras características, como por ejemplo, la existencia de rocas metamórficas de alta P/T en el arco externo y de baja P/T en el arco interno. La ubicación de focos sísmicos principalmente en el arco externo y la distribución de fuentes termales y de volcanismo en el arco interno, son típicas de una estructura de esa naturaleza (Kaizuka, 1975).

El CMBM que corresponde a un prisma de acreción en la costa, se encuentra intruido por las granodioritas Chaihuín, Oncol y dacitas Laurel del Cretácico. La cuenca de antearco de Valdivia está compartimentada por los depocentros de San José de la Mariquina y Valdivia, desarrollados en paleovalles fluviales estrechos, determinados por una tectónica de fallas normales e inversas y rellenados por fangolitas y areniscas ricas en material orgánico carbonoso, con intercalaciones de mantos de carbón pertenecientes a los Estratos de Pupunahue-Catamutún, del Oligoceno-Mioceno, que subyace a las fangolitas y areniscas con fósiles marinos de la Formación Santo Domingo, del Mioceno. Estos depocentros se encuentran parcialmente unidos por depósitos del Pleistoceno Medio: morrénicos (gravas y arenas en matriz arenosa fuertemente oxidada) de la Glaciación Río Llico, y glaciafluviales (arenas, limos y gravas) de la Glaciación Santa María; depósitos del Pleistoceno Superior: fluvioestuarinos (arenas, limos, arcillas y gravas, con fósiles marinos y turba intercalados) del último interglacial, y glaciafluviales (gravas y arenas) de la Glaciación Llanquihue; y depósitos del Pleistoceno y/o Holoceno fluviales y de playa, con gravas y arenas. (McDonough, et al, 1998).

2.4.2 Estratigrafía de la zona de estudio

En términos generales, se han identificado las siguientes formaciones: depósitos no consolidados del Pleistoceno-Holoceno de origen glacial, fluvial, fluvioestuarino, litoral, eólico, entre otros; productos volcánicos del Pleistoceno-Holoceno; rocas sedimentarias marinas y continentales del Oligoceno- Plioceno; rocas intrusivas del Paleozoico, Jurásico, Cretácico y Mioceno; y rocas sedimentarias y metamórficas del Paleozoico-Triásico. Las principales litologías presentes en la XIV Región de Los Ríos se describen a continuación.

2.4.2.1 Depósitos no consolidados

2.4.2.1.1 Fluviales (Holoceno)

Compuesto por arenas y gravas bien seleccionadas, con clastos redondeados a sub redondeados, de aspecto fresco. Las arenas son de grano medio a fino, generalmente con estratificación planar horizontal y, menos frecuentemente, estratificación cruzada. Algunos sectores muestran gravas y ripios, en parte clasto soportadas, con matriz de arena gruesa, imbricación de clastos y, en algunos casos, gradación normal hasta arena fina y limo. Estos depósitos exhiben estructuras de canales y barras, además de secuencias alternadas de gravas y arenas. Los depósitos acumulados en valles planos con cursos de ríos meandriformes, muestran facies de llanura de inundación, principalmente arenas de grano fino asociadas con abundante materia vegetal.

Ocupan los lechos de cursos fluviales mayores y la terraza más baja de algunos ríos.

2.4.2.1.2 Deltaicos (Holoceno)

Gravas bien seleccionadas y estratificadas, con clastos sub redondeados a bien redondeados. La estratificación, decimétrica, es granodecreciente y presenta intercalaciones lenticulares de arena. Conforman abanicos, cuya inclinación es menor que 10° , que se ubican en la desembocadura de los ríos Enco, Llanquihue y Guanehue en los lagos Riñihue y Panguipulli. Aguas arriba de los cauces que los generan se interdigitan con depósitos fluviales.

2.4.2.1.3 Fluviales (Pleistoceno Superior-Holoceno)

Arenas y gravas, de moderada a buena selección, con clastos redondeados a subredondeados. Se presentan en terrazas de hasta 25 m de altura sobre el lecho de los actuales cursos de los ríos, y ocupan, principalmente, antiguos canales de desagüe glaciar que erosionaron los sedimentos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue. Las gravas, clastosoportadas, con matriz de arena gruesa, muestran estratificación planar horizontal, imbricación de clastos y, en algunos casos, gradación normal hasta arena fina y limo. Los sedimentos arenosos, de grano medio a fino, son macizos o pueden presentar estratificación planar horizontal y cruzada.

Es común observar estructuras de canales y barras, además de secuencias alternadas de gravas y arenas. En general, tanto la capa de suelo como la profundidad de la meteorización alcanzan algunos centímetros de potencia. En la zona de la ciudad de Valdivia y hacia la costa, los depósitos son de granulometría fina y varían desde arenas medias a arcillas. Localmente, incluye limos laminados.

2.4.2.1.4 Morrénicos de la Glaciación Llanquihue (Mercer, 1976)

Diamictos glaciares ('till') macizos, matriz a clastosoportados, que se presentan morfológicamente como cordones morrénicos muy bien conservados, con alturas de hasta 270 msnm. Estos sedimentos cubren gran parte de la zona oriental de la región, conforman una secuencia de grandes cordones morrénicos alrededor de la ribera occidental de los lagos Calafquén, Panguipulli, Riñihue, Ranco Puyehue, Rupanco y Llanquihue.

Los clastos, bloques y gravas, son redondeados a subredondeados, y alcanzan tamaños de hasta 4 m de diámetro. Pueden presentar estrías y facetas glaciares y, raramente, se observan cáscaras de meteorización. La matriz se compone de arena fina, limos y arcillas. En general, la profundidad de la meteorización es menor que 1 m y, en los depósitos más consolidados, es centimétrica. Una capa de suelo, de probable origen volcánico, de espesor menor que 1 m, suele cubrir estos sedimentos.

En algunas morrenas, los depósitos se interdigitan con sedimentos glaciofluviales y limos laminados. Generalmente, los cordones están separados por canales o planicies de depósitos glaciofluviales.

2.4.2.1.5 Glaciofluviales (Mercer, 1976)

Gravas y arenas, con menor proporción de limos y arcillas, que conforman amplias llanuras ('outwash'). En sectores se reconocen hasta 30 m de espesor. Las gravas son moderadas a mal seleccionadas, con clastos subredondeados a redondeados. Los clastos, en general, no presentan cáscaras de meteorización, aunque algunos clastos dacíticos son leve a moderadamente disgregables, lo que podría indicar retrabajo de sedimentos glaciares más antiguos.

En algunos fragmentos es posible observar estrías y facetas glaciares. Las gravas, clastosportadas, con matriz de arena gruesa, presentan estructuras de estratificación planar horizontal y, localmente, imbricación de clastos e intercalaciones de niveles de arena, de formas lenticulares a tabulares, que son interpretadas como estructuras de barras. Están interestratificadas con lentes de arena y en algunos lugares, con limos laminados.

Las arenas, gruesas a finas, con estratificación planar horizontal y cruzada, aparecen intercaladas con niveles de gravas matriz soportadas y, en algunos sectores, presentan gradación normal. Las facies más finas pueden presentarse laminadas, con clastos

aislados de limolita, de tamaños centimétricos, e intercalaciones de niveles laminados de limos y arcillas.

Tanto en gravas como en arenas es posible observar estructuras de canales y de acreción lateral. En el entorno y bajo los depósitos morrénicos de la Glaciación Llanquihue, los sedimentos glaciofluviales pueden presentar pliegues y fallas debido al empuje provocado por avances posteriores del hielo. Es común la existencia de una capa de suelo pardo oscuro, menor que 1 m de espesor, que cubre estos depósitos y que, probablemente, se ha desarrollado en material piroclástico.

Forman terrazas ubicadas entre 10 y 15 m.s.n.m., en los ríos Cruces y Calle-Calle, al este de Pishuinco. En el sector este, conforman extensas llanuras y planicies, que se originan de las terrazas entre los cordones morrénicos.

2.4.2.1.6 Fluvioestuarinos del último interglaciar (Phillippi, 1887), (Pleistoceno Medio-Superior)

Gravas finas, arenas y arenas limosas a arcillosas, débil a moderadamente compactadas. Hacia el W, en el área de Valdivia, algunas de sus facies representan ambientes depositacionales fluviales, litorales, palustres y estuarinos, mientras que en el sector central estos depósitos corresponden, probablemente, a eventos laháricos y presentan estratificación horizontal, cruzada o maciza, con predominio de componentes de origen volcanoclástico, localmente con fragmentos de pómez meteorizados.

En la costa, forman terrazas de hasta más de 30 msnm y a lo largo del sistema de ríos presentan una altura aproximada de 13 msnm. El espesor de estos depósitos puede variar entre 50 y 80 m. Según el origen de los componentes principales, estos depósitos se dividen en dos asociaciones de sedimentos que engranan lateralmente y que representan ambientes depositacionales fluvial, litoral, palustre y, probablemente, estuarino:

- a. gravas, arenas y arenas limosas hacia la base, formadas a partir de la erosión de rocas del Complejo Metamórfico Bahía Mansa, que intercalan con niveles de limos con fósiles marinos y estratos de turba, se reconoce principalmente en la costa;
- b. arenas, con estratificación planar horizontal y cruzada, gravas finas, arenas limo arcillosas, limos y arcillas, de origen volcanoclástico, presentes principalmente, en el área de Pelchuquín-San José de la Mariquina, en los alrededores de Valdivia y en la costa.

2.4.2.2 Depósitos de la Glaciación Santa María

2.4.2.2.1 Morrénicos de la Glaciación Santa María (Porter, 1981),

Diamictos glaciarios generalmente macizos, mal seleccionados y matriz soportados, compuestos por gravas gruesas sub redondeadas y redondeadas en matriz de limos y arenas finas. Están cementados, son compactos y con evidencias de oxidación de los minerales máficos de la matriz, lo que les confiere tonalidad pardo-rojiza. Los clastos se presentan en general frescos, aunque en algunos de ellos existen cortezas concéntricas de meteorización de entre 1 y 3 mm de espesor. Conforman un ancho cordón morrénico externo a las morrenas de la Glaciación Llanquihue.

Aunque las crestas morrénicas son suaves, forman una topografía más alta que la correspondiente a los depósitos más jóvenes. Estos depósitos morrénicos de la parte Sureste de esta área representan una prolongación hacia el Sur del arco más externo.

2.4.2.2.2 Glaciofluviales de la Glaciación Santa María (Porter, 1981)

Gravas con buena a moderada selección, clasto soportadas, con escasa matriz de arenas gruesas y lentes de arenas y limos. Presentan estratificación planar horizontal y grano decreciente y los clastos están bien redondeados. Los depósitos muestran débil meteorización y están generalmente cementados con óxidos de hierro hasta 3 m de profundidad. Los clastos, en general, están frescos, aunque es común encontrar clastos volcánicos con cáscaras concéntricas de meteorización, de hasta 3 mm de espesor, y clastos de rocas intrusivas muy disgregables. Una capa de suelo pardo oscuro, de hasta 2 m de espesor, y probablemente desarrollada en depósitos piroclásticos, suele cubrir estos sedimentos. Conforman una topografía suavemente ondulada que se extiende más allá de las morrenas de la Glaciación Santa María, que ha sido erosionada por cauces rellenos con depósitos fluviales y glaciofluviales más jóvenes.

2.4.2.2.3 Fluviales y glaciofluviales del Pleistoceno Inferior a Medio (Pleistoceno Inferior a Medio)

Depósitos de gravas cuarcíferas y polimícticas. Las gravas cuarcíferas son clasto soportadas, sub redondeadas, tienen mala esfericidad y moderada a buena selección y, localmente, exhiben estratificación. Representan depósitos asociados a antiguos sistemas fluviales y aluviales. Las gravas polimícticas son mal clasificadas y mal seleccionadas, clasto a matriz soportadas y, localmente, exhiben estratificación.

Los clastos son redondeados a sub redondeados, con meteorización avanzada y, la mayoría, son completamente friables. La matriz es arcillosa y muy alterada. Representan depósitos glaciofluviales.

2.4.2.3 Rocas Intrusivas

2.4.2.3.1 Mioceno

Incluye pequeños 'stocks' y diques de composición andesítica a dacítica que intruyen las unidades mesozoicas, al noreste de Choshuenco y en la ribera Sur del lago Panguipulli, y granodioritas, dioritas y tonalitas de biotita y hornblenda, que afloran en forma restringida (< 4 km²) en el extremo Suroriental del área Panguipulli- Riñihue, donde están cubiertos, parcialmente, por rocas volcánicas del Grupo ocho- Choshuenco.

2.4.2.3.2 Jurásico

Corresponde a un cuerpo intrusivo elongado en dirección NW, que aflora en la ribera del lago Panguipulli (Plutón Panguipulli, Jgp), está formado por granitos, granodioritas y tonalitas, e intruye a granitoides del Paleozoico (Batolito Futrono - Riñihue) y a rocas sedimentarias triásicas (Formación Panguipulli). Incluye, además, a un cuerpo intrusivo formado por tonalitas de hornblenda y biotita (Plutón Huechulafquén), de grano medio a grueso, que aflora en la ribera Sureste del lago Riñihue, donde intruye al Batolito Futrono-Riñihue y se encuentra en contacto por falla (Falla Chaiquemahuida) con estratos triásicos de la Formación Panguipulli.

2.4.2.3.3 Carbonífero – Pérmico

Intrusivo formado por granitos, granodioritas y tonalitas de biotita-hornblenda (Batolito Futrono-Riñihue, CPgfr), de grano medio a grueso, que aflora desde la ribera Sur del lago Calafquén, por el Norte, hasta el lago Ranco, por el Sur, y cubre un área total superior a 300 km². Intruye, por el Oeste, el Complejo Metamórfico Trafún, mientras al este está intruido por los plutones del Jurásico (Panguipulli y Huechulafquén).

2.4.2.4 Rocas Sedimentarias y Metamórficas del Paleozoico – Triásico

2.4.2.4.1 Secuencias estratificadas triásicas

Incluye a las formaciones Panguipulli (Aguirre y Levi, 1964; modificado por Rodríguez et al., 1999) y Tralcán (Aguirre y Levi, 1964; modificado por Rodríguez et al., 1999), cuyas características indican ambientes de depositación diferentes. La Formación Tralcán, es una secuencia de conglomerados gruesos de color rojo, con intercalaciones de areniscas y lutitas, expuesta en los cerros Tralcán y Quilahuentru.

La Formación Panguipulli corresponde a una secuencia rítmica de areniscas, lutitas y conglomerados cuarcíferos expuesta en las riberas de los lagos Calafquén y Panguipulli. Se interpreta la existencia de un sistema o complejo depositacional estructurado por un conjunto de facies fluviales trenzadas y asociaciones de facies turbidíticas lacustres depositadas simultáneamente en un cortejo sedimentario continental. (SERNAGEOMIN, 1998)

2.4.2.4.2 Complejo Metamórfico Bahía Mansa (Duhart et al., 1998), (Devónico más antiguo – Triásico)

El CMBM está integrado por cuatro asociaciones litológicas principales, algunas de las cuales se distribuyen, preferentemente, según bandas de orientación NW. Las relaciones estratigráficas originales entre las asociaciones litológicas están completamente destruidas y, localmente, se observan contactos estructurales entre ellas. Las litologías presentes son esquistos pelíticos a semipelíticos, esquistos máficos, rocas máficas y ultramáficas, además de milonitas y ultramilonitas.

2.4.3 Columna estratigráfica

ER A	SIS T.	Secuencias Sedimentarias	Secuencias Volcanosedimentarias	Secuencias volcánicas	Rocas Intrusivas
Cenozoico	Cuaternario	<p>Qm Pleistoceno-Holoceno Depósitos litorales: arenas y gravas de playas actuales.</p> <p>Q1 Pleistoceno-Holoceno Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.</p> <p>Qf Pleistoceno-Holoceno Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas, subactuales y llanuras de inundación.</p> <p>Q1g Pleistoceno-Holoceno Depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glaciales: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. En la Cordillera Principal, regiones I a IV. En la Depresión Central, regiones IX y X; en regiones XI y XII: lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales, abanicos fluvio-glaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue (1; 35-14,2 ka); Santa María (2; 262-132 ka); Río Llico (3; 480-338 ka) o Caracol (4; 687-512 ka).</p> <p>P11m Pleistoceno Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas: coquinas, conglomerados coquinaeos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles terrazados emergidos.</p>		<p>Q3i Cuaternario Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos o dacíticos; principalmente calcoalcalinos. holocenos en la Cordillera Principal, regiones Metropolitana a X; volcanes San José, Peteroa, Antuco, Llaïma, Villarica, Osorno y Calbuco.</p> <p>PI3 Pleistoceno Secuencias lávicas y centros volcánicos básicos a intermedios; depósitos piroclásticos andesítico-basálticos.</p> <p>PI3f Pleistoceno Depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. En la Depresión Central y valles de la Cordillera Principal</p>	
	Neógeno	<p>M1m Mioceno Secuencias sedimentarias marinas transgresivas platformales: areniscas finas, arcillositas y limolitas.</p>	<p>OM2c Oligoceno-Mioceno Secuencias volcanosedimentarias: lavas basáltica a dacíticas, rocas epilásticas y piroclásticas.</p> <p>MP2 Mioceno Superior-Plioceno Secuencias volcanosedimentarias: conglomerados lavas, andesíticas, domos y tobas.</p>	<p>PPI3 Plioceno-Pleistoceno Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados.</p> <p>M3i Mioceno Inferior-Medio Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas.</p>	<p>Mg Mioceno (18-6 Ma) Granodioritas, dioritas y tonalitas.</p>

Paleozoico		Mesozoico			Paleógeno
		Triásico	Jurásico	Cretácico	
					<p>Kiag Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo (123-85 Ma) Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita.</p> <p>Jsg Jurásico Medio-Superior (180-142 Ma) Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. Cordillera Principal, regiones X y XI: Pluton Panguipulli y borde oriental del Batolito Norpatagónico.</p> <p>CPg Carbonífero-Permiano (328-235 Ma) Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita región X Batolito Panguipulli-Rifihue</p> <p>Rocas Metamórficas:</p> <p>DC4 Devónico-Carbonífero Metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de 'mélange'.</p> <p>PzTr4 Paleozoico-Triásico Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Permiano al Jurásico. En la Cordillera de la Costa, regiones IX a X: Complejo Metamórfico Bahía Mansa; en la Cordillera Principal, región X: Complejo Metamórfico Liquiñe. Se distinguen esquistos pelíticos (a) y esquistos y anfibolitas, en menor proporción, rocas metamórficas ultramáficas (b).</p>

2.4.4 Geología estructural

La estructura dominante del sector cordillerano es la más importante de la zona. Allí se encuentra la Falla Liquiñe-Ofqui que aparece bien expuesta en el área al E de Liquiñe. Esta estructura regional, de rumbo general variable entre N-S y N20°E, afecta claramente a las unidades litológicas pre-Triásico Superior.

La formación y el Batolito Panguipulli afloran exclusivamente al W de la falla mientras que el complejo Ígneo-Metamórfico de la Cordillera de los Andes lo hace exclusivamente al este de ella.

Las trazas principales de desplazamiento del Sistema de Falla de Liquiñe-Ofqui han controlado la localización de algunos de los centros del frente volcánico Plio-Cuaternario. Los volcanes activos Mocho-Choshuenco, caldera Puyehue, Casablanca y el erodado volcán Quinchilca, se ubica a lo largo de las trazas principales. A las trazas principales se asocian, en el Holoceno, fallas extensionales de orientación NW y fallas compresionales de dirección NE relacionadas con movimientos transcurrentes. Dichas trazas principales manifiestan, también durante el Plioceno-Cuaternario, un componente extensional, evidenciado por la existencia de cuencas neotectónicas de orientación aproximada N-S, que constituirían el límite oriental de la Depresión Central.

De acuerdo a análisis de imagen de radar en la Cordillera de la Costa, se corrobora la existencia de importantes lineamientos de rumbo NW que coinciden con trazas de fallas extensionales, de las cuales las orientales limitan, por el W la distribución de las secuencias sedimentarias continentales marinas del Terciario, representadas en la Depresión Central por las cuencas Osorno-Llanquihue, constituyendo el contacto actual entre ellas y el basamento metamórfico. En conjunto, un sistema extensional de rumbo NE y otro transcurrente de dirección NW, habrían controlado la localización de los depocentros de las cuencas terciarias y la ubicación de cuencas neotectónicas en el borde occidental de la Depresión Central. El sistema transcurrente se interpreta como un sistema estructural antiguo, penetrativo y regional, que ha afectado tempranamente al protolito de las rocas del basamento metamórfico, posiblemente en el Paleozoico superior- Triásico y que ha tenido reactivaciones, al menos durante el Terciario y Cuaternario (Sernageomin, 1997).

2.5 CARATERIZACION HIDROGEOLÓGICA

2.5.1 Contexto hidrogeológico

En el sector alto de la cuenca del río Valdivia destaca la existencia de formaciones rocosas de origen sedimentario volcánico, que consisten principalmente en coladas, brechas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de lutitas, calizas, areniscas y conglomerados de baja permeabilidad, y que forman el basamento de este sector de la cuenca. Por lo tanto, las infiltraciones de aguas meteóricas escurren por el subsuelo principalmente hasta los cuerpos lacustres de Panguipulli, Calafquén, Riñihue, Peilaifa, Pirihueico y Neltume. Las aguas de estos lagos se infiltran a través del material morrénico originando una fuente constante de abastecimiento del relleno acuífero.

En el valle central de la cuenca escurren dos acuíferos: uno en dirección SWW paralelo al río Las Cruces, y el otro lo hace en dirección oeste paralelo al río Calle-Calle, juntándose ambos en las proximidades de la ciudad de Valdivia. El medio por el cual escurre el acuífero es material de relleno o depósitos no consolidados de origen glacial, consistente en morrenas y materiales aluviales de alta permeabilidad (Figura 2-20).

Destaca el estrechamiento del valle central, por parte del batolito costero, consistente en rocas metamórficas y sedimentarias del período Paleozoico que provoca la bifurcación antes señalada de los acuíferos. El acuífero presenta una baja potencia en esta zona que se mantiene hasta su desembocadura con profundidades de 2 a 3 metros.

En general, el conocimiento de las aguas subterráneas no ha tenido un desarrollo relevante, debido principalmente a que las aguas superficiales han sido la fuente que sustenta el desarrollo regional, de hecho hay estudios muy locales y puntuales (Anexo A – Fichas de antecedentes), no existe una red de monitoreo de las aguas subterráneas. Actualmente debido a que la disponibilidad superficial está bastante acotada, las aguas subterráneas se constituyen en una fuente de importancia creciente, lo cual insta a avanzar en estudios de evaluación hidrogeológica, medición sistemática de acuíferos y desarrollo de modelación.

2.5.2 Caracterización de las Unidades Hidrogeológicas Acuíferas

La caracterización de Unidades Hidrogeológicas Acuíferas consistió en una revisión de los antecedentes existentes, realizada en su mayoría a partir de la información técnica de captaciones de agua subterránea de las oficinas de la Dirección General de Aguas de la Regiones de Los Ríos, las bases topográficas y del mapa hidrogeológico del SERNAGEOMIN.

Así se realizó una interpretación hidrogeológica en base a esta información, a la estratigrafía de pozos (Anexo E – Mapa Geológico) y ensayos de bombeo recopilados (Anexo G – Hidrogeología).

En base al material analizado se pueden distinguir varios sistemas acuíferos:

Acuífero A1

Acuífero libre en depósitos glaciofluviales de la glaciación Santa María (Plgf2), correspondientes a gravas en matriz de arenas gruesas con lentes de arenas y limos y meteorización débil a moderada, que pueden alcanzar más de 30 m de espesor en el sector central de la cuenca del río Valdivia, en los márgenes del cordón de cerros de Madre de Dios y Tripayante. Los niveles freáticos estáticos varían entre 12 y 6 m.

El acuífero A1, a nivel regional, posee transmisividades bajas a media-alta (T : 50 a 400 m^2/d), permeabilidades bajas a altas (K : 10^{-5} a 10^{-3} m/s), caudales de explotación variables entre 2 y 15 l/s y específicos inferiores a 1,98 (l/s)/m. El espesor de los depósitos saturados con agua es inferior a los 10 m y el nivel estático se encuentra entre 1 y 5 m bajo la superficie del terreno.

Acuífero A2

Acuífero libre en depósitos glaciofluviales de la glaciación Llanquihue (Plgf1), que se localiza hacia el oeste de los lagos Calafquén, Panguipulli y Riñihue, en las cabeceras de los ríos Leufucade, San Pedro y algunos esteros menores como el estero Quicha. Está constituido por gravas con matriz de arenas gruesas y lentes de arenas, ocasionalmente con lentes de limos laminados, con espesor entre 30 y 60 m. Los niveles freáticos se encuentran entre 1 y 5 m de profundidad. Los caudales de pozo varían entre 20 y 50 l/s, mientras que un ensayo de bombeo realizado en este acuífero indicó un caudal específico de 21,49 (l/s)/m y una transmisividad del orden de los 2.000 $m^2/día$.

Sistema de acuíferos A2/A1

Corresponde a los depósitos de gravas y arenas glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y Santa María (Plgf2), que en su conjunto constituyen un acuífero libre. Se extiende en el área del río Valdivia, asociado a los valles de los ríos Cruces, Leufucade y al este de Pishuinco, en el río Calle- Calle, Quinchilca y San Pedro. En general, en esta zona posee un nivel freático variable entre 0 y 5 (m) un espesor de la zona no saturada variable entre los 0 y 5 m y un espesor de la zona saturada entre 3 y 15 m, el que aumenta hacia el este.

Este sistema a nivel regional posee transmisividades bajas a muy altas (T: 50 a 3000 m²/d), permeabilidades bajas a altas (K: 10⁻⁵ a 10⁻³ m/s), caudales de explotación variables entre 1 y 80 l/s y específicos entre 0,11 y 18,75 (l/s)/m.

Sistema de acuíferos A2//A1

Formado por un acuífero superior libre (A2) constituido por gravas y arena de los depósitos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y/o fluviales (PIHf, Hf), litorales (Hp), eólicos (Heo) y arenas y limos estuarinos (He), que se disponen sobre un acuífero confinado (//A1) en depósitos del mismo tipo, correspondientes a la Glaciación Santa María (Plgf2).

El acuífero //A1 es confinado por depósitos de cenizas, lapilli, gravas, arenas y arcillas piroclásticos-epiclásticos (Plsp), limos, arcillas y arenas finas glacialacustres (Plgl2), o localmente por limos, arcillas, arenas finas, gravas y bloques morrénicos (Plm2).

Sistema de acuíferos //A3//A1

Se compone de 2 acuíferos confinados: un acuífero superior en depósitos fluvioestuarinos del último período interglacial (Plfe) y un acuífero inferior en depósitos glaciofluviales de la Glaciación Santa María (Plgf2), separados por estratos de arcillas impermeables de 6 a 30 m de espesor, pertenecientes a la misma secuencia de depósitos fluvioestuarinos. Esta secuencia sedimentaria aparece en forma discontinua en las depresiones de San José de la Mariquina y Valdivia, donde la cubren, localmente, sedimentos fluvio-estuarinos impermeables (PIHf) y descansaría sobre el basamento metamórfico indiferenciado (PzTrbm) y/o sobre rocas sedimentarias indiferenciadas (Msd, OIMpc).

El acuífero superior //A3, constituido por arenas y gravas de 5 a 29 m de espesor, posee transmisividades bajas a altas (T: 10 a 800 m²/d), caudal explotable variable entre 1 y 30 l/s, caudales promedios de 6,2 l/s y específico entre 0,1 y 7,5 (l/s)/m, permeabilidad baja a alta (K: 10⁻⁵ a 10⁻³ m/s) y un nivel estático variable entre 2 y 13 m.b.n.t. Las isoprofundidades determinadas para este acuífero (Arenas et al., 2005) indican que las profundidades menores del agua subterránea, 7 m bajo la superficie, se encuentran en la localidad de Pelchuquín, y aumentan, tanto hacia el oeste y norte hasta los 27 m, como al este y sur hasta los 47 m, en el sector de cruce a Máfil.

El acuífero inferior //A1, compuesto por arenas y gravas de 6 a 33 m de espesor, situadas a profundidades superiores a 40 m, se caracteriza por tener transmisividades bajas a altas (T: 50 a 1.000 m²/d), un caudal explotable variable entre 2 y 45 l/s, con caudales

promedios de 17 l/s y específico entre 0,04 y 12 (l/s)/m, baja a alta permeabilidad (K: 2×10^{-6} a 6×10^{-4} m/s) y niveles estáticos variables entre 2 y 13 m.

En la ciudad de Valdivia, las profundidades varían de 15 a 19 m en las inmediaciones de la Avenida Picarte y disminuyen hacia el río Valdivia, tanto hacia el oeste como hacia el sur, hasta 5 m bajo la superficie.

Si bien se considera que ambos acuíferos son independientes, no se descarta la posibilidad de una conexión hidráulica entre ellos, debido al acuñamiento de los estratos arcillosos o a paleocanales que erosionaron las arcillas y depositaron sedimentos más permeables. Además, existe conexión hidráulica entre ambos acuíferos a través del espacio anular de los propios sondajes, que impide la medición de los niveles estáticos del acuífero inferior.

Acuífero //A4

Corresponde a un acuífero confinado o semiconfinado en depósitos fluvioestuarinos (Plfe), cubierto por arenas finas, limosas y consolidadas, y arcillas pertenecientes al mismo depósito (Plfe) y, localmente, por arenas limosas y arcillas (PIHf), de 8 a 28 m de espesor, expuesto en los sectores Bayo, Niebla e islas San Francisco y Del Rey. El acuífero, compuesto de arenas finas a gruesas, de 7 a 21 m espesor, tiene transmisividades bajas a medias-altas (T: 10 y 300 m²/d), un caudal explotable variable entre 1 y 6 l/s, con un caudal específico entre 0,1 y 3 (l/s)/m, permeabilidades bajas a medias (K: 10^{-5} a 2×10^{-4} m/s) y niveles estáticos a profundidades variables entre 2,4 y 15 m.

Las isoprofundidades determinadas para este acuífero (Arenas et al., 2005) indican que la profundidad del agua subterránea en las inmediaciones del estero Estancilla varía entre 20 y 23 m, y aumenta hacia el sur hasta 28 m. Debido a que la profundidad de los sondajes conocidos no supera los 45 m, no es posible reconocer la presencia de otros acuíferos.

Tanto //A4 como //A3 presentan acuíferos colgados en los estratos confinantes superiores (PIHf, Plfe). El agua, frecuentemente, se encuentra en fisuras, a profundidades menores que 10 m, en el estrato tradicionalmente denominado cancagua, correspondiente a arenas limosas arcillosas moderadamente cementadas.

Sistema de acuíferos A5//A3//A1

Está integrado por un acuífero libre, compuesto principalmente por arenas limosas fluviales (PIHf), el cual, a su vez, se encuentra, sobre el acuífero colgado en canchagua, y/o sobre los acuíferos confinados del sistema //A3//A1 en depósitos fluvioestuarinos (PIfe) y glaciofluviales (PIgf2), en la cuenca del río Valdivia, en los valles de los ríos Calle-Calle, Cruces y Pichoy. El acuífero libre posee conexión hidráulica con los ríos de los valles principales y de otros secundarios. El espesor de la zona no saturada varía entre 0 y 5 m y el de la zona saturada entre 2 y 10 m, y aumenta hacia el este.

Si bien se considera que estos acuíferos son independientes, no se descarta la posibilidad de una conexión hidráulica entre ellos, debido al acuñaamiento de los estratos arcillosos.

2.5.2.1 Límites y geometría de las unidades acuíferas definidas

Como ya se mencionó anteriormente, el sistema de acuíferos que se integran en la cuenca del río Valdivia son complejos, tanto horizontalmente como en profundidad. La historia geológica de la zona dominada por el tectonismo hace que los materiales se dispongan con fuertes alternancias verticales producto de los levantamientos y hundimientos generados.

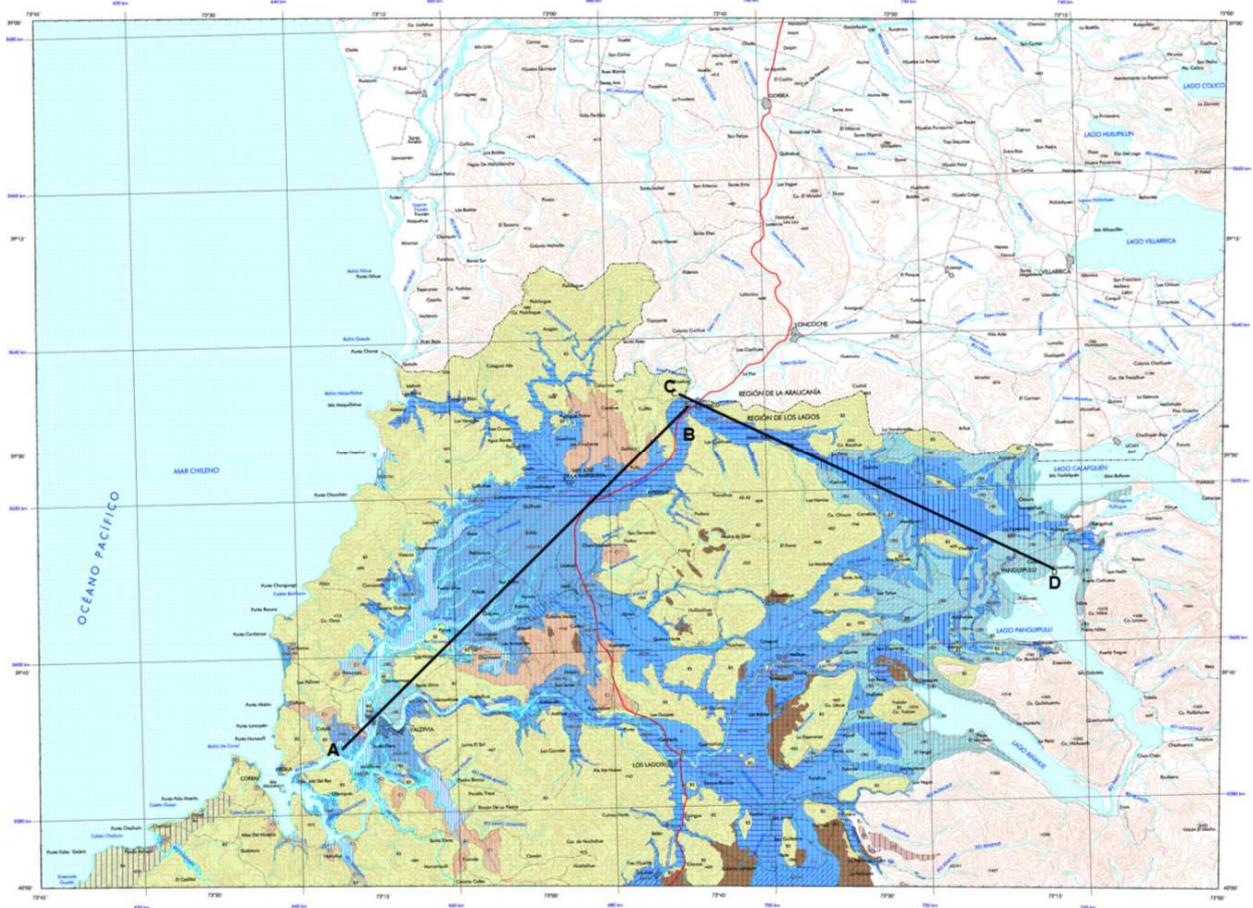


Figura 2-20 Mapa hidrogeológico de la cuenca de Valdivia (modificado de Sernageomin, 2008).

El mapa hidrogeológico de la Figura 2-20 muestra la importancia hidrogeológica de los diferentes materiales en base a 2 criterios: su mayor o menor carácter acuífero (capacidad para transmitir el agua), con una transición de tonos azules a marrones respectivamente; y el tipo de porosidad de los materiales, variando de intergranular (tonos azules) a fisurados (tonos verdesos).

La distribución espacial del acuífero se encuentra vinculada a los procesos geomorfológicos que han conformado la cuenca del río Valdivia: erosión glacial, fluvio-glacial, eólica. Es por ello que las dos masas acuíferas principales se disponen sobre el recorrido del río Cruces, el Calle-Calle y la unión de ambos en el río Valdivia en la población del mismo nombre.

En la parte superior de la cuenca (zona NE) el acuífero que discurre paralelo al río Calle-Calle (sector de Panguipulli) posee un mayor espesor debido a la presencia de depósitos de tipo morrena (Figura 2-21). En este sector del acuífero encontramos una escasa continuidad espacial, viéndose interrumpido por los materiales del batolito costero que conforman las mayores elevaciones en este sector y poseen menor capacidad acuífera. Es por ello que, transversalmente al trazado del río nos encontramos una disminución de la potencia lateral del acuífero. El sistema acuífero es predominantemente libre en este sector (A), exceptuando aquellos depósitos que conforman las partes distales de las zonas lagunares (B), en que frecuentemente se pueden encontrar materiales granulares que producen el semiconfinamiento del acuífero. El sector norte del acuífero forma un gran paquete acuífero libre (A2, de elevada transmisividad) que, en su recorrido hacia la zona S se acuña e interdigita con otros materiales, pasando a formar un sistema acuífero, también libre pero con menores capacidades acuíferas (A2/A1). Es hacia el sector de los lagos cuando se produce el semiconfinamiento del sistema acuífero.

El acuífero que discurre paralelo a la disposición del río Cruces forma un sistema de acuíferos confinados y semiconfinados de mayor extensión horizontal y continuidad que el existente en la zona este (Figura 2-22). En su desarrollo paralelo al río Cruces se produce un aumento del espesor de los materiales de baja capacidad acuífera (depósitos fluviales) que confinan el sistema acuífero (A3/A1), encontrándose libre en aquellas zonas en que el modelado fluvial reciente erosiona a los materiales confinantes (véase en sectores del río Cruces y afluentes).

La unión de ambos acuíferos se produce en el sector de la población de Valdivia, donde el basamento se encuentra a una profundidad inferior (se analizará en más detalle tras la interpretación de los datos geofísicos). En superficie se encuentran materiales deposicionales fluviales y deltaicos que confinan y semiconfinan a los materiales acuíferos también fluviales a los 20 a 30 metros de profundidad. En el sector de desembocadura del río Valdivia los materiales existentes no presentan capacidades acuíferas elevadas, excepto algunos sectores próximos a la costa donde se puede encontrar sistemas confinados de tipo A4.

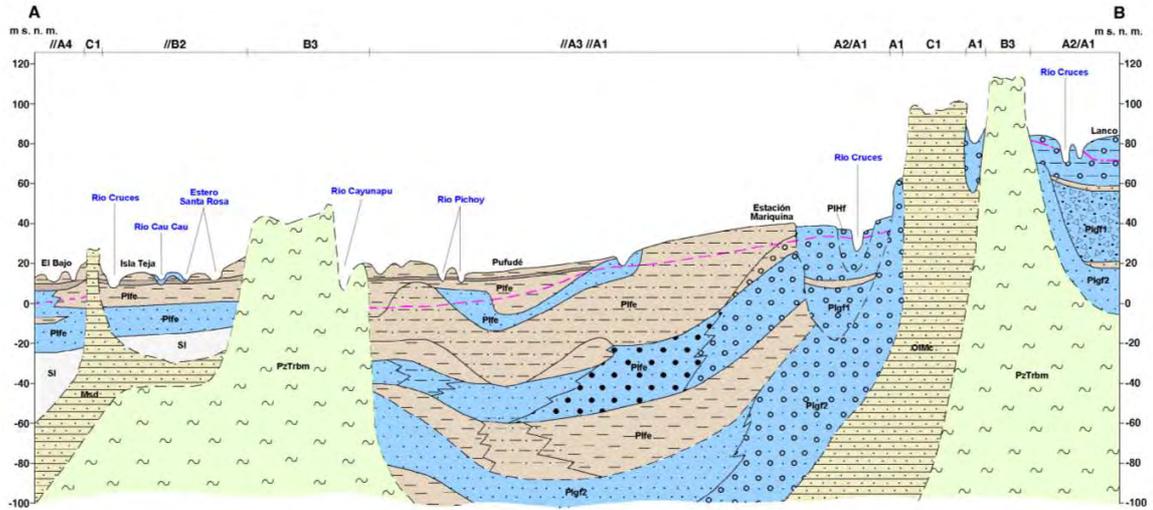


Figura 2-21. Corte hidrogeológico A-B correspondiente al mapa de la Figura 2-20 (modificado de Sernageomin, 2008).

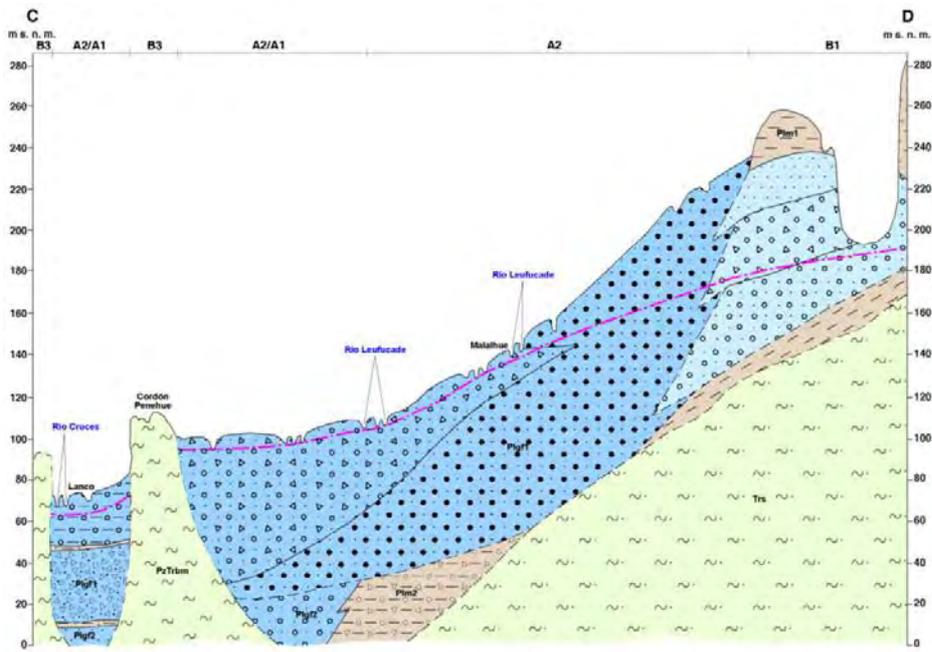


Figura 2-22. Corte hidrogeológico C-D correspondiente al mapa de la Figura 2-20 (modificado de Sernageomin, 2008).

2.5.3 Parámetros hidráulicos

El análisis de los parámetros hidráulicos se ha hecho en base a las pruebas de bombeo realizadas, en su mayoría, para la construcción de pozos de agua potable rural. Los datos

han sido calculados en base a la curva de agotamiento de los ensayos de bombeo, según la siguiente fórmula:

$$T = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta'}$$

donde:

T : Transmisividad

Q : Caudal

R : Radio de influencia del sondaje

r : Radio de perforación del sondaje

Δ' : Depresión corregida ($\Delta' = \Delta$ para napa confinada; $\Delta' = \Delta - \Delta \cdot 2/2H$ para napa libre, con H: espesor de acuíferos).

En general, la expresión $\ln(R/r)$ asume un valor cercano a 7, por lo que la expresión original adopta la siguiente forma:

$$T = \frac{7 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot \Delta'}$$

Sobre la base de los pozos catastrados (Anexo C – Catastro Público de Aguas) se han estimado los parámetros elásticos.

A continuación se realiza un resumen de los parámetros hidrogeológicos analizados hasta el momento en la zona.

2.5.3.1 Transmisividades (T)

El base a los datos analizados hasta el momento, procedentes básicamente de la información extraída de los pozos APR y expedientes asociados. Estos datos se refieren a pozos profundos situados en el extremo E del acuífero, en las zonas de Panguipulli y Lanco (al NE).

De los 30 pozos profundos analizados (Tabla 2-3), en la comuna de Panguipulli no existe ningún punto con transmisividades muy bajas ($<10 \text{ m}^2/\text{d}$), 12 puntos con valores bajos ($100-10 \text{ m}^2/\text{d}$), 15 con transmisividad media ($100-500 \text{ m}^2/\text{d}$) y 3 puntos con valores

altos, siendo el valor superior de 616 m²/d, en la comuna de Mariquina, al NE del lago Panguipulli (el resto también se encuentran en la misma zona). El pozo analizado en Lanco posee una transmisividad media, siendo un punto único que no permite, en estos momentos obtener ninguna conclusión al respecto.

Tabla 2-3. Valores de transmisividad de la cuenca del río Valdivia

Transmisividad (m ² /d)	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja	Total pozos analizados
	>1000	1000-500	500-100	100-10	>10	
Río Valdivia	0	3	15	12	0	30

2.5.4 Piezometría y flujos de agua subterránea

A partir de la información de niveles medidos durante la campaña de terreno para el catastro de captaciones durante septiembre y octubre de 2012 (Anexo G), se trazaron las curvas piezométricas (Figura 2-23).

El flujo subterráneo presenta una dirección E-W en el sector norte de la cuenca de río Valdivia, y dirección NE-SW en la zona central, discurriendo por los valles principales.

El gradiente hidráulico de la zona acuífera en los sectores más altos de la cuenca, es del orden de un 0,7%. Hacia la parte occidente el gradiente disminuye considerablemente debido a la menor pendiente que presenta el terreno (zonas más planas), alcanzando valores de 0,1%.

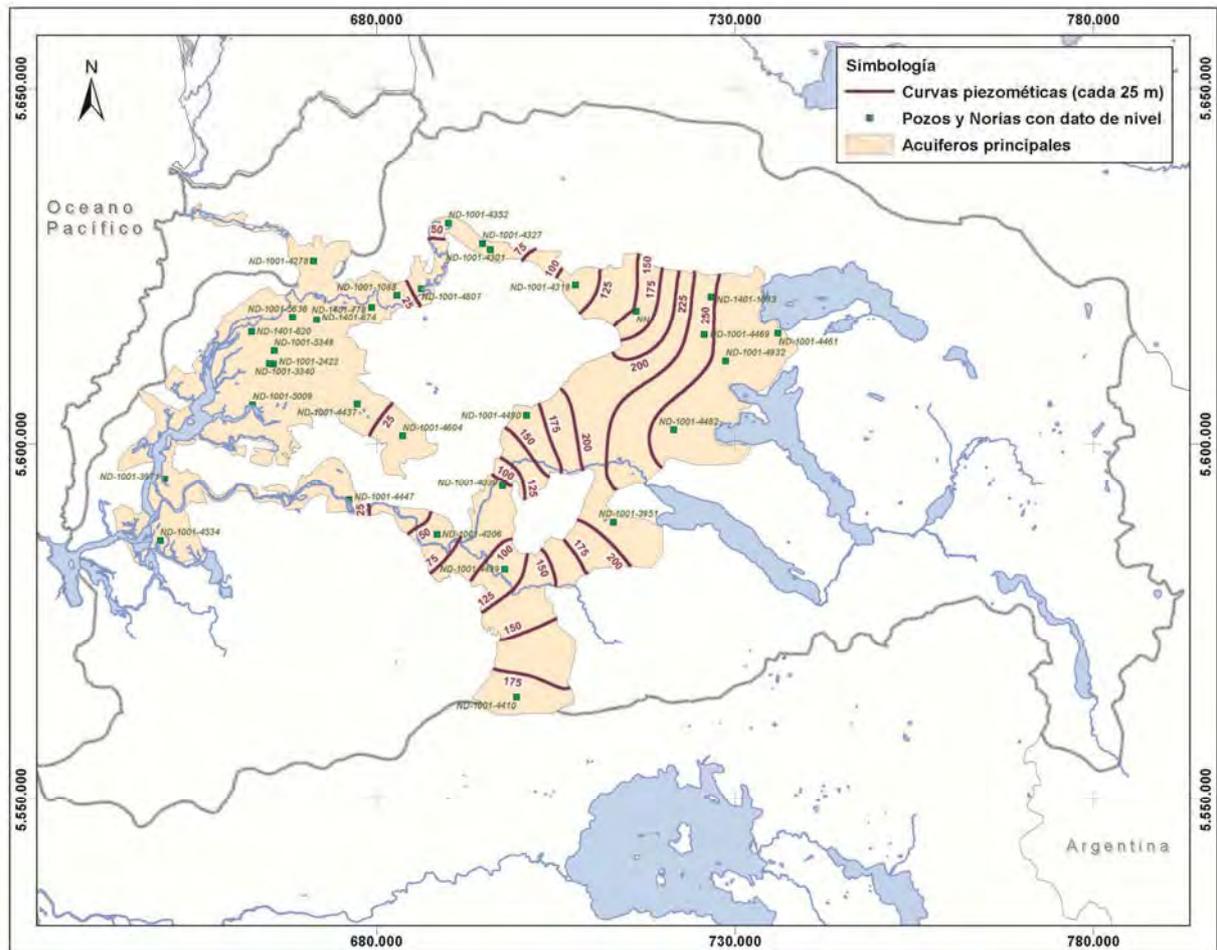


Figura 2-23. Mapa de isopiezías (msnm) en el acuífero de la cuenca de río Valdivia (Amphos 21).

2.5.5 Estimación de la recarga

Uno de los principales mecanismos de recarga en la cuenca del río Valdivia corresponde a la infiltración debido a las precipitaciones.

Por ese motivo, a partir de la ecuación obtenida en la relación precipitación-elevación (apartado 4.3) se ha calculado la precipitación para los diferentes intervalos hipsométricos (Figura 2-24 y Tabla 2-4), donde se ha determinado que la precipitación anual total en la cuenca corresponde a 736 m³/s.

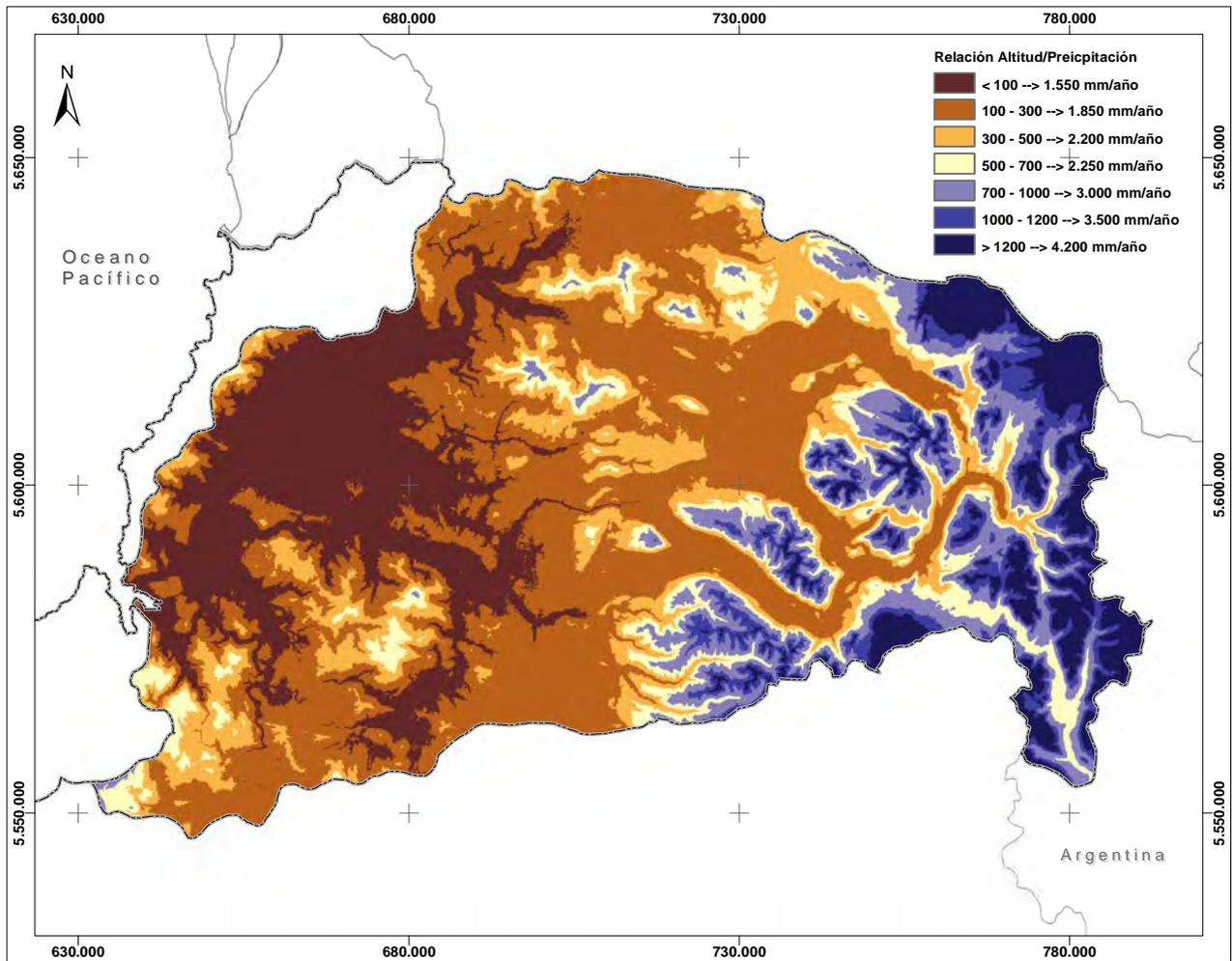


Figura 2-24 Distribución de precipitación (mm/año) en relación con la altitud en la cuenca (Amphos 21).

Tabla 2-4. Estimación de la precipitación a partir de la ecuación altura-precipitación en la cuenca (Amphos 21).

Altura msnm	Área km ²	Precipitación		
		mm /año	m ³ /año	m ³ /s
< 100	1932	1.667	3.220.674.506	102
100-300	3894	1.843	7.176.755.345	228
300-500	1487	2.195	3.264.833.781	104
500-700	860	2.547	2.190.372.881	69
700-1000	880	2.987	2.629.533.762	83
1000-1200	542	3.515	1.905.021.738	60
>1200	667	4.219	2.813.654.897	89
Total	10.263	18.973	23.200.846.909	736

La magnitud de la infiltración depende entre otros factores, de las características de los suelos. En particular, desde el paralelo 40° Sur, los depósitos eólicos piroclásticos no sólo quedan confinados a las zonas cordilleranas y precordilleranas (como sucede en la zona central) sino que se extienden hacia la depresión intermedia.

Esta configuración del suelo, provoca que en gran parte de la cuenca del río Valdivia, la capa superficial presente importantes cantidades de suelos finos, lo que dificulta el proceso de infiltración de excesos de lluvias. A lo anterior hay que agregar que, en algunos sectores de la parte Este del valle central, se han detectado cantidades importantes de óxido de hierro (fierrillo) que actúa como capa aún más impermeable. Estas zonas corresponden a los denominados suelos ñadis.

Además existen extensas áreas de mal drenaje en las cuales se dificulta la recarga de los acuíferos profundos. Esto es producto de la existencia de un estrato superficial de baja permeabilidad y de la baja pendiente del terreno.

Por todo lo anterior, es esperable que la magnitud de la infiltración sea más bien baja en comparación con la precipitación.

Dado que no existen antecedentes teóricos que permitan determinar con certeza un valor para el coeficiente de percolación, se estima de manera preliminar que este coeficiente debiese variar entre un 7 y un 18% para distintos puntos de la cuenca. De igual modo, tampoco ha sido posible realizar un modelo integrado (tipo APLIS), por falta de datos (tipología de suelos e infiltración), (Andreo et.al., 2008). El 10 y 5% utilizados finalmente se basaron en los balances de agua realizados en el documento del Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos en Chile (2011).

En este punto es importante señalar que la recarga estimada como un 10% de la precipitación, es un valor referencial y que se encuentra respaldado por el hecho que la napa se encuentra relativamente superficial en gran parte de la zona de estudio, impidiendo una percolación de mayor magnitud.

2.6 DEFINICION DE COMPONENTES DEL MODELO

Acorde con el trabajo realizado anteriormente, se han definido los límites del Modelo Conceptual, que incluyen los sistemas acuíferos de la cuenca del Río Valdivia, estableciéndose la geometría en 3D de los acuíferos que fueron identificados y caracterizadas mediante el análisis hidrogeológico.

2.6.1 Límites y geometría del basamento

Los resultados obtenidos de la campaña geofísica elaborada por Amphos 21 entre agosto y septiembre de 2012 han permitido realizar la caracterización espacial del basamento de la zona de estudio.

El trabajo geofísico consistió de un levantamiento de perfiles del basamento rocoso fundamental (por Gravimetría) a través del relleno sedimentario. Es necesario mencionar que al no haberse realizado el método geofísico de Transiente Electromagnético (TEM), no fue posible realizar una caracterización más precisa de los perfiles, definiendo así su estratigrafía de detalle. Esto habrá de tenerse en cuenta como trabajos futuros necesarios para mejorar el conocimiento del acuífero que, no obstante, ha sido caracterizado en buena forma en el presente estudio.

En los trabajos de gravimetría fueron prospectados 280 km de territorio en 21 líneas gravimétricas regionales (Perfiles L1 a L21), con 191 estaciones entre 1,5 a 2 km, distribuidas a lo largo de la cuenca del río Valdivia, sobre las unidades acuíferas (Figura 2-25 y Anexo G - Hidrogeología).

El estudio geofísico Gravimétrico Terrestre ha sido considerado con el propósito de estimar la profundidad al basamento en el sector del relleno sedimentario de las cuencas formadas por los principales ríos de la mencionada región. Estos procesos permiten confeccionar los perfiles gravimétricos con el propósito de tener la visualización de la gravedad de la tierra en la zona de estudio, para su posterior uso en el cálculo de la profundidad del basamento mediante algoritmos de inversión gravimétrica 2D tipo cuenca.

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

- Gravímetro Scintrex CG-5 Digital Automatizado.
- GPS geodésico Ashtech ProMark2, estación base y 1 móvil (error Horizontal: 12 milímetros \pm 2.5ppm, Vertical: 15 milímetros \pm 2.5 ppm modo dinámico).
- GPS de navegación en tiempo real Garmin 45 (error \sim 30 m).

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

Especificaciones CG-5:

Tipo de sensor:	Cuarzo fundido con NULO electrostático.
Resolución de lectura:	1 microgals (0,001 mgals).
Desviación Standard:	menor que 10 microgal.
Rango de Operación:	8000 mgal sin reseteo.
Deriva residual estática:	menos que 0,02 mgal por día.
Compensación por nivelación automática:	+/- 200 arc seg.
Correcciones automáticas:	Marea, Nivelación, Temperatura, Ruidos
Memoria:	Flash Technology 12 Mbytes 200.000 lecturas.
Temperaturas de Operación:	-40°C a +45°C
Salida digital:	2 RS-232 puertas seriales y 1 USB puerta0020 de 12 Mbits/sec.

Sistema de posicionamiento de GPS diferencial

En este caso se usó un sistema de posicionamiento de GPS diferencial marca THALES NAVIGATION. El sistema de posicionamiento GPS diferencial consta de tres instrumentos GPS Modelos Promark_2, diseñado para trabajar en modos de medición geodésicos, cinemáticos y estáticos de alta precisión. Uno de los instrumentos es instalado en una estación base y los otros instrumentos se ubican en las estaciones de medición (Horizontal: 0,005 m + 2.5 ppm (0,016 pies + 2,5 ppm); Vertical: 0,01 m + 2,5 ppm (0,032 pies + 2,5 ppm).

El posicionamiento final de los datos se obtiene mediante un proceso posterior que considera los datos de campo y los de la estación base, los cuales están sincronizados.

En el área de trabajo se estableció 1 base de terreno llamada base 0 ubicada en el la ciudad de Valdivia. Cada día se efectuaron mediciones en terreno las cuales fueron registradas para evaluación de repetitividad.

Las estaciones gravimétricas (Figura 2-25) fueron localizadas y replanteadas en terreno mediante GPS diferencial con una precisión superior a +/- 10 centímetros en la vertical (Z) y +/- 10 metros en la horizontal.

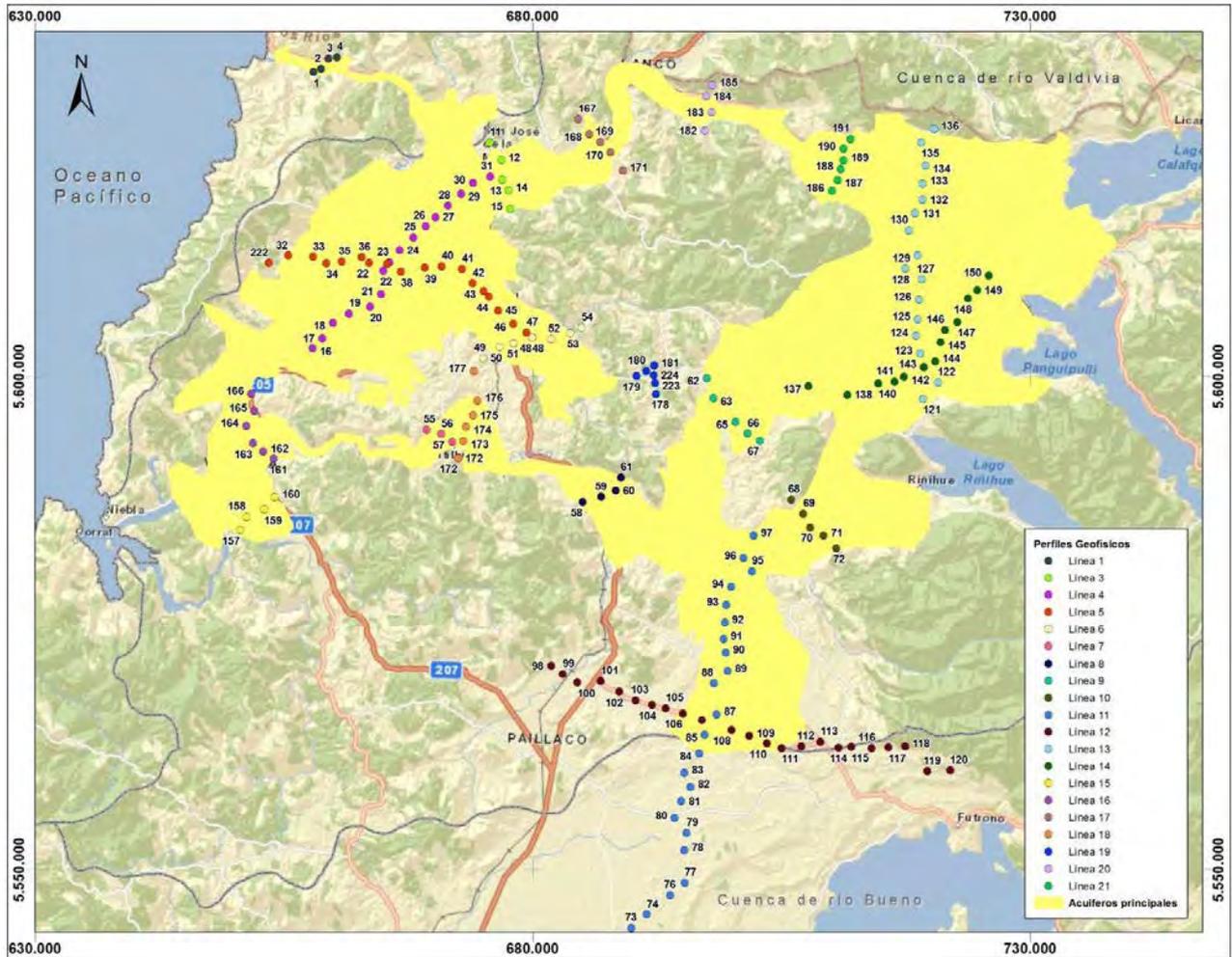


Figura 2-25 Distribución de los perfiles geofísicos en el acuífero caracterizado (Amphos 21).

Cada estación gravimétrica fue levantada usando un método de "loop" ligado a una estación base (base 0) que es registrada al inicio y al final del día de trabajo. El error de cierre se distribuyó proporcionalmente al intervalo de tiempo entre lecturas de terreno.

Las mediciones gravimétricas fueron efectuadas de acuerdo con la siguiente modalidad:

1. El gravímetro es nivelado en la estación de medición al menos un minuto antes de tomar la medida con el fin de permitir su estabilización.

2. Cada medición gravimétrica fue repetida al menos una vez. En caso de exceder la precisión del equipo por causa de ruido cultural, se repitió la medida las veces que fue necesario para obtener un buen promedio.
3. En casos en que la estación planificada estaba ubicada en un lugar de topografía inaccesible, el operador procedió a re-localizarla en el lugar más cercano de acceso aceptable.

La información gravimétrica ha sido procesada en forma estándar. Cabe hacer notar que el gravímetro Scintrex CG-5 corrige en forma automática la deriva instrumental y los efectos de marea, sin embargo, por tratarse de un instrumento nuevo y sometido además a fuertes vibraciones, se ha considerado necesario efectuar cierres diarios sobre un punto de referencia. La diferencia en la lectura es compensada sobre el universo de estaciones diarias en función del tiempo. En general las lecturas de cierre son inferiores a 0.07 mgal, lo cual es un valor razonable para las exigencias del tipo de trabajo efectuado.

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

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

Donde

G_{obs}	gravedad observada
Δ_{atmos}	corrección atmosférica = $0.87 \exp(-0.116 h^{1.047})$
G_{teo}	gravedad teórica (WGS84) = $G_0 (1 + C_1 \sin^2 \alpha) / (1 - C_2 \sin^2 \alpha)^{1/2}$ $G_0 = 978032,67714$ $C_1 = 0,00193185138639$ $C_2 = 0,00669437999013$ $\alpha =$ latitud
Δ_{boug}	corrección de bouguer = $2 \pi G \rho h$
$\Delta_{a_{libre}}$	corrección de aire libre = $0,3086 h$
Δ_{topo}	corrección topográfica.

La corrección topográfica fue calculada para cada estación considerando el uso de un modelo digital de terreno obtenido de la topografía pública SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), lo que proporciona una precisión de 90 metros para cada píxel. El algoritmo que se usó para esta corrección es el contenido en el software OasisMontaj de Geosoft, y está basado en los métodos descritos por Kane (1962) y Nagy (1966).

El objetivo del estudio gravimétrico en este estudio es determinar la forma de la interface sedimentos-basamento y estimar su profundidad. En los sectores investigados los sedimentos están compuestos por depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glacialacustre, diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos, en variadas combinaciones. El basamento corresponde principalmente a roca metamórfica, conocida como Complejo Metamórfico Bahía Mansa (esquistos pelíticos, metagrauvascas y esquistos máficos de afinidades oceánicas, con menor proporción de cuerpos máficos y ultramáficos.). Por consiguiente, los datos pueden ser interpretados mediante un modelo de dos capas, donde la capa superior es asimilada a los materiales sedimentarios (considerando una densidad promedio de los diferentes tipos de estratos), mientras que la capa inferior o substrato corresponde a la roca basal de mayor densidad. Considerando valores característicos de estos tipos de materiales, con valores entre 1.9-2.1 gr/cc para los sedimentos y entre 2.7-2.9 gr/cc para el basamento, se ha estimado como representativo un contraste de densidad de - 0.8 gr/cc.

A continuación se escriben los resultados obtenidos de los perfiles geofísicos (Figura 2-25):

Perfil Geofísico Línea 1

Este perfil se encuentra situado en el brazo N del acuífero con una disposición NE-SW, dispuesto de forma oblicua al río Lingue, próximo a su salida hacia el mar.

El basamento se sitúa en esta zona a un máximo de 62 m (contraste de densidad -0.8 gr/cc), identificado en la estación gravimétrica 2. Hacia el NE el basamento asciende situándose a una profundidad aproximada de 15 m en la estación 3, volviendo a profundizarse hacia el NE hasta los 30 m.

Perfil Geofísico Línea 3

Este perfil se encuentra situado al SW de la población de Mariquina, partiendo de ésta con una disposición N-S, dispuesto de forma perpendicular al río Cruces.

Próximo a la población de Mariquina, el basamento parte desde la superficie hasta alcanzar, a los 20 m de distancia una profundidad aproximada de 120 m. La menor profundidad se sitúa en la estación gravimétrica 12, donde se sitúa a los 60 m. En la estación 14 se registra la mayor profundidad del basamento, siendo esta de 145 m (próximo a la Ruta 5), ascendiendo hacia el sur hasta la superficie al final del perfil. La máxima profundidad se sitúa entonces en la parte central del acuífero donde el

basamento adopta una morfología aproximadamente cóncava que asciende hacia los márgenes.

Perfil Geofísico Línea 4

El perfil gravimétrico 4 se sitúa paralelo al transcurso del río Cruces desde la ciudad de Valdivia hasta conectar con la estación gravimétrica 13 de la línea 4, en las proximidades de la población de Mariquina.

El perfil trazado muestra una disposición lenticular del basamento, con su máxima profundidad en la estación gravimétrica 22 (conectada con el perfil gravimétrico 5), dada sobre los 330 m. Como particularidad se ha encontrado un alto valor de contraste de la densidad en la estación gravimétrica 28, que denota una menor profundidad del acuífero debido, presuntamente, a la existencia de secuencias volcanosedimentarias correspondientes a las formación OM2c en este sector. En este sector el basamento se encuentra sobre los 80 m.

Perfil Geofísico Línea 5

El perfil gravimétrico 5 se dispone perpendicular al perfil 4, partiendo del límite de la cuenca del río Valdivia en el sector costero, atravesando la población de Máfil, hasta enlazar con el perfil gravimétrico 6 al SE de dicha población más allá de la Ruta 5.

Este perfil vuelve a mostrar una disposición convexa del basamento de este sector, con una profundidad de 500 m en la estación gravimétrica 33, dando la máxima profundidad del basamento de este sector, bajo el cauce del río Cruces. En los primeros 4 km del perfil, el basamento muestra una elevada pendiente (0,13). A partir de este punto el basamento asciende progresivamente, situándose a los 150 m de profundidad en el entorno de la población de Máfil (estación gravimétrica 44), llegando hasta los 20 m en el extremo E.

Perfil Geofísico Línea 6

El perfil gravimétrico 6 se sitúa al SE de la población de Máfil, perpendicularmente al río Putregales (al N) y Máfil (al S), con una disposición perpendicular al perfil gravimétrico 5, que conecta con este en la estación 48.

Dicho perfil muestra la disposición del basamento formando dos lentes perpendiculares al trazado de ambos cauces. El espesor mayor se muestra entre las estaciones gravimétricas 52 y 53 que atraviesan el cauce del río Putregales con una profundidad de

120 m que asciende hacia el NE hacia los 50 m. En el sector del río Máfil la máxima profundidad del basamento es de 100 m, situada al E del actual cauce, lo que podría mostrar un desplazamiento de la erosión-depósito de los materiales en el pasado en sentido E-W.

Perfil Geofísico Línea 7

El perfil gravimétrico 7 se sitúa perpendicular al cauce del río Calle-Calle, en el sector de Arique y enlaza en su margen SE con el perfil gravimétrico 18. Su disposición es perpendicular a los sedimentos cuaternarios aluviales sobre los que se dispone el cauce del Calle-Calle tratando de acotar transversalmente la profundidad del basamento en este sector.

En este perfil se muestra de nuevo como la máxima profundidad del basamento se dispone de forma subyacente al cauce del río actual, siendo esta de 130 metros en el entorno de la estación gravimétrica 56. Hacia el SW el basamento asciende de forma progresiva hasta aflorar en la estación 172, perteneciente al extremo S del perfil gravimétrico 18.

Perfil Geofísico Línea 8

El perfil gravimétrico 8 se sitúa al N de la población de Los lagos, y de forma perpendicular al trazado del río Calle-Calle en este sector en que el cauce forma numerosos sectores meandriformes que parecen haber variado con elevada frecuencia.

El basamento en este sector se dispone de forma bastante paralela a la topografía, mostrando una forma ligeramente convexa, aumentando su profundidad en los sectores laterales hasta potencias de entre 50 a 60 m bajo el trazado de los cauces.

Perfil Geofísico Línea 9

El perfil gravimétrico 9 se sitúa en el sector de Malihue, disponiéndose perpendicular al río San Pedro en este sector.

El basamento se dispone en esta zona en forma lenticular con su máxima profundidad bajo el cauce del río San Pedro en la estación gravimétrica 63, donde alcanza profundidades próximas a los 220 m. Hacia el SE el basamento asciende progresivamente situándose bajo los 80 metros en la estación número 66, y aflorando en sus proximidades en la estación gravimétrica 67.

Perfil Geofísico Línea 10

El perfil gravimétrico 10 se sitúa perpendicular al estero Punahue, próximo al sector de Quinchilca. Posee una disposición NW-SE, atravesando los rellenos aluviales cuaternarios del sector S de esta zona.

El basamento posee en este sector una profundidad de entre 10 a 20 m, en la parte NW, aumentando hacia el SE hacia los 100 m que se muestran en la estación gravimétrica 71 y que aflora en la 72.

Perfil Geofísico Línea 11

El perfil gravimétrico 11 se dispone en dirección N-S desde la región de Los Lagos en el sector de Folilco, hasta la región de La Unión a lo largo de 42 km, cubriendo los depósitos sedimentarios del sector S de la cuenca que se encuentran en contacto con la cuenca del río Bueno, situada al S de esta.

El perfil muestra un basamento de menor profundidad en la zona N de entre 90 y 100 m, en la comuna de Los Lagos (estación gravimétrica 90 a 92) que posteriormente se profundiza, dando unas profundidades de basamento mayores de 500 m (estación gravimétrica 84 y 81) en la zona de Paillaco. Hacia el sector de La Unión el basamento asciende de manera progresiva hasta los casi 300 m que se alcanzan ya en la cuenca de río Bueno.

Perfil Geofísico Línea 12

El perfil gravimétrico 12 se dispone de manera perpendicular al perfil 11 cubriendo los materiales cuaternarios desde la comuna de Paillaco hasta la comuna de Futrono, al N de estas 2 poblaciones. El perfil tiene una orientación W-E, conectando con el perfil gravimétrico 11 entre las estaciones gravimétricas 107 y 108, al borde de la cuenca del río Valdivia.

Dicho perfil muestra la existencia de basamento en profundidad en el sector W sobre los 320 m que rápidamente asciende en las inmediaciones de la población de Reumén. Hacia el E encontramos un sector con el basamento aflorante que llega hasta el borde entre ambas cuencas. Bordeando ambas cuencas y en la conexión con el perfil 11 nos encontramos un espesor máximo cercano a los 500 m (estaciones gravimétricas 107 a 108), que sufre una ascenso progresivo hasta los 50 m de profundidad que se

materializan en la estación gravimétrica 118. El basamento vuelve a profundizar hasta los 300 m encontrados en la última estación gravimétrica (120).

Perfil Geofísico Línea 13

El perfil gravimétrico 13 se dispone con una orientación N-S que parte desde la comuna de Lanco, al E de la población de Malalhue, pasando por la comuna de Panguipulli.

Este perfil describe un basamento formando cubetas con forma cóncava hacia la parte superior distribuidas en cuatro sectores.

El sector situado en la parte N corresponde al perfil ubicado entre las estaciones 136 a 130, donde encontramos un basamento con forma lenticular, que profundiza hacia el centro del sector alcanzando profundidades de hasta 450 m (estación gravimétrica 132). El espesor mínimo (sin aflorar en superficie, que se produce en el extremo del perfil) es de 50 m en el límite del sector 1 y 2. Este sector abarca a todos los cauces que drenan sus aguas hacia el río Cruces en el sector W a través de la comuna de Lanco.

En el sector 2 (subsiguiente al anterior hacia el S, entre las estaciones 130 a 128) el basamento presenta un espesor máximo de 130 m en su parte central, ascendiendo hacia el límite con el sector 3 hasta los 10 a 20 m de profundidad.

En el sector 3 (estaciones 128 a 125) el basamento muestra un espesor máximo en su parte central cercano a los 170 m. Hacia el S, en el límite con el sector 4, el basamento presenta una profundidad mínima de 20 m.

En el sector 4 (estaciones 125 a 121), el situado más al S, muestra profundidades máximas del basamento en torno a 150 m en su parte central (estación gravimétrica 143), ascendiendo progresivamente hacia el sector S en donde se produce el afloramiento del mismo. Este sector cubre exclusivamente los cauces drenantes al río San Pedro y Calle-Calle.

Perfil Geofísico Línea 14

El perfil gravimétrico 14 parte de la región de los Lagos, con una dirección SW-NE, conectando con el perfil 13 en el sector de Panguipulli y llegando hasta el borde NW del lago Panguipulli.

Este perfil gravimétrico se subdivide, como el anterior, en 3 sectores donde la disposición del basamento forma cubetas de gran extensión:

El sector NE (sector 1), caracterizado por disponerse bajo los cauces drenantes en dirección N, muestra una profundidad máxima de 190 m entre las estaciones 148 y 149. Hacia El S, el basamento asciende progresivamente hasta mostrar, en la zona de la estación 145, espesores mínimos de entre 10 y 30 metros (mantenidos entre las estaciones 144 a 147).

El sector 2, que comprende el drenaje de los cauces hacia el S, también presenta profundidades máximas del basamento del entorno de 150 m que, sin embargo se mantienen más constantes a lo largo del sector. Hacia la parte S el basamento asciende hasta profundidades cercanas a los 10 m.

El último sector (sector 3) muestra un basamento en cubeta con la máxima profundidad desplazada hacia el extremo, siendo esta cercana a los 100 m, coincidiendo con el trazado del río San Pedro.

Perfil Geofísico Línea 15

El perfil gravimétrico 15 se dispone en el área de la ciudad de Valdivia (sector SE) con una orientación SW-NE cruzando el río Angachilla, con una extensión de 4800 m.

El perfil 15 se organiza en 2 sectores separados por la estación gravimétrica 158. Este punto divide la posición del basamento en 2 cubetas. El sector SW muestra un basamento con una profundidad máxima de 110 m, con una elevación hacia el NE hasta alcanzar los 10 m de profundidad. En el sector situado al N el basamento alcanza una profundidad próxima a los 120 m, aflorando hacia el extremo NE.

Perfil Geofísico Línea 16

El perfil gravimétrico 16 se dispone en el sector N de la población de Valdivia, de forma oblicua al perfil 15, conectando en las estaciones gravimétricas 160 y 161, respectivamente. Dicho perfil muestra un basamento dispuesto en dos cubetas donde las máximas profundidades llegan hasta los 150 m.

Perfil Geofísico Línea 17 y 18

Los perfiles geofísicos 17 y 18 se encuentran atravesando el río Calle-Calle en el sector de Antilhue, con una disposición oblicua entre ambos, conectando en la estación gravimétrica 172. El perfil 18 se ha situado N-S y el perfil 17 con dirección NW-SE.

El perfil 17 muestra un basamento con una disposición más o menos constante entre 200 a 220 m de profundidad, que se eleva hacia los bordes.

El perfil 18 muestra un basamento compartimentado en 2 cubetas unidas en la estación 176, donde se sitúa a 15 m, con profundidades máximas en ambos sectores próximos a los 150 m.

Perfil Geofísico Línea 19

El perfil gravimétrico 19 se ubica en la comuna de Máfil, atravesando el río Putregales en este sector, al W del perfil gravimétrico 9. Se dispone en 2 líneas oblicuas que permite disponer de una mejor ubicación del basamento en 2 puntos de una misma área.

Los perfiles muestran una profundidad máxima de entre 60 a 100 m con un trazado bastante homogéneo y paralelo a la superficie topográfica actual.

Perfil Geofísico Línea 20 y 21

Los perfiles gravimétricos 20 y 21, junto con el perfil 17 muestran la profundidad del basamento en el brazo N del río Cruces en la comuna de Lanco, próximos a las poblaciones de Malalhue, al E, y de Lanco en el W. La profundidad máxima en ambos perfiles se sitúa en la zona intermedia sobre los 80 m al W (perfil 20) y los 150 m al E. Esta disposición, junto con la que se muestra en la línea 17 supone una elevación del basamento en dirección E-W, que también viene acompañando del estrechamiento en superficie de los materiales sedimentarios.

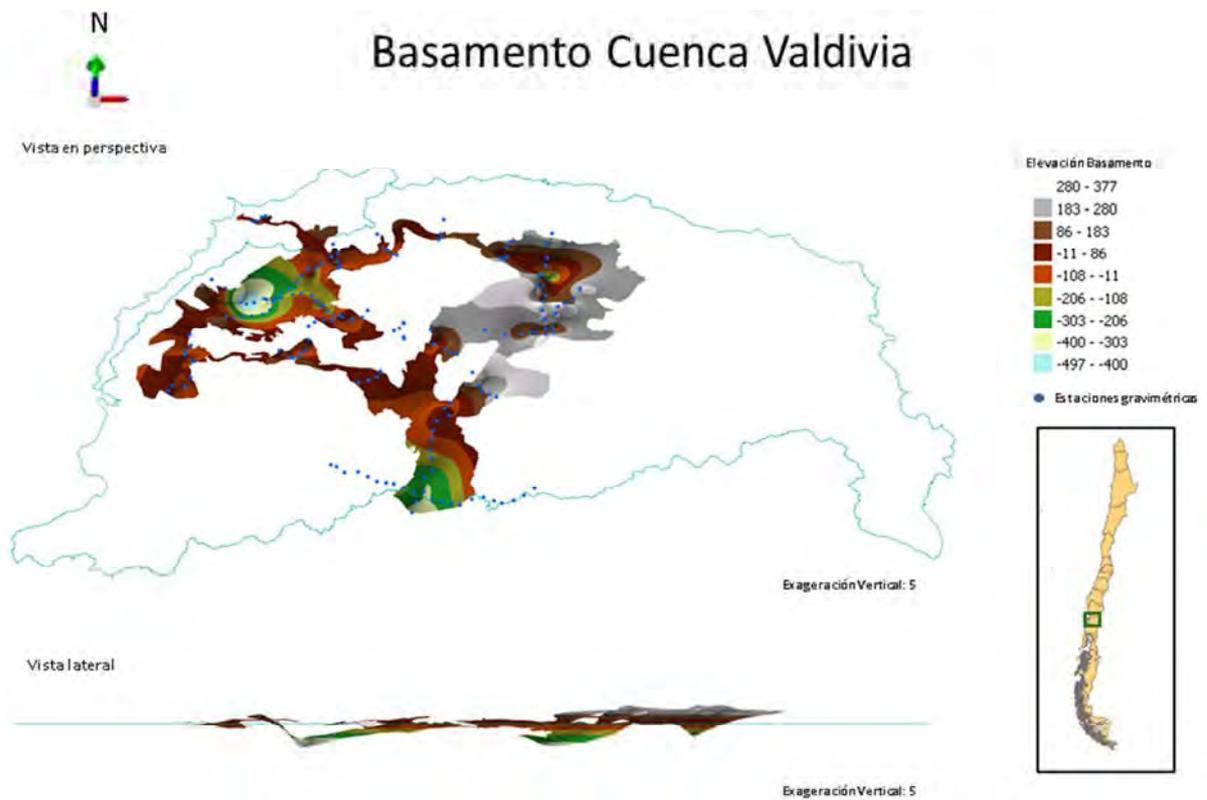


Figura 2-26. Morfología del basamento del acuífero (Amphos 21).

2.6.2 Límites y geometría del sistema acuífero

De acuerdo con los antecedentes señalados (geología, hidrogeología y geofísica) en el sector de la cuenca del río Valdivia que coincide con la ubicación de los rellenos del Cuaternario, se tiene una cierta homogeneidad estratigráfica, que se refleja en una serie de sistemas acuíferos, libres en el sector E y confinado en el sector W, de espesor más o menos constante e intercalados por estratos de baja permeabilidad (confinantes).

La geofísica, al solo haberse considerado el método gravimétrico, no permite definir la geometría detallada del sistema acuífero. De esta manera solo ha sido posible definir la geometría y límites del basamento. Para mejorar el conocimiento de la geometría del sistema acuífero será necesario realizar trabajos geofísicos de Transiente Electromagnético (TEM).

En la parte superior de la cuenca (zona NE) el acuífero que discurre paralelo al río Calle-Calle (sector de Panguipulli) posee un mayor espesor debido a la presencia de depósitos

de tipo morrena (Figura 2-27). En este sector del acuífero encontramos una escasa continuidad espacial, viéndose interrumpido por los materiales del Batolito Costero que conforman las mayores elevaciones en este sector y poseen menor capacidad acuífera. Es por ello que, transversalmente al trazado del río nos encontramos una disminución de la potencia lateral del acuífero. El sistema acuífero es predominantemente libre en este sector (A), exceptuando aquellos depósitos que conforman las partes distales de las zonas lagunares (B) en que frecuentemente se pueden encontrar materiales granulares que producen el semiconfinamiento del acuífero. El sector norte del acuífero forma un gran paquete acuífero libre (A2, de elevada transmisividad) que, en su recorrido hacia la zona S se acuña e interdigita con otros materiales, pasando a formar un sistema acuífero, también libre pero con menores capacidades acuíferas (A2/A1). Es hacia el sector de los lagos cuando se produce el semiconfinamiento del sistema acuífero.

El acuífero que discurre paralelo a la disposición del río Cruces forma un sistema de acuíferos confinados y semiconfinados de mayor extensión horizontal y continuidad que el existente en la zona este. En su desarrollo paralelo al río Cruces se produce un aumento del espesor de los materiales de baja capacidad acuífera (depósitos fluviales) que confinan el sistema acuífero (/A3//A1), encontrándose libre en aquellas zonas en que el modelado fluvial reciente erosiona a los materiales confinantes (véase en sectores del río Cruces y afluentes).

La unión de ambos acuíferos se produce en el sector de la población de Valdivia, donde el basamento se encuentra a una profundidad inferior. En superficie se encuentran materiales deposicionales fluviales y deltaicos que confinan y semiconfinan a los materiales acuíferos también fluviales a los 20 a 30 metros de profundidad. En el sector de desembocadura del río Valdivia los materiales existentes no presentan capacidades acuíferas elevadas, excepto algunos sectores próximos a la costa donde se puede encontrar sistemas confinados de tipo //A4.

Estos acuíferos se ubican, según los diversos sectores, desde prácticamente el nivel de terreno hasta más de 500 m de profundidad, siendo intercalados por estratos impermeables y semipermeables, fundamentalmente en el sector NE.

Los sectores confinados (/A3//A1 y A2//A1) aparecen ocupando alrededor de un 60% del acuífero, dispuestas en su mayoría en el borde NE paralelo al borde costero, liberando el acuífero en la parte más al norte, donde adquiere un carácter semiconfinado. Esta variación de materiales de distinta capacidad acuífera es una composición de los fenómenos de oscilación de los materiales costeros junto con los procesos erosivos

característicos de una zona aluvial y de desembocadura (delta). La profundidad máxima del sistema acuífero (su base) se localiza puntualmente sobre los 500 m, no siendo este el espesor real del acuífero al poseer un carácter confinado.

El sistema acuífero situado paralelo al anterior en el margen E corresponde a un sistema acuífero libre (A1, A2) que compone el 40% del acuífero de la cuenca del río Valdivia. Este sistema acuífero forma una amalgama de pequeños acuíferos de extensión de centenares de m a km de elevada continuidad y espesores locales máximos cercanos a los 200 m, que se normalizan en espesores de 100 a 150 m en la mayoría de los sectores. La conexión entre ambos sistemas acuíferos se realiza perpendicularmente a ambos en dirección E-W en los sectores N y S. La conexión N forma un acuífero libre, en su mayoría, que en su conexión con el acuífero W tiende progresivamente a confinarse al sufrir una intercalación con materiales de menor permeabilidad.

A esto se le suma el sector sobre el que se asienta la población de Valdivia, bajo la cual se dispone la conexión de los dos sectores acuíferos principales, formando un sistema acuífero confinado a parcialmente confinado (//A4, //A3//A1) que localiza la zona de descarga principal del acuífero al sector costero (siendo también la zona de descarga de las aguas superficiales de la escorrentía concentrada en los ríos).

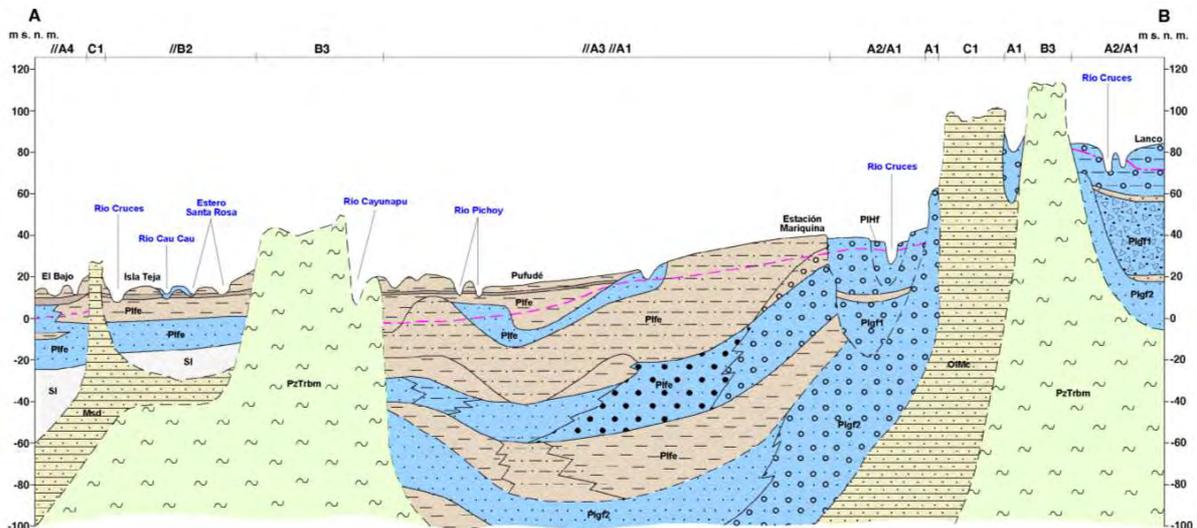


Figura 2-27. Distribución de los sistemas acuíferos en perfil A-B en el sector estudiado Modificado de Sernageomin 2008).

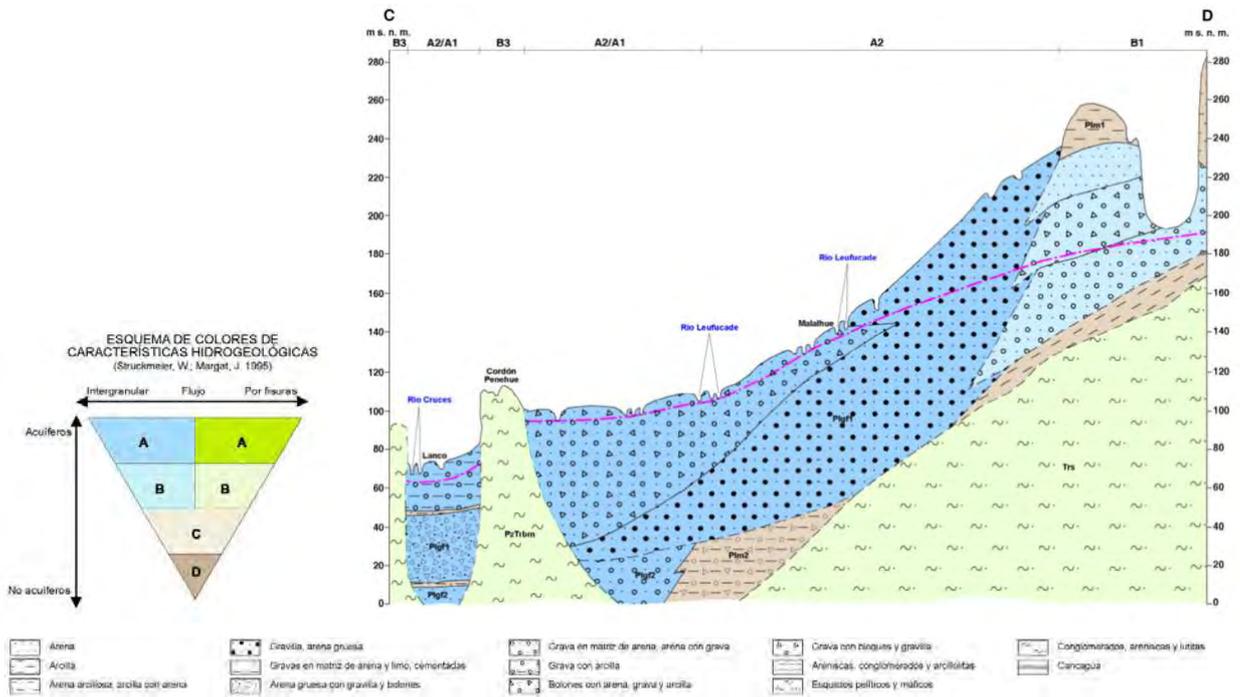


Figura 2-28. Distribución de los sistemas acuíferos en perfil C-D del sector estudiado (Modificado de Sernageomin 2008) y leyenda esquemática del mapa (Struckmeier, W; Margat, J, 1995).

2.6.3 Parámetros hidráulicos del modelo conceptual

El establecimiento de los parámetros hidráulicos se ha realizado en base al análisis empírico de las pruebas de bombeo disponibles en el área (a través de la revisión los Expedientes de Derechos de Agua). Para la cuenca de Valdivia han sido localizadas un total de 24 pruebas de bombeo (Figura 2-28) con datos, válidas e interpretables. En muchos de los casos no existen coordenadas de los puntos ensayados, datos de descenso y tiempo, solo existiendo la curva de agotamiento del pozo.

El análisis de las pruebas de bombeo encontradas se ha realizado mediante un método empírico de uso estimativo (Galofré, 1966; Custodio y Llamas, 1983), opción alternativa a:

$$T(m^2/d) = 100 \frac{Q \left(\frac{l}{s}\right)}{s_p(m)}$$

$$T(m^2/d) = K(m/d) b (m)$$

$T(m^2/d)$	Valor de la transmisividad estimada en m^2/d .
$Q (\frac{l}{s})$	Caudal aplicado en carga constante en l/s.
$s_p(m)$	Valor del descenso en el pozo (en metros).
$b(m)$	Espesor saturado del pozo (desde el N.F. hasta la profundidad del mismo).

En base a este análisis se han obtenido valores de transmisividad y conductividad hidráulica que aparecen en la Tabla 2-5, con los cuales se ha realizado una interpolación de los valores de la conductividad hidráulica (Figura 2-29).

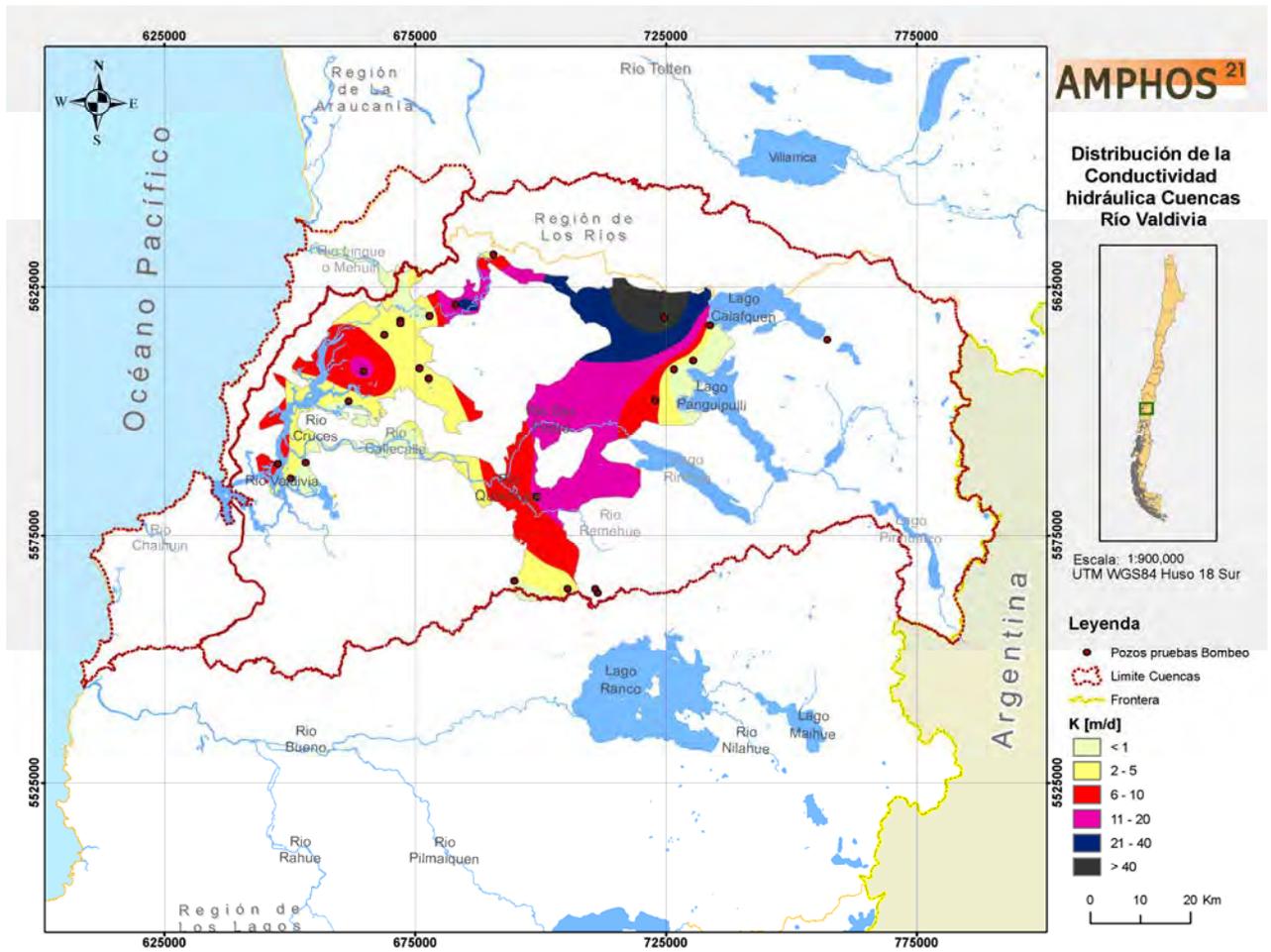


Figura 2-29. Mapa de isoconductividades hidráulicas del acuífero de la cuenca del Río Valdivia (Amphos 21).

Tabla 2-5. Parámetros hidráulicos calculados para la cuenca de Valdivia (Amphos 21).

Código Exp	UTM_N	UTM_E	Q (l/s)	NE [m]	ND [m]	T m ² /d	H [m]	b [m]	K [m/d]
ND-1001-2689	5631271	690663	50,00	11,10	35,10	208,33	65,00	53,90	3,87
ND-1001-2332	5615150	668860	14,00	4,31	20,45	86,74	36,00	31,69	2,74
ND-1401-639	5618100	672040	50,00	5,60	27,97	223,51	85,00	79,40	2,82
ND-1401-674	5617609	672041	26,00	6,40	21,95	167,20	60,00	53,60	3,12
ND-1401-847	5619037	677855	10,00	8,70	28,35	50,89	45,00	36,30	1,40
ND-1001-1088	5621300	683040	15,00	6,10	8,38	657,89	40,00	33,90	19,41
ND-1001-3688	5618759	724650	43,00	32,67	34,62	2205,13	73,00	40,33	54,68
ND-1001-2692	5617153	733758	7,00	12,00	16,64	150,86	54,00	42,00	3,59
ND-1001-2086	5614132	757149	6,00	3,70	18,20	41,38	19,50	15,80	2,62
ND-1001-1342	5607822	664713	10,00	8,29	10,10	552,49	56,00	47,71	11,58
ND-1001-2038	5601880	661775	34,00	10,89	55,60	76,05	88,00	77,11	0,99
ND-1001-1466	5608425	675840	20,00	12,11	36,99	80,39	60,00	47,89	1,68
ND-1401-221	5606355	677730	6,50	5,23	9,58	149,43	65,00	59,77	2,50
ND-1401-561	5602074	722896	5,00	16,00	22,00	83,33	30,00	14,00	5,95
ND-1001-2325	5609978	730402	1,30	14,33	23,74	13,82	31,00	16,67	0,83
ND-1001-1202	5589275	647565	4,00	12,00	13,84	217,39	41,60	29,60	7,34
ND-1001-1697	5586280	650165	5,60	10,00	20,01	55,94	86,00	76,00	0,74
ND-1001-2448	5589433	653185	3,50	4,70	29,98	13,84	77,00	72,30	0,19
ND-1001-1422	5582765	699170	10,00	12,00	20,00	125,00	24,00	12,00	10,42
ND-1001-1900	5565665	694790	20,00	8,25	50,30	47,56	79,00	70,75	0,67
ND-1001-1540	5563250	711350	20,00	17,70	31,15	148,70	70,00	52,30	2,84
ND-1001-1541	5564100	710900	4,00	40,80	44,55	106,67	50,00	9,20	11,59
ND-1001-2336	5564120	705420	36,00	26,30	50,75	147,24	85,50	59,20	2,49
ND-1001-2033	5608220	726610	16,00	6,00	31,00	64,00	71,00	65,00	0,98

Como se muestra en la Tabla 2-5, nos encontramos con unos valores de la conductividad hidráulica de entre 0,1 a 55 m/d. Los valores más elevados de la conductividad hidráulica

aparecen en la parte W del lago Calafquén reduciéndose progresivamente hacia el W en su conexión y confinamiento con el acuífero del sector NW.

El valor de la conductividad hidráulica también sufre una disminución hacia la zona sur llegando a valores de entre 2 y 5 m/d en el borde sur de la cuenca.

Por su parte el sistema acuífero situado en la zona NE-E presenta los mayores valores de la conductividad hidráulica en el sector central del valle del río Cruces y en los bordes del acuífero con la Cordillera de la Costa, disminuyendo en la zona de Valdivia a valores entre 1 y 10 m/d.

Los resultados obtenidos de la interpretación de un número limitado de pruebas de bombeo y su heterogénea distribución hacen que su interpolación sea tomada en cuenta de manera parcial, necesitando obtener mejores pruebas de bombeo y en mayor número para obtener resultados más confiables. No obstante, en la Modelización Numérica propuesta se realizará un re análisis de los datos aquí aportados mediante la calibración del modelo.

2.6.4 Áreas de recarga y descarga

Este modelo conceptual define que el mecanismo principal de recarga se produce por infiltración del agua de precipitación en el acuífero. Este mecanismo de recarga se produce de forma local en los depósitos anexos a la zona de los lagos Riñihue, Panguipulli y Calafquén.

Sobre el acuífero, los ríos son de carácter efluente, por lo que, en la mayoría de los casos vierte sus aguas al cauce, mecanismo de descarga principal en esta cuenca. En casos puntuales en los que los materiales presentan menores conductividades hidráulicas, es posible que el nivel freático no alcance a conectar con las aguas del cauce, siendo de carácter influente y, por tanto, aportando agua al acuífero.

El agua precipitada de la lluvia produce una escorrentía superficial concentrada en los esteros afluentes de los ríos principales, desembocando posteriormente en el mar.

La descarga del agua del acuífero a través de pozos y norias es secundaria debido al elevado volumen de las aguas que discurren de forma superficial, pero está aumentando en los últimos años, motivo por el cual se justifica la gestión del recurso. El aprovechamiento principal de aguas subterráneas se centra en torno a los centros urbanos (APR y AP), industrias, ganaderías y cultivos.

Se estima que otra parte de la descarga de agua del acuífero se produce al mar a través de la costa, localizada en los sectores norte (en Mehuín) y al sur en la zona costera próxima a la localidad de Valdivia, no siendo tan importante como la descarga a los cauces.

La realización de aforos en los cauces principales de la cuenca del río Valdivia se puede realizar una hipótesis de la relación río-acuífero en varios de sus sectores.

El río Cruces mantiene, en su mayoría, una relación efluente ("río ganador") como ya se pudo observar y medir en el aforo realizado en el sector aguas arriba de San José de Mariquina. Se ha podido inferir que esta relación se mantiene a lo largo de todo el río Cruces, siendo conscientes de que no en todos sus puntos se ha realizado la comprobación.

El río Calle-Calle fue aforado en el sector de Quinchilca, mostrando una relación, de igual manera efluente. En el sector aguas arriba de este punto analizado el río debiera mantener una relación también efluente. Aguas abajo, y hacia la ciudad de Valdivia el acuífero se vuelve confinado, por lo que en varios sectores éste pudiera estar desconectado del acuífero. Por ello se puede realizar la hipótesis de que en algunos sectores el río pudiera aportar agua al acuífero.

2.6.5 Estimación de la recarga en la zona de estudio

En primer lugar se calculó la precipitación para los diferentes intervalos hipsométricos existentes. Para esto se utilizó la ecuación que relaciona precipitación-elevación calculada en el presente trabajo (Figura 2-30 y Tabla 2-6) donde se ha determinado que la precipitación anual total en los acuíferos corresponde a 224,6 m³/s.

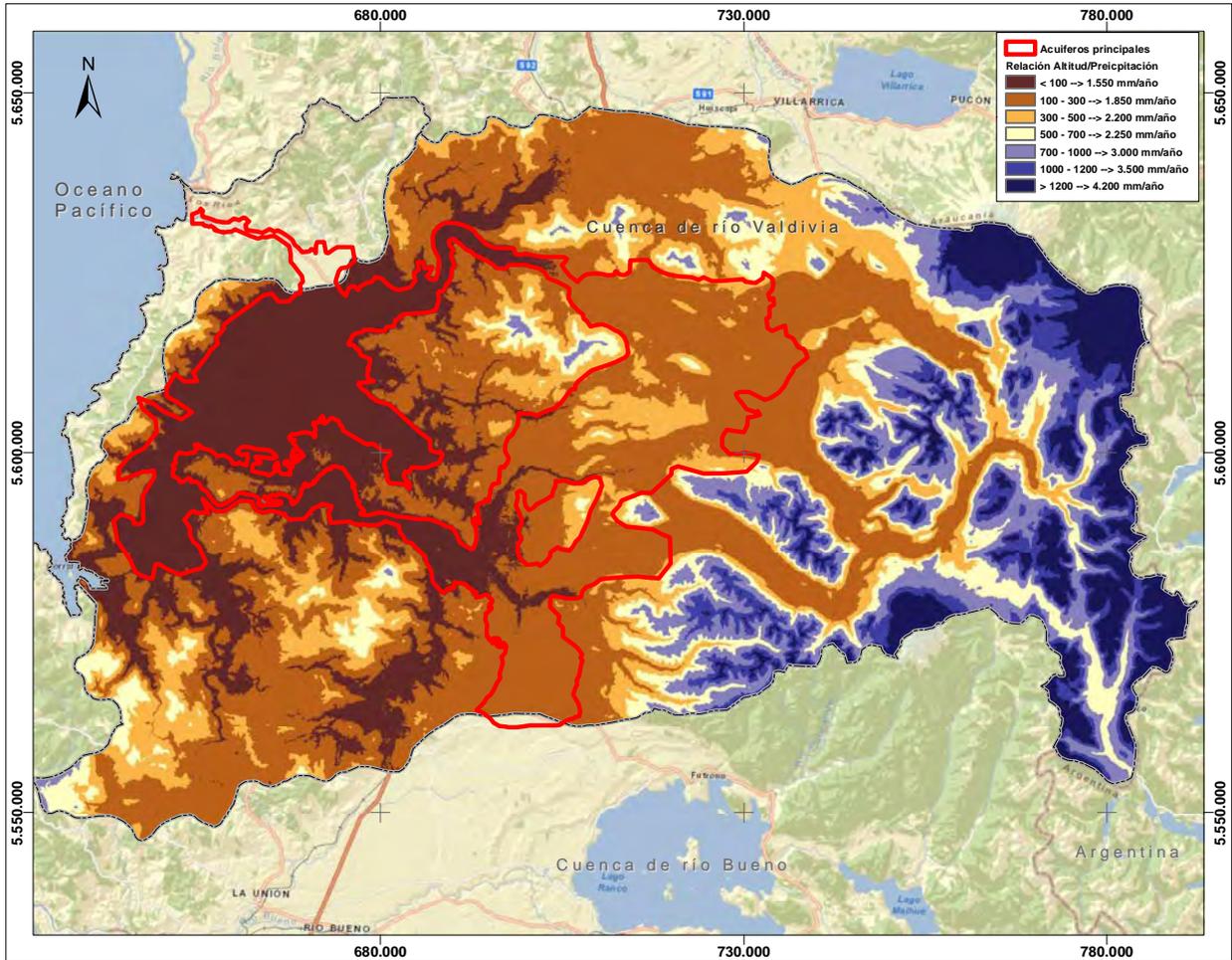


Figura 2-30 Distribución de precipitación (mm/año) en relación con la altitud en la cuenca (Amphos 21).

El cálculo de la infiltración efectiva depende de las propiedades físicas de cada tipo de suelo (parámetros del suelo), de su pendiente, litología y zonas de infiltración preferentes. Se ha asumido que el factor más importante en esta zona es el tipo de suelo ya que, desde el paralelo 40° Sur, los depósitos eólicos piroclásticos no sólo quedan confinados a las zonas cordilleranas y precordilleranas (como sucede en la zona central), sino que se extienden hacia la depresión intermedia. Esta configuración del suelo, provoca que en gran parte de la cuenca del río Valdivia la capa superficial presente importantes cantidades de suelos finos que dificultan el proceso de infiltración de excesos de lluvias. A lo anterior hay que agregar que en algunos sectores de la parte Este del valle central, se han detectado cantidades importantes de óxido de hierro (fierrillo) que actúa como capa aún más impermeable. Estas zonas corresponden a los denominados suelos "ñadis". Además existen extensas áreas de bajo drenaje en las cuales se dificulta

la recarga de los acuíferos profundos, producto de la existencia de un estrato superficial de baja permeabilidad y de la baja pendiente del terreno.

Tabla 2-6. Estimación de la precipitación a partir de la ecuación altura-precipitación en la cuenca (Amphos 21).

Altura (msnm)	Área km ² CUENCA	Área km ² ACUÍFEROS PRINCIPALES	Área km ² ACUÍFEROS SECUNDARIOS	Precipitación		
				mm /año	m ³ /s ACUÍFEROS PRINCIPALES	m ³ /s ACUÍFEROS SECUNDARIOS
< 100	1932	1519	305	1.667	80	16
100-300	3894	1218	485	1.843	71	28
300-500	1487	174	152	2.195	12	11
500-700	860	8	52	2.547	1	4
700-1000	880	0	11	2.987	0	1
1000-1200	542	0	0	3.515	0	0
>1200	667	0	0	4.100	0	0
Total	10.263	2.919	1.006	18.854	164,2	60,4

Dado que no existen antecedentes teóricos que permitan determinar con certeza un valor para el coeficiente de infiltración en este área, se estima que este coeficiente debiese variar entre un 7 y un 15% para distintos puntos de la cuenca (AC Consultores, 2003).

La existencia de materiales acuíferos fisurados (de baja transmisión) hace pensar que la infiltración a través de ellos debiese de ser inferior a la que se produce a través de los depósitos sedimentarios. Por ello se ha asumido que para estas zonas el coeficiente de infiltración debiera estar alrededor de un 5% (acuíferos secundarios, B), frente al 10% (valor promedio) postulado para los depósitos sedimentarios.

En este punto es importante señalar que la recarga estimada como un 5% en los acuíferos secundarios (3,02 m³/s) y de un 10% en los acuíferos principales (16,2 m³/s) de la precipitación es un valor referencial y que se encuentra respaldado por el hecho que la napa se encuentra relativamente superficial en gran parte de la zona de estudio, impidiendo una percolación de mayor magnitud.

Tabla 2-7. Valores de infiltración estimados para la cuenca del río Valdivia.

Tipo de materiales	Coeficiente de infiltración (%)	Infiltración al acuífero m ³ /s
Acuífero principal (depósitos)	7 a 15% (10%)	16,2

sedimentarios)		
Acuífero secundario (materiales fisurados)	3 a 7% (5%)	3,02

2.6.6 Uso de agua y extracciones

Para cuantificar las extracciones del sistema acuífero se incluye un catastro de pozos y norias relevantes en la cuenca. Esta base de datos se ha obtenido del Catastro Público de Agua (CPA) en el que se han registrado 421 captaciones, considerando sus características constructivas, caudales de operación y niveles de agua en el interior.

En el análisis realizado se determinó que los caudales inferiores a 5 l/s (78,4% de los puntos) son mayoritariamente de uso doméstico. En la práctica se extraen caudales despreciables respecto a los volúmenes utilizados en riego, agua potable e incluso uso industrial, por lo que no han sido consideradas en el catastro desarrollado y en el posterior análisis que de él se deriva.

En el terreno se ha observado que en la cuenca del río Valdivia el riego de campos de cultivo, en su mayoría tecnificado (berries, arándanos, cramberrys y otros), es más bien una actividad incipiente. Esto queda reflejado en el moderado uso de las aguas subterráneas para este fin, que corresponde a la mitad del recurso asociado al abastecimiento de agua potable. Este hecho diferencia a esta región de otras con explotaciones agrícolas, en las que el uso en riego es el principal consumidor de las aguas subterráneas, seguido por la actividad industrial, minería (en algunos casos), y luego del uso para abastecimiento de agua potable.

Con el fin de estimar los volúmenes de bombeo de las captaciones existentes, se empleó la información existente del catastro de captaciones antes mencionado, obteniendo una extracción aproximada de 4,1 m³/s, determinado en terreno que solo un 25% de los derechos están siendo ocupados. Por este motivo se considera que el caudal de bombeo podría ser de 1,025 m³/s.

2.6.7 Condiciones de borde

El modelo conceptual de funcionamiento del acuífero comprende todas las zonas ocupadas por sedimentos cuaternarios ubicadas en los valles conformados por la presencia de los ríos Cruces (al norte) y Calle-Calle (al sur), desde la localidad de Lanco hasta la ciudad de Paillaco. Las condiciones de borde están definidas principalmente por

las zonas de no flujo y los niveles del agua en los lagos y ríos. Las zonas de no flujo son los límites que definen la geometría superficial del acuífero, lo cuales son explicados a continuación:

- El límite Este del acuífero comprende los bordes de los principales lagos de la zona (Riñihue, Panguipulli y Calafquén).
- El límite Oeste queda definido por el nivel constante que impone el mar en Valdivia y la zona de no flujo está dada por la cordillera de la Costa.
- En el borde Sur quedaría definido por una divisoria de aguas subterráneas que separa los acuíferos de río Bueno y Valdivia.
- El borde Norte lo define el cordón transversal existente entre el lago Panguipulli y la ciudad de Lanco.

Las condiciones de borde de nivel están definidas por el nivel del espejo de agua en los 3 principales lagos de la zona (Calafquén, Panguipulli, Riñihue) y por el nivel del flujo en los ríos Calle-Calle, Cruces y sus principales afluentes. Dichas zonas podrán entregar o denar agua al acuífero dependiendo del nivel piezométrico. Además, en las cercanías de la ciudad de Valdivia donde confluyen los dos principales ríos de la región, se establece una condición de nivel constante que corresponde al mar, la cual representa la salida subterránea del sistema acuífero.

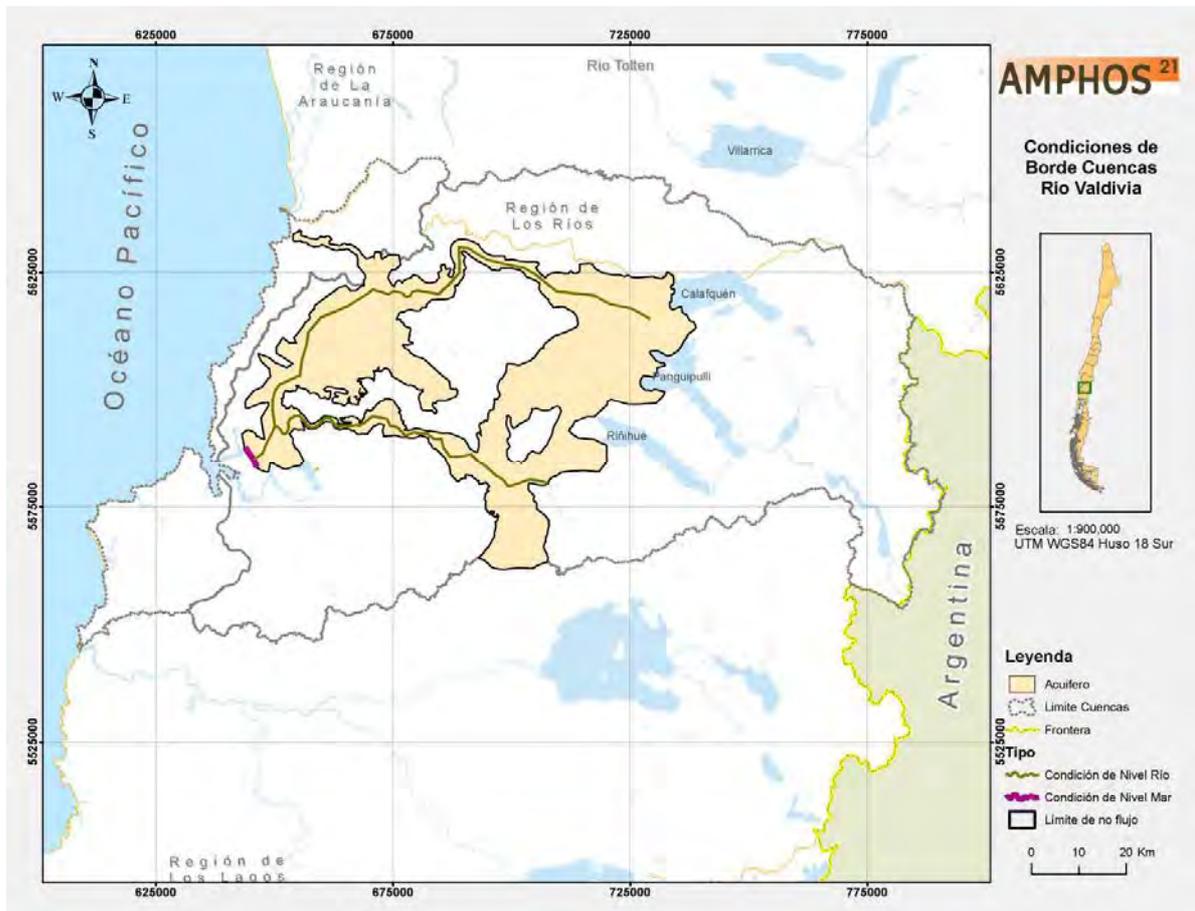


Figura 2-31. Condiciones de borde establecidas para el acuífero principal (Amphos 21).

2.6.8 Interacción Río – Acuífero

La red de drenaje natural de la cuenca está constituida por una serie de cauces de diferente magnitud siendo los ríos Cruce y Calle-Calle los ejes principales.

Los lechos de estos ríos se encuentran encauzados por terrazas compuestas generalmente de material fluvial y glaciofluviales. Este hecho origina que los lechos de estos ríos se encuentren a una cota sensiblemente menor con respecto al terreno circundante por lo que actúan como buenos sistemas de drenaje del acuífero, especialmente, ante eventos de lluvia. Se debe mencionar que esta situación ocurre desde la zona de los lagos hasta la altura de Mariquina, en el caso de río Cruces y hasta Antihue para el caso del río Calle Calle, debido a que a partir de estas zonas el acuífero se confina y el río discurre por niveles de arcillas desconectándose del sistema.

Para realizar un análisis de la interacción entre los cauces superficiales y el acuífero se deben distinguir los cauces que nacen desde los lagos, de aquellos que se forman de manera natural en las cuencas intermedias.

El río San Pedro nace del Lago Riñihue y sus caudales dependen tanto del aporte del lago, de las vertientes así como de los aportes directos de las precipitaciones.

En los tramos medios y bajos de estos ríos, la napa se encuentra a nivel superficial por lo que estos cauces actúan como drenajes del acuífero aflorando gran parte del agua que fluye por el subsuelo (Figura 2-32).

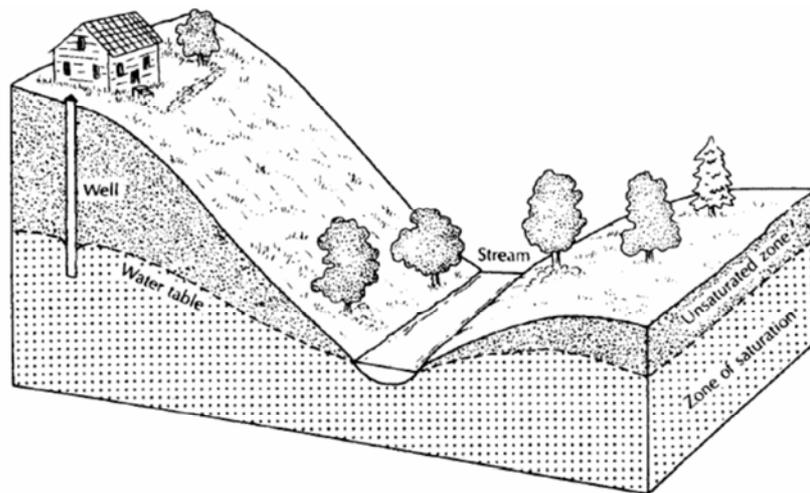


Figura 2-32. Ejemplo de la interacción río-acuífero que se produce en algunos sectores (cauce efluente).

2.6.9 Piezometría y dirección de flujo

A partir de la información de niveles medidos durante la campaña de terreno para el catastro de captaciones durante septiembre y octubre de 2012 se trazaron las curvas piezométricas (Figura 2-33).

El flujo subterráneo presenta una dirección E-W en el sector norte de la cuenca de río Valdivia y dirección NE-SW, en la zona central, discurriendo por los valles principales.

El gradiente hidráulico de la zona acuífera en los sectores más altos de la cuenca, es del orden de un 0,7%. Hacia la parte occidente el gradiente disminuye considerablemente

debido a la menor pendiente que presenta el terreno (zonas más planas), alcanzando valores de 0,1%.

En la Figura 2-33 se presentan las apolíneas de la piezometría con un espaciado de 25 metros entre ellas. En el (Anexo G – Hidrogeología) se presenta esta misma piezometría con un espaciado cada 10 m, que no sería posible mostrar en la figura debido a una excesiva densidad de las curvas.

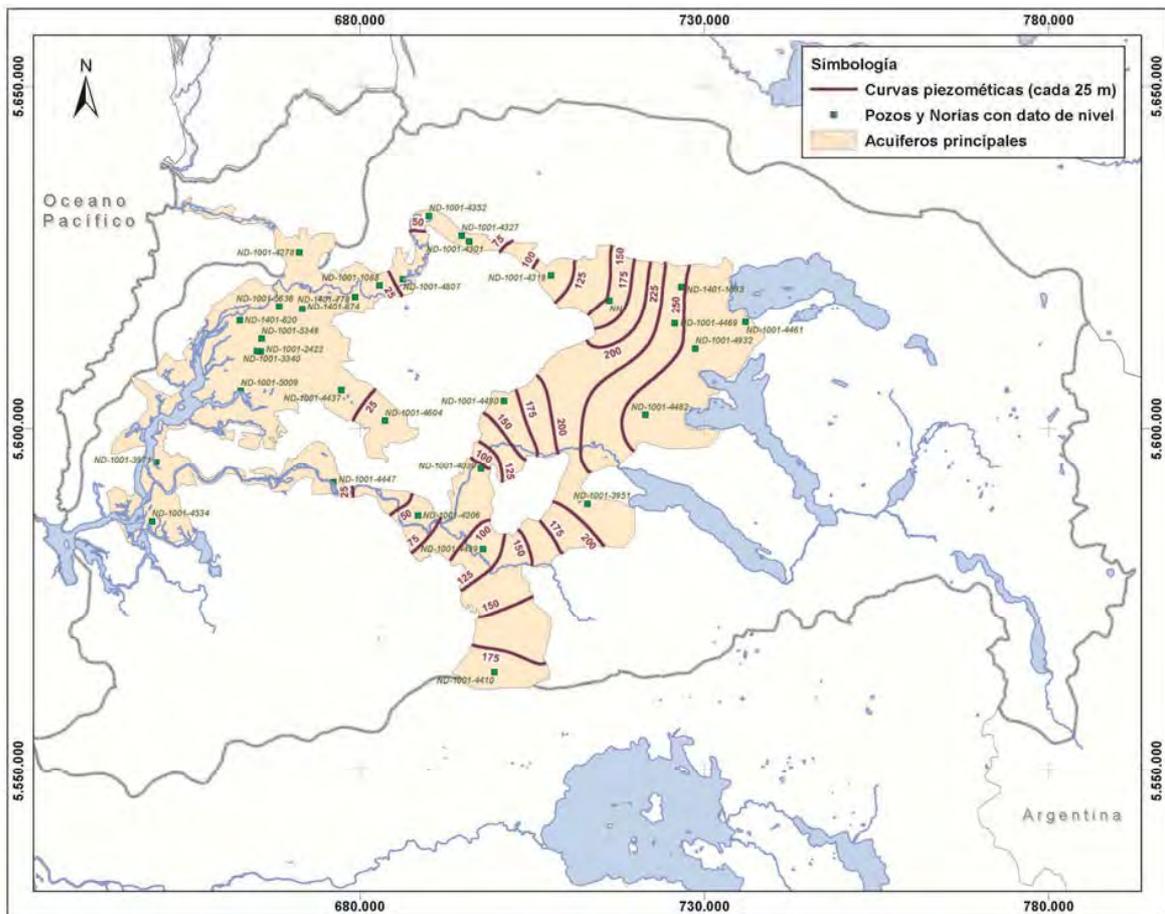


Figura 2-33. Mapa de isopiezías (msnm) en el acuífero de la cuenca de río Valdivia (Amphos 21).

2.7 BALANCE HÍDRICO PRELIMINAR

2.7.1 Balance hídrico del sistema acuífero

Con el objetivo de establecer el balance hídrico en el acuífero se ha estimado la recarga y descarga anual del sistema subterráneo. Los parámetros utilizados en la realización del balance se han obtenido a partir de los antecedentes existentes, datos medidos periódicamente (precipitaciones y caudales) y de la información de las campañas de terreno realizadas. Los términos del balance que se han tenido en cuenta son los que se detallan a continuación y que quedan esquematizados en la Figura 2-34.

✓ **Entradas al sistema:**

- Infiltración por recarga de precipitaciones.
- Retorno de riego.
- Infiltración de los ríos y lagos.

✓ **Salidas del sistema:**

- Drenaje hacia los ríos (sistema mayoritariamente efluente).
- Bombeos y vertientes.
- Salidas por el oeste y noroeste (hacia el mar).

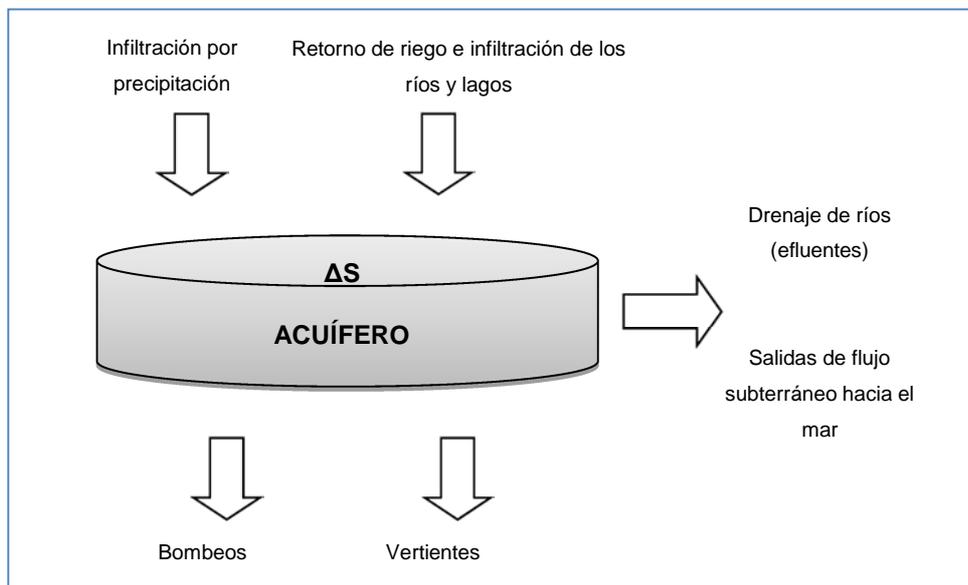


Figura 2-34. Esquema de funcionamiento del sistema hídrico (Amphos 21).

2.7.2 Cuantificación estimativa del balance hídrico

✓ Entradas:

- Infiltración: Calculada a partir de un porcentaje (5%-10%) de las precipitaciones. El área de recarga estimada es de unos 3.925 km², con lo que la infiltración es de = **19,2 m³/s**.
- Retorno de riego: estos han sido calculados como el 7-10% de las extracciones subterráneas que se producen en la zona. Por tanto los retornos constituyen = **0,2 m³/s**.

Se considera que en la zona de estudio el riego a través de canales es poco significativo debido al uso del suelo y la actividad económica donde se podría estimar un valor de **0,1 m³/s**.

✓ Salidas:

- Salida por drenaje de los ríos (efluentes): se ha calculado mediante la diferencia de caudal por unidad de superficie en diversas estaciones fluviométricas de la zona de estudio. Con lo cual, se ha estimado un coeficiente de 0,02. Este factor se ha multiplicado por la extensión de la red de drenaje superficial (ríos=900 km) discurrentes por el acuífero y se ha obtenido un caudal de salida de **18 m³/s**. Este valor se deberá revisar y evaluar posteriormente en la implementación del modelo numérico.
- Extracción de los pozos: Esta información ha sido proporcionada por la CPA y el caudal obtenido es de 4,07 m³/s, pero se ha determinado en terreno que solo entre un 25-30% de los derechos están siendo ocupados. Por este motivo se considera que el caudal de bombeo podría ser de **1,4 m³/s** (dicho valor se irá actualizando conforme se analicen los datos de terreno).
- Descarga hacia el mar: Dicha salida se ha valorado mediante la expresión de la ley de Darcy ($Q=AKi$), siendo la K de 3-5 m/d, el gradiente hidráulico (i) de 0,01-0,07 y siendo L= 6.000-8.000 m y b= 20 m. Con estos datos se obtiene una salida subterránea de **0,04 a 0,07 m³/s** y se

considera que no es ajustada para las dimensiones y comportamiento de la zona de estudio. Este valor se deberá ajustar mediante un gradiente más detallado y una K posiblemente más alta.

Por lo que la expresión general del balance del sistema acuífero resulta de la siguiente forma:

$$\text{RECARGA} - \text{DESCARGA} = \Delta S \text{ (volumen almacenado)}$$

$$19,5 \text{ m}^3/\text{s} - 19,5 \text{ m}^3/\text{s} = \Delta S$$

$$\Delta S = 0 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.8 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO CONCEPTUAL

En base a la información analizada de hidrología, geología, hidrogeología, junto con las labores de catastro de puntos de agua y prospección geofísica, se ha determinado un modelo conceptual del funcionamiento de la cuenca del río Valdivia.

Este modelo conceptual de funcionamiento del acuífero comprende todas las zonas ocupadas por sedimentos cuaternarios ubicadas en los valles conformados por la presencia de los ríos Cruces (al norte) y Calle-Calle (al sur), desde la localidad de Lanco hasta el borde sur de la cuenca en la zona de Paillaco (Figura 2-35).

El límite Este del acuífero comprende los bordes de los principales lagos de la zona (Riñihue, Panguipulli y Calafquen). El límite Oeste queda definido por el nivel constante que impone el mar a su salida por la zona de la población de Valdivia y el valle del río Lingue (al norte en la población de Mehuín). El borde restante con el mar se establece como impermeable al estar en contacto los materiales de la cordillera costera (roca). Y en el borde sur queda definido por una divisoria de aguas subterráneas separando los acuíferos de río Bueno y Valdivia.

La recarga se produce por infiltración del agua de precipitación. Este mecanismo de recarga se produce principalmente en la superficie del acuífero y de forma local en los depósitos anexos a la zona de los lagos Calafquén, Panguipulli y Riñihue.

Sobre el acuífero, los ríos son de carácter efluente, por lo que el acuífero es el que, en la mayoría de los casos, vierte sus aguas al cauce. En casos puntuales (hacia la costa) en los que los materiales sobre los que discurre los ríos presentan menores conductividades hidráulicas es posible que el nivel freático no alcance a conectar con las aguas del cauce, siendo este de carácter influente y, por tanto, aportando agua al acuífero.

Es en estas últimas zonas donde el agua precipitada de la lluvia produce una escorrentía superficial concentrada en los esteros afluentes del río Valdivia y en los bordes de las cuencas costeras. El agua que discurre por estos cauces es en su mayoría descargada al río principal, desembocando posteriormente en el mar.

La descarga del agua del acuífero a través de pozos y norias es secundaria debido al elevado volumen de agua que discurre de forma superficial. El aprovechamiento principal de aguas subterráneas se centra en torno a los centros urbanos, industrias, ganaderías y cultivos.

Otra descarga del acuífero se produce al mar de forma subterránea en la zona costera, en la desembocadura del río Valdivia en el sur y el estero Lingue en la zona norte.

Por último, en la zona de Valdivia el acuífero se encuentra confinado y se pierde la conexión río-acuífero por la presencia de una capa superficial de arcilla de más de 15 metros, en las zonas de Lanco-Panguipulli y Panguipulli-Paillaco el acuífero es de naturaleza libre existiendo una relación más fuerte entre los ríos y el flujo subterráneo.

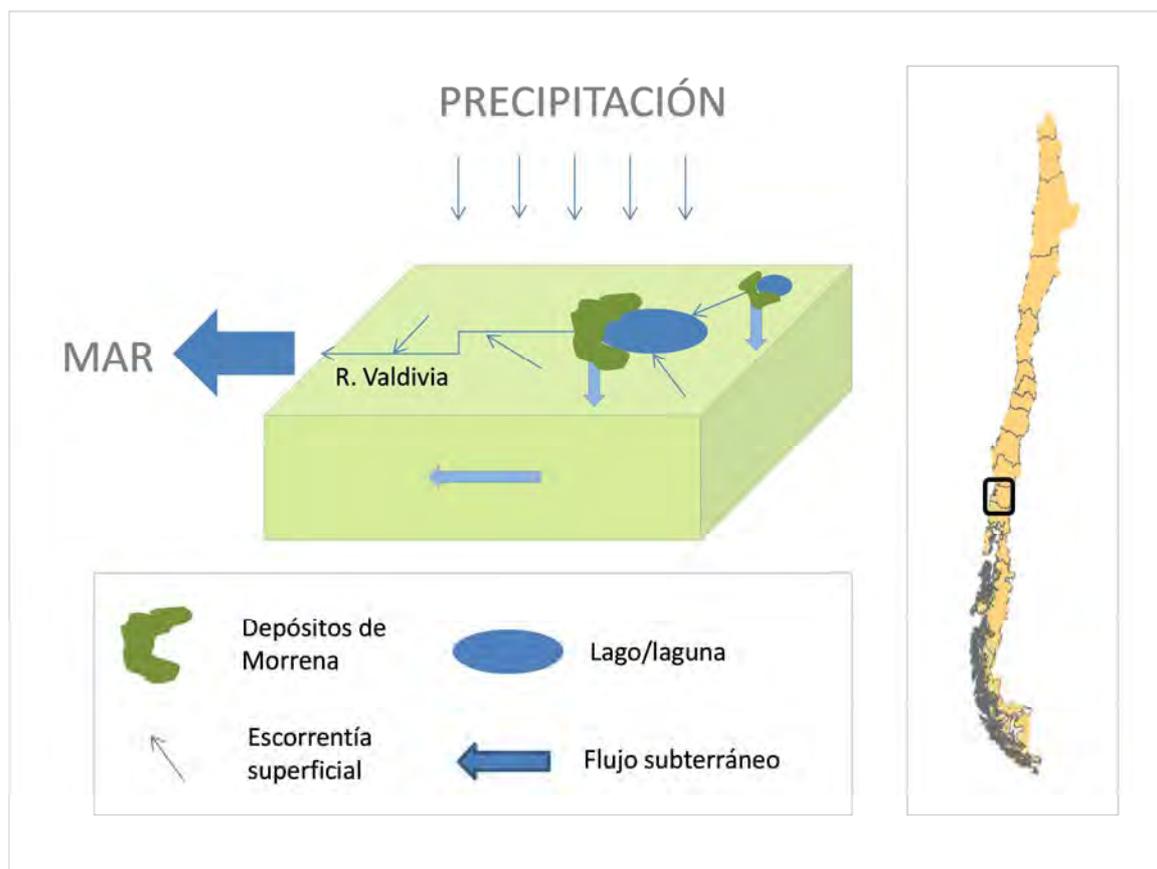


Figura 2-35. Modelo conceptual previo de la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).

2.9 MODELO NUMÉRICO

El modelo conceptual establecido para la cuenca del río Valdivia en el capítulo anterior se ve reflejado en un modelo numérico que permite realizar simulaciones acerca de la gestión de las aguas subterráneas en la zona. De esta manera, se realiza una primera aproximación al comportamiento de las aguas subterráneas y superficiales en dicha cuenca, que dan una visión cualitativa de gran utilidad para realizar una mejor gestión de las mismas.

2.9.1 Metodología

2.9.1.1 Selección del código computacional

Los cálculos del modelo numérico se han hecho con el código Modflow a través de la interfase Visual Modflow versión 2011.1. El método de resolución de las ecuaciones en derivadas parciales de flujo es el de diferencias finitas, lo que condiciona la estrategia de construcción del modelo, de la forma que se indica en el capítulo siguiente.

El movimiento tridimensional del agua subterránea de densidad constante a través de un material de medio poroso puede describirse por la ecuación diferencial siguiente (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : Conductividad hidráulica.
- W : Entradas o salidas del sistema, como recarga y bombeo.
- S_s : Almacenamiento específico.
- h : Carga hidráulica o nivel de agua.

En general K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} pueden ser funciones del espacio y W puede ser función del tiempo y del espacio. La ecuación anterior describe el flujo de agua subterránea en condiciones de régimen transiente, en un medio heterogéneo y anisótropo, siempre que los ejes de coordenadas estén alineados con los ejes principales de la conductividad hidráulica. Junto con las ecuaciones de borde de flujo, niveles de agua y las condiciones .iniciales, constituyen la representación matemática del sistema de flujo de aguas subterráneas. Para resolver esta ecuación, MODFLOW utiliza el método de diferencias finitas, donde el sistema continuo descrito por la ecuación es reemplazado por un set

finito de puntos discretos en el espacio y en el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por términos calculados de la diferencia de carga hidráulica en esos puntos. De esta forma la ecuación diferencial original es transformada en un sistema de ecuaciones algebraicas lineales, cuya solución entrega valores de carga en puntos y tiempos específicos. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución continua de cargas hidráulicas variando en el tiempo que entregaría una solución analítica de la ecuación diferencial parcial de flujo (Anderson y Woessner, 2002).

2.9.1.2 Fuente de información: Modelo conceptual.

La información de base para implementar en el modelo numérico se ha tomado del establecimiento de un modelo conceptual del funcionamiento de la cuenca del río Valdivia, detallado en los capítulos anteriores del presente estudio. Para su construcción se han realizado una serie de simplificaciones geométricas y conceptuales que ayudan al buen funcionamiento del modelo y que se basan en los siguientes puntos (Figura 2-36):

- Geología e hidrogeología: la disposición en la vertical de las unidades hidrogeológicas se ha realizado de forma unificada, estableciendo un acuífero único equivalente, producto de una aproximación simplificada del funcionamiento real.
- Geometría del acuífero: para facilitar la simulación del comportamiento del acuífero ha sido necesario simplificar la geometría horizontal compleja del acuífero suavizando los contornos del mismo. A su vez, el acuífero fue dividido en 2 masas acuíferas: masa acuífera W y masa acuífera E. El tratamiento individual de cada una de ellas permite su mejor modelación, debiendo tener en cuenta los flujos de entrada y salida de cada una de las unidades y su acoplamiento. Esta simplificación supone una disminución en el tiempo de computación, minimizando también los errores de la modelización, y por ende, una simplificación de la realidad que, debido al escaso conocimiento del área, supone la mejor representación posible de la realidad.
- Uso del agua en el sector: los caudales de aprovechamiento del agua subterránea establecidos en los Expedientes de Derechos de Agua se han unificado por sectores. Esta unificación supone el tratamiento conjunto de varios Derechos de Agua Subterránea, permitiendo tratar éstos de una manera más simple, sin que ello suponga una disminución de la calidad de los resultados obtenidos, ni de su tratamiento numérico.

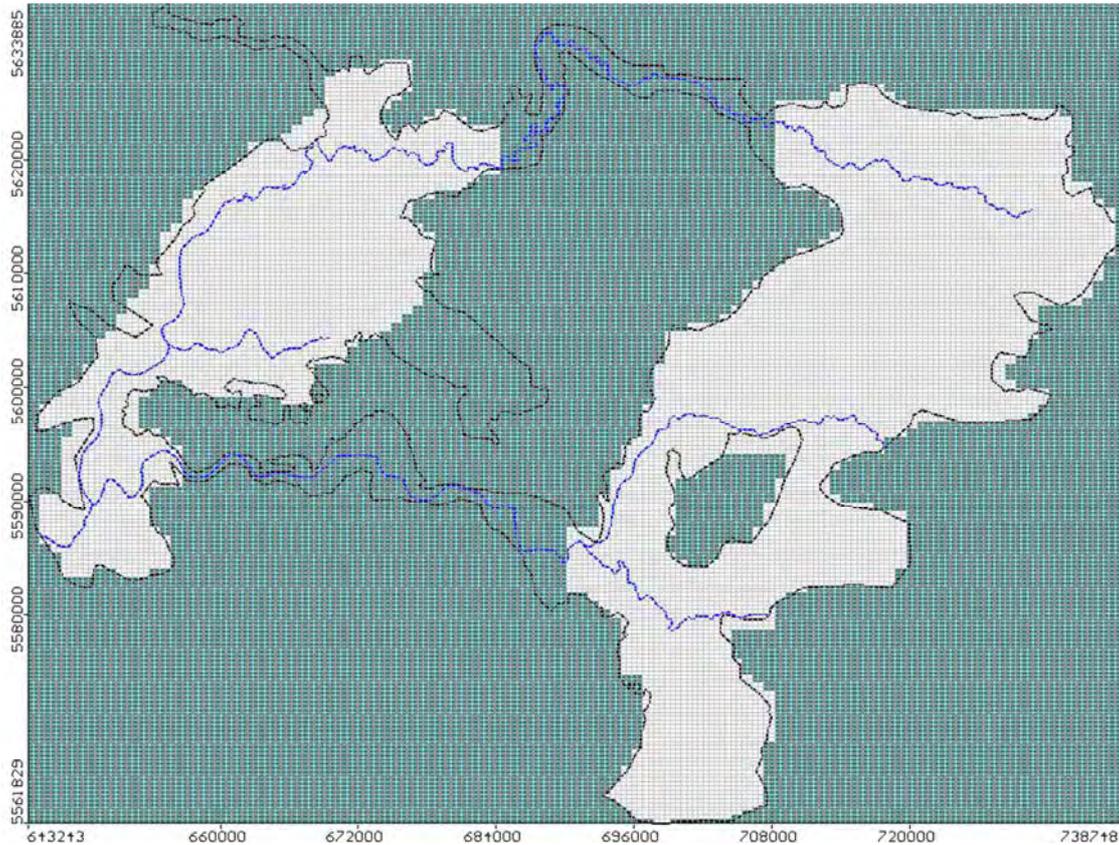


Figura 2-36. Dominio de la modelación de la cuenca del río Valdivia con las simplificaciones descritas. La línea de color negro es el límite acuífero y la línea azul, la hidrografía de los cauces principales de la cuenca (Amphos 21).

2.9.2 Estructura del modelo

2.9.2.1 Tratamiento del acuífero

El sistema acuífero de la cuenca del río Valdivia se compone de acuíferos confinados, semiconfinados y libres, como ya se explicó en el capítulo 2.5.2. Este sistema acuífero se ha modelizado como un acuífero único con parámetros hidrogeológicos "equivalentes", debido a la complejidad y falta de más datos acerca de su estructura interna, lo que simplifica los cálculos y permite una mejor convergencia del código. El término equivalente define a una calibración de los parámetros para establecer un valor intermedio y lo más aproximado al de los valores reales de conductividad hidráulica de todas las unidades existentes (tanto en su heterogeneidad horizontal como vertical). Este procedimiento ha sido ampliamente utilizado en acuíferos de elevada complejidad y con un tratamiento a escala regional, como ha sido el aquí estudiado.

2.9.2.2 Dominio de la modelación

El dominio del modelo constituye la cuenca del río Valdivia, basado en el modelo conceptual asumido y explicado en el capítulo anterior. Para la simplificación de su modelaje numérico se ha dividido el dominio en 2 zonas, situadas al W y al E (Figura 2-37).

La zona W (en N en la figura se sitúa en la parte superior) comprende el dominio hidrográfico del río Calle-Calle con todos sus afluentes, sesgado en su parte superior por la división del modelo. La parte inferior izquierda representa la unión de los ríos Calle-Calle y Cruces a su paso por la ciudad de Valdivia.

La masa acuífera individualizada en la zona E (zona de Panguipulli), contiene el nacimiento del río Calle-Calle al N, y el nacimiento de los ríos San Pedro y Quinchilca al S, a la salida del lago Riñihue.

En todo momento se ha intentado respetar las divisorias de agua topográficas que conforman la cuenca de agua superficial. Sin embargo, el modelo del acuífero como tal se limita a la extensión de las formaciones permeables que presumiblemente están saturadas, lo que se ha derivado mediante observaciones directas e interpretación geológica. Así, el dominio implementado es el que se muestra en la Figura 2-37.

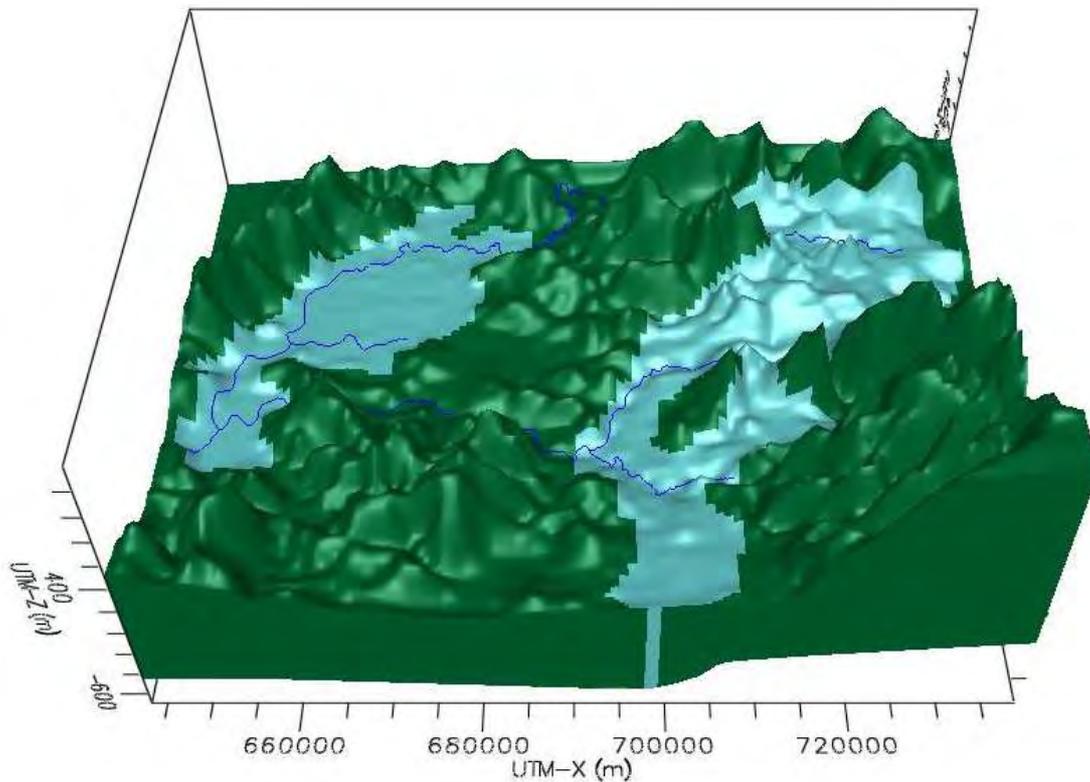


Figura 2-37 Dominio del modelo numérico en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).

2.9.2.3 Superficie topográfica y basamento

Los límites superior e inferior del modelo numérico son la topografía de la zona y una interpolación del basamento del acuífero (a partir de los datos obtenidos en los trabajos de geofísica), respectivamente.

Para su posicionamiento y representación, ambas capas han sido interpoladas mediante el método "natural neighbours", que confiere una aproximación más suave a las superficies que se quieren representar.

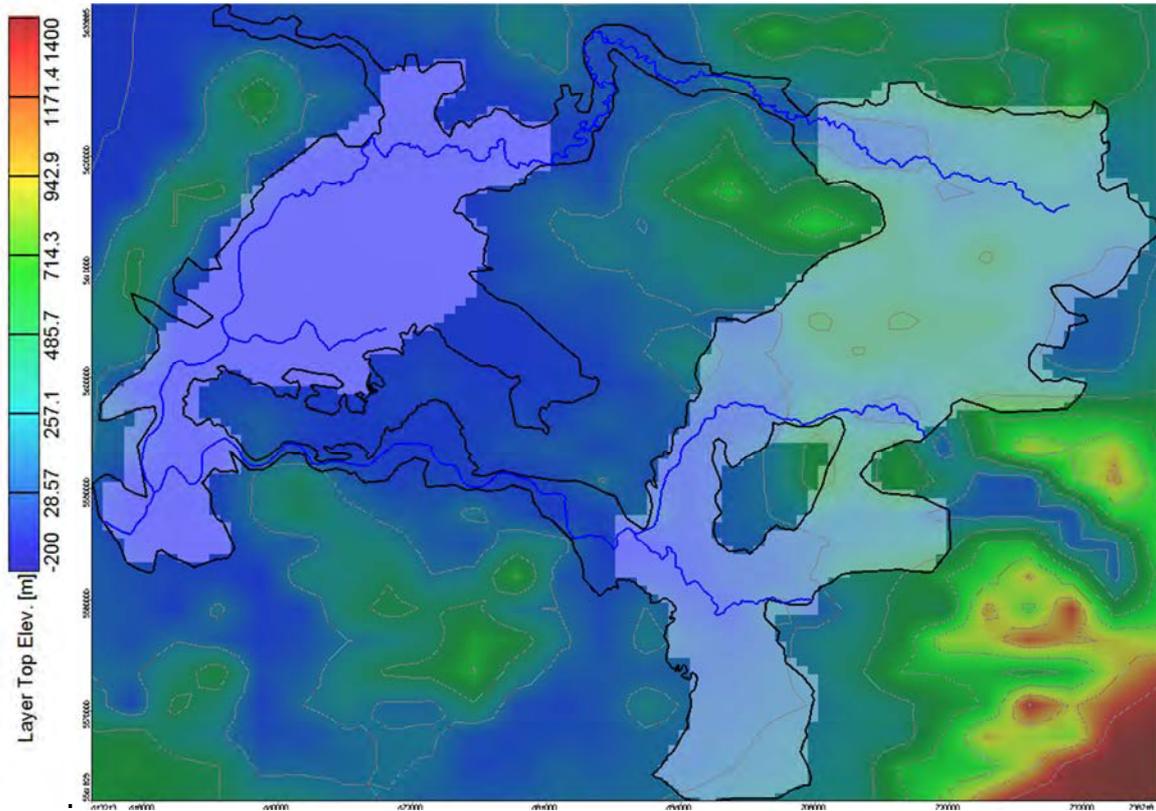


Figura 2-38. Superficie topográfica del área modelada (entre 0 –azul- y 1400 msnm – rojo-). (Amphos 21).

2.9.2.4 Discretización espacial: Malla.

Dado que el método numérico de resolución es por diferencias finitas, el mallado obedece a las restricciones propias del método: celdas paralelepípedicas (prismas de base cuadrada, en 3D). La discretización vertical es de una celda, dado que no se esperan gradientes verticales ni confinamientos a escala regional (Figura 2-39). Arealmente, el tamaño de las celdas es de 360 x 477 m y uniforme, suponiendo un nivel de detalle suficiente para representar el funcionamiento de las relaciones rio-acuífero a gran escala. En total, el modelo tiene 40.000 celdas entre activas e inactivas, para cubrir una extensión total de 72 x 95 km (6.840 km²). La Figura 2-39 muestra la malla utilizada.

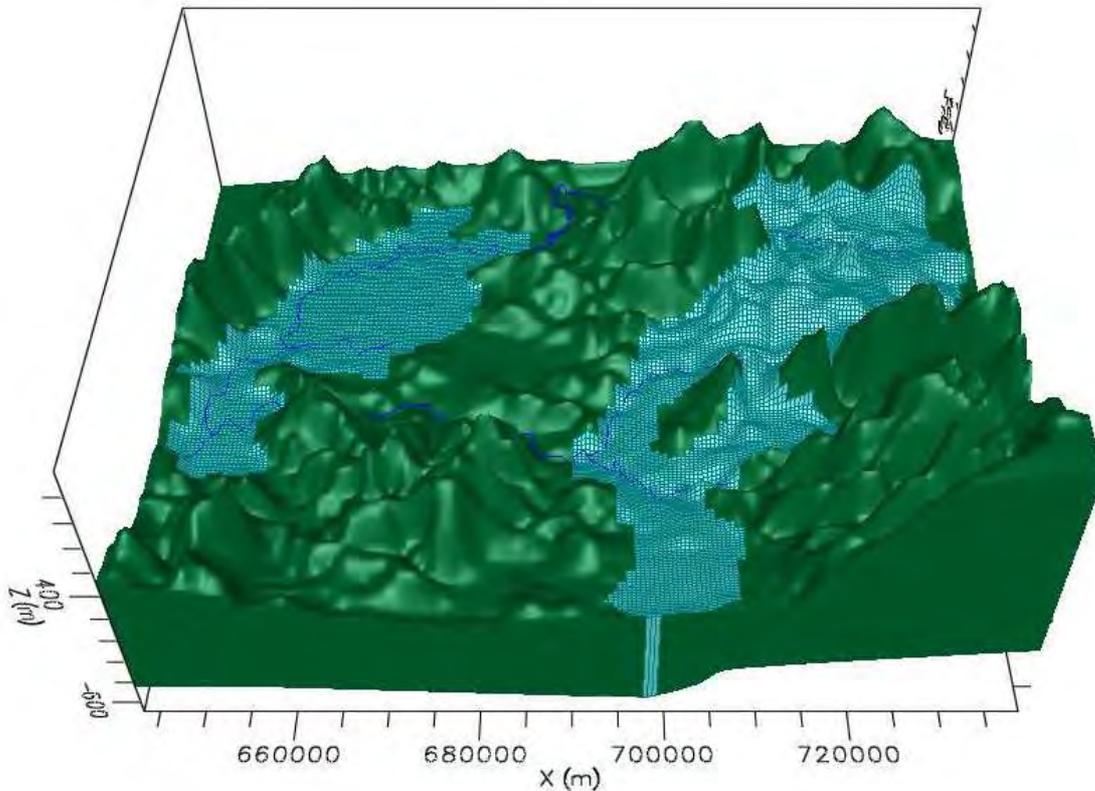


Figura 2-39. Malla regional del modelo numérico de la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).

2.9.2.5 Régimen de simulación

Las simulaciones se han realizado en régimen estacionario, con un tiempo de cálculo de un día. El escaso conocimiento del área estudiada, así como la ausencia de monitoreo de los niveles del agua subterránea hacen que la representación del modelo en estado estacionario sea la más adecuada para mostrar su funcionamiento general y verificar el modelo conceptual asumido.

2.9.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno de un modelo numérico representan los parámetros (niveles, conductancias,...) que dominan el comportamiento del modelo conceptual en la zona (Figura 2-40).

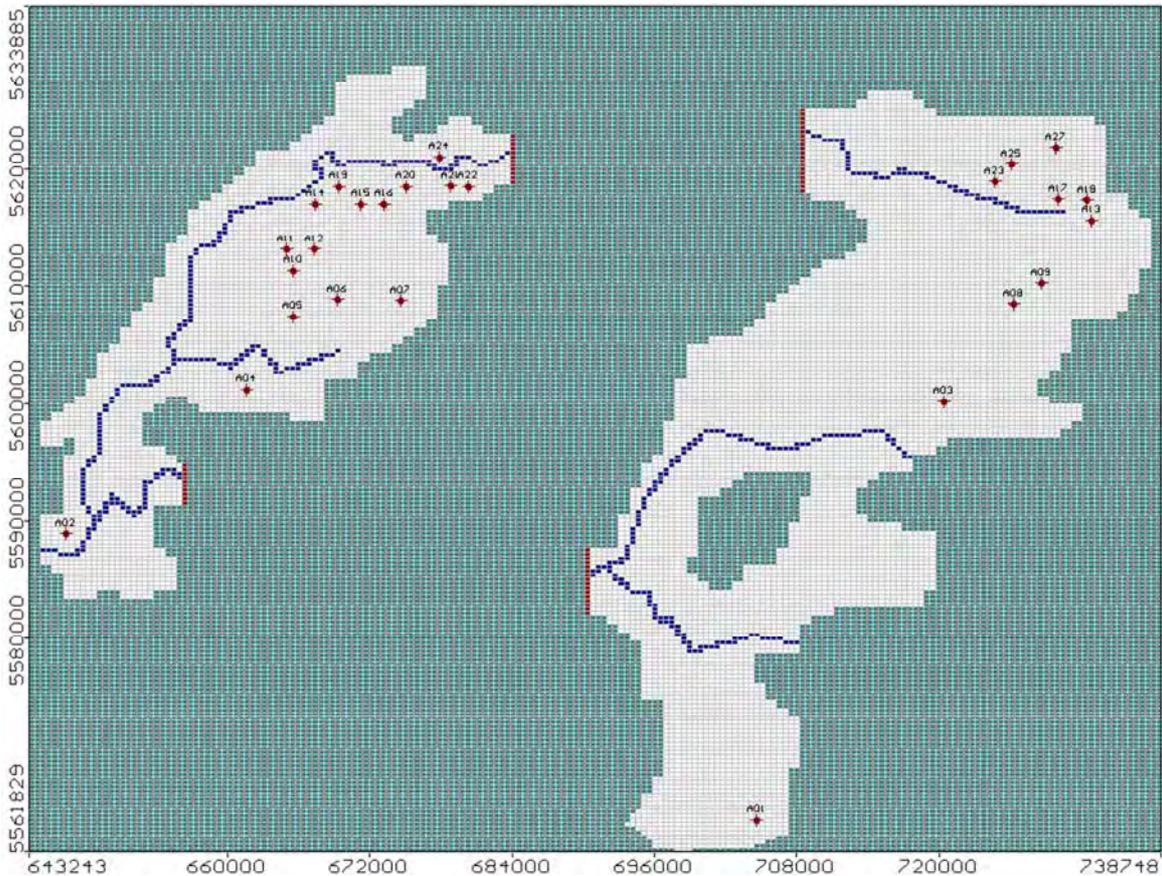


Figura 2-40. Condiciones de contorno del modelo (caudal nulo en los bordes, condición de río – azul-, condición de nivel fijo -marrón- y puntos de bombeo del agua subterránea), (Amphos 21).

El modelo de la cuenca de Valdivia presenta las siguientes condiciones de contorno:

- Internas:
 - Pozos de bombeo: los bombeos de las aguas subterráneas dentro del modelo corresponden a los expedientes de los Derechos de Agua Concedidos a la fecha del presente estudio. Estos representan el aprovechamiento actual de las aguas subterráneas en la zona, considerando que dicho uso es aún menor en la realidad de lo que se representa en el modelo. Posteriormente al calibrado del modelo se realiza una simulación con los caudales reales estimados, realizando una descripción de la modificación del comportamiento respecto al caso inicial.

- Externas
 - Caudal nulo en la base y en los límites exteriores
 - Condición de río (nivel fijo más coeficiente de goteo): la condición de contorno fijada en los cauces superficiales de la zona modelizada se han tratado con la "condición río", que supone un nivel constante y un valor de la conductancia (permeabilidad) del lecho del río, que simula la relación río-acuífero en cada celda de la malla.
 - Condición de nivel fijo: se establecieron 4 condiciones de nivel fijo en los sectores en los que se seccionaron las masas acuíferas. Estas condiciones de nivel fijo permiten calcular y calibrar el volumen/caudal de agua saliente de una zona, y entrante a la otra zona. La calibración más importante se ha realizado mediante la campaña de aforos realizada en los cauces principales, y expuesta en el Anexo I – Ensayos de aforo.
 - Recarga: se realizó una zonación de la recarga para todo el dominio activo del modelo numérico, dando diferentes valores en función de la precipitación y los índices de infiltración del suelo.

2.9.3.1 Tratamiento de los Derechos de Agua en el modelo

En la modelación numérica de la cuenca del río Valdivia han sido aplicados un total de 419 Derechos de Agua Concedidos a la fecha de realización del presente estudio. Para realizar un manejo más eficiente de los puntos de extracción de agua se realizó la unificación de los derechos de agua en base a una malla de 50 por 50 celdas, con un ancho por largo de las misma de 1.910 por 1.441 m. De esta manera, descontando los puntos en las zonas inactivas (en color verde) del modelo (3 puntos de bajo caudal: 17.107 m³/d) se han obtenido un total de 26 puntos de extracción. Estos se localizan principalmente en la zona de Lanco y Valdivia (masa acuífera W) y en la población de Panguipulli (masa acuífera E).

El volumen total de extracciones (en el área modelada), tenido en cuenta el valor de caudal correspondiente a los Expedientes de Derechos de Agua Concedidos, es de 244.425,6 m³/d. Estas concesiones se dividen entre ejercicios Permanentes y Continuos (99,28%), Permanente y Alternado (0,36%) y Permanente y Discontinuo (0,36%).

Cabe destacar que, según lo observado en terreno y analizado en el modelo conceptual, del total de Derechos de Agua Concedidos, solo un pequeño porcentaje serían efectivamente utilizados (entorno al 10%). Se denota la existencia de numerosas

concesiones de carácter estratégico (solicitudes que evitan la concesión del Derecho de Agua de parcelas contiguas) y la existencia de extracciones de agua no concesionadas en muchos puntos. Este hecho hace que el error en la cuantificación de los volúmenes explotados sea muy grande, lo que, en el estado actual de conocimiento, no sería posible realizar.

2.9.4 Distribución de los Parámetros

El modelo se ha zonificado de forma consistente al modelo conceptual para la función de recarga (Figura 2-41), la conductividad hidráulica de los acuíferos (Figura 2-42) y el coeficiente de almacenamiento específico (Figura 2-43).

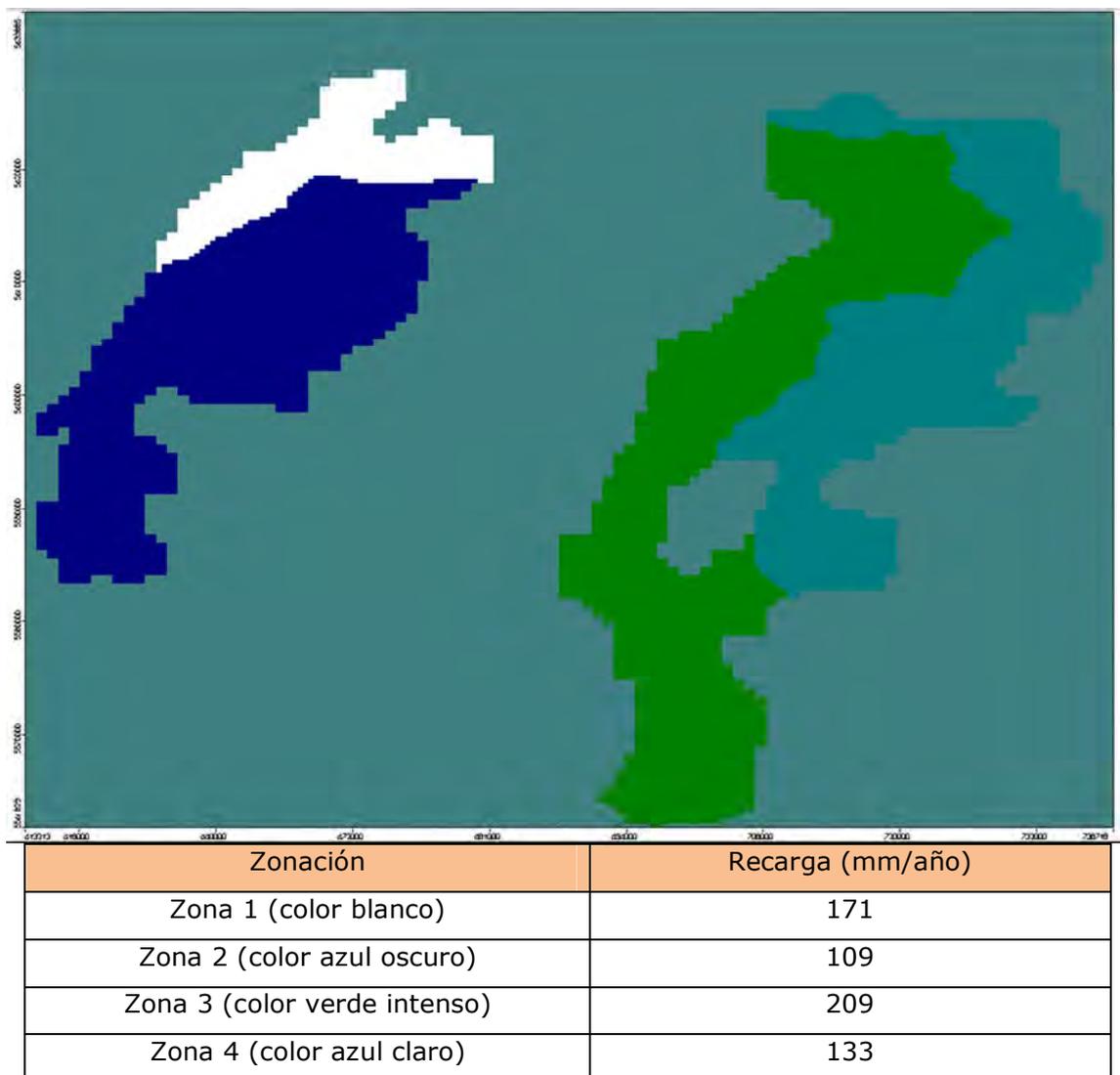
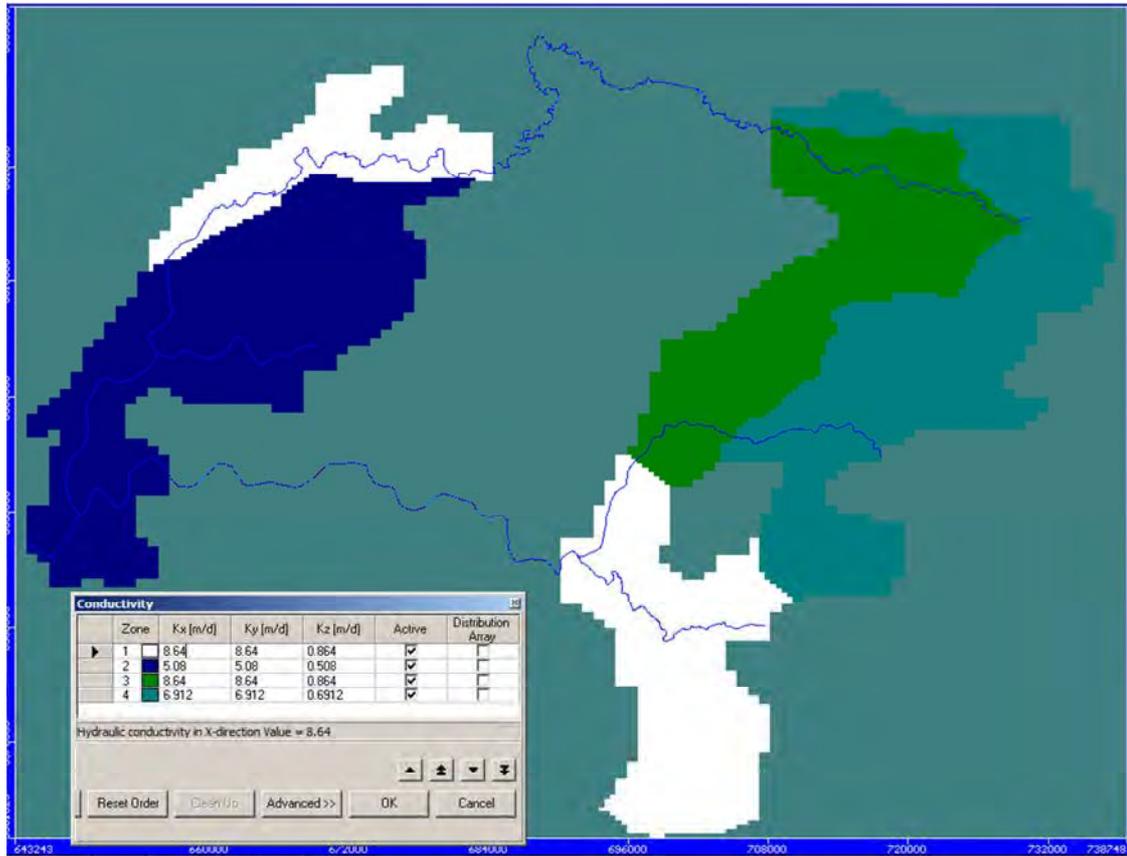
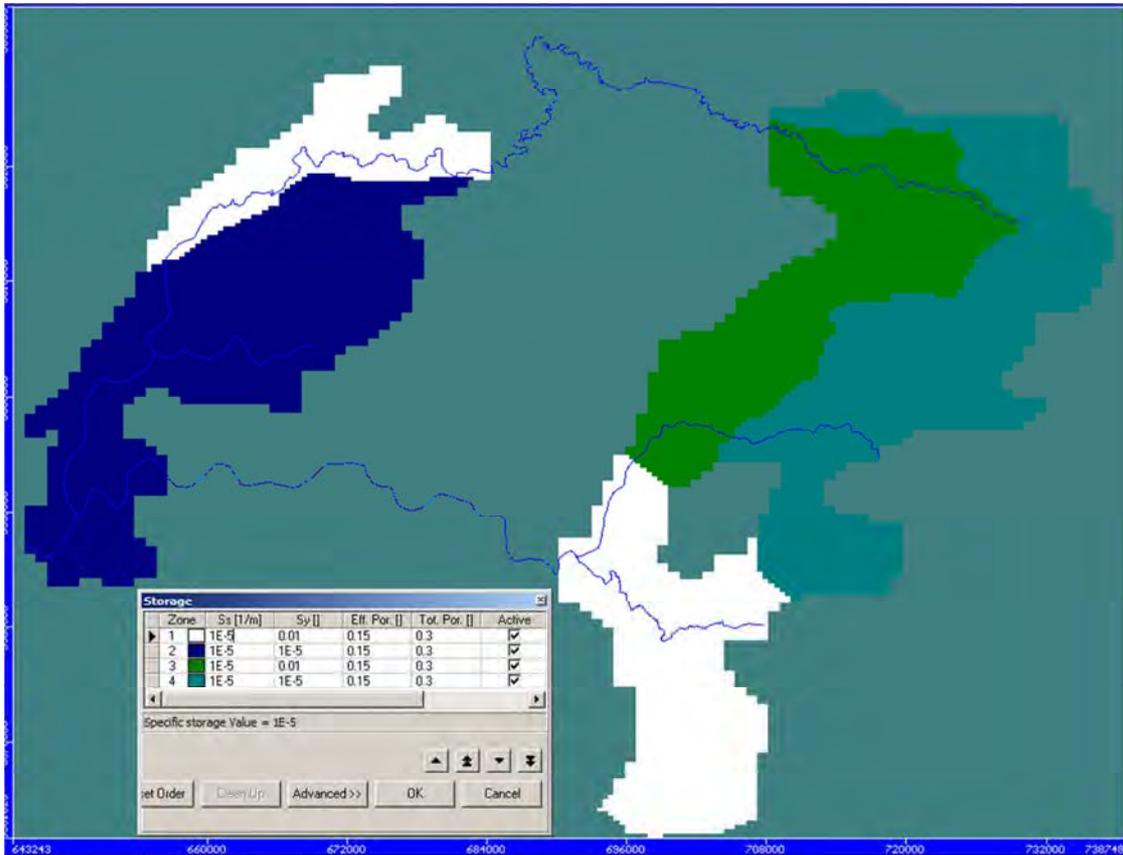


Figura 2-41. Distribución y valores de la recarga en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).



Zonación	Conductividad hidráulica (m/día)		
	k_x	k_y	k_z
Zona 1 (color blanco)	8,64	8,64	0,864
Zona 2 (color azul oscuro)	5,08	5,08	0,508
Zona 3 (color verde intenso)	8,64	8,64	0,864
Zona 4 (color azul claro)	6,91	6,91	0,691

Figura 2-42. Distribución de la conductividad hidráulica en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).



Zonación	Coeficiente de almacenamiento (adimensional)			
	Ss (1/m)	Sy	Eff.Por	Tot.Por
Zona 1 (color blanco)	$1 \cdot 10^{-5}$	0,01	0,15	0,30
Zona 2 (color azul oscuro)	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0,15	0,30
Zona 3 (color verde intenso)	$1 \cdot 10^{-5}$	0,01	0,15	0,30
Zona 4 (color azul claro)	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0,15	0,30

Figura 2-43. Distribución del coeficiente de almacenamiento específico en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21)

2.9.5 Calibración del modelo

El criterio de calibración del modelo se ha fijado en la reproducción lo más fiel posible de los balances de agua, la reproducción de los niveles freáticos en los puntos de observación y la campaña de aforos realizada por la Universidad de Concepción en el presente estudio (Anexo I – Ensayos de aforo). Para ello se han modificado tanto los valores de los tres grupos de parámetros (K, Ss) dentro de los márgenes establecidos en el modelo conceptual, como algunas de las condiciones de contorno (recarga y conductancias de los ríos). La calibración se ha realizado de forma manual debido a la baja sensibilidad del sistema.

El mejor ajuste alcanzado (RMS=8,026) lo denominamos Caso Base, el cual servirá posteriormente para hacer un análisis de sensibilidad (Figura 2-45).

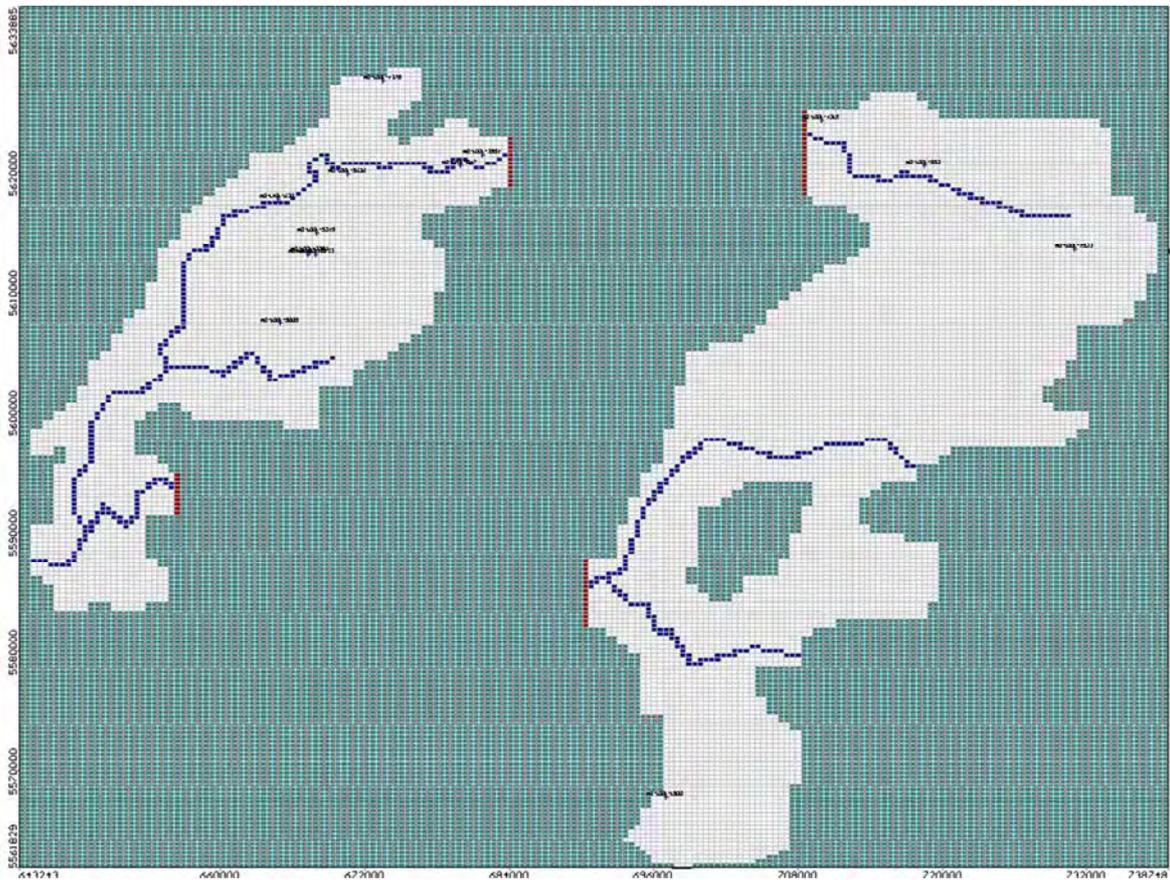


Figura 2-44. Distribución de los puntos de observación del nivel freático (Amphos 21).

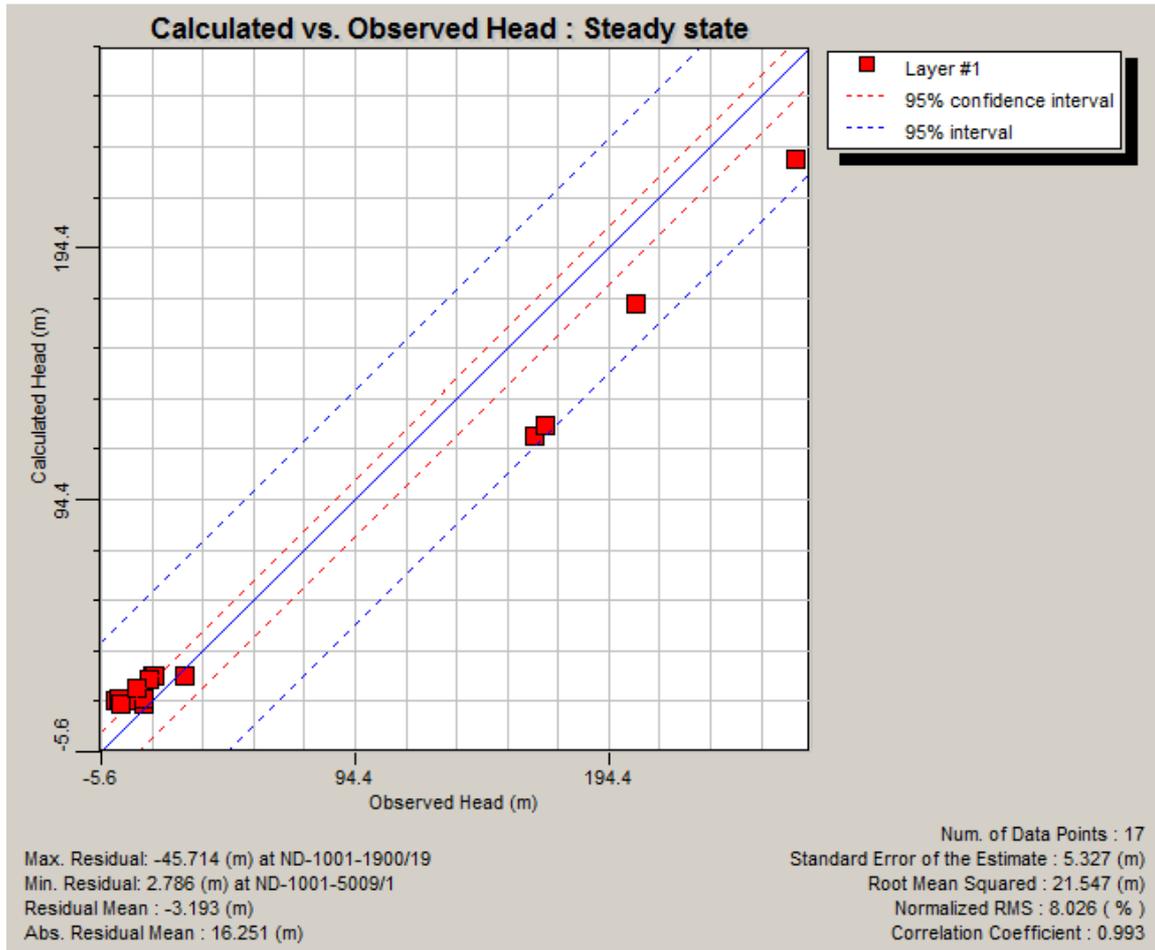


Figura 2-45. Calibración de niveles en el modelo de flujo de Valdivia (Amphos 21).

La calibración se realizó con un total de 17 mediciones del nivel freático, procedentes de los trabajos de catastro de puntos de agua (Anexo B – Fichas de catastro).

Para la calibración del modelo ha sido necesario modificar los valores de conductividad hidráulica y recarga principalmente:

- Conductividad hidráulica:

El valor de conductividad hidráulica de las 4 zonas propuestas se modificó en el proceso de calibración para ajustar los niveles acuíferos del estado estacionario (Tabla 2-8). Los valores de la masa acuífera W han sido aumentados ligeramente. Los valores de la más acuífera E, por el contrario han sido reducidos, en mayor magnitud en el sector próximo a los lagos permitiendo reflejar un nivel acuífero general más elevado.

- Recarga:

El valor de la recarga (mm/año) se redujo en las zonas 1 y 2, existentes en la masa acuífera W, lo que permitió reducir el volumen de agua del acuífero. Esto dispuso un mejor ajuste de los niveles en los puntos de observación.

Tabla 2-8. Conductividades hidráulicas calibradas para el Caso Base (Amphos 21).

Zona	Conductividad hidráulica (m/d)		
	Kx	Ky	Kz
Zona 1 (sector NW y SE)	9,05	9,05	0,95
Zona 2 (sector SW)	6,5	6,5	0,65
Zona 3 (sector central)	7,2	7,2	0,72
Zona 4 (sector NE)	3,5	3,5	0,35

Tabla 2-9. Valores de recarga del Caso Base (Amphos 21).

Zonación	Recarga (mm/año)
Zona 1 (color blanco)	140
Zona 2 (color azul oscuro)	89
Zona 3 (color verde intenso)	209
Zona 4 (color azul claro)	133

Tabla 2-10. Balance en estado estacionario para el Caso Base (volumen), (Amphos 21).

Masa acuífera	Entrada			Salida		
	Recarga (m ³)	Ríos (m ³)	Total (m ³)	Ríos (m ³)	Pozos (m ³)	Total (m ³)
Masa W	198.366,02	6.582,7	204.948,72	270.869	19.189	290.058
Masa E	689.310	105.731	795.041	614.150	5.253,1	619.403,1
TOTAL	887.676.02	112.313,7		885.019	24.442	

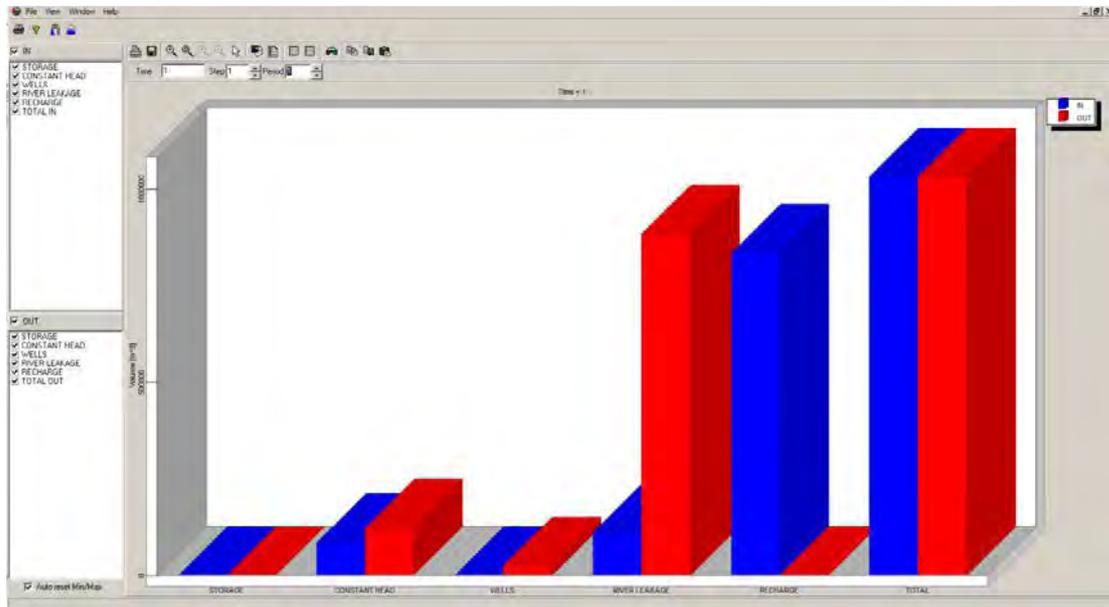


Figura 2-46. Balance de agua del modelo calibrado con el 10% de Derechos Concedidos (Amphos 21).

2.9.6 Escenarios planteados

2.9.6.1 Caso Base

El Caso Base, como ya se dijo anteriormente, es aquel para el que en el proceso de calibración del modelo numérico se ha conseguido un mayor ajuste de los niveles y caudales en la cuenca del río Valdivia (en el estado actual de modelación). En este escenario se ha planteado la explotación de un 10% del caudal de extracción descrito en los Expedientes de Derechos de Agua Concedidos, estimado en la definición de componentes del modelo.

El análisis de los niveles y su comparación en el caso sin la explotación de los Derechos de Agua Subterránea Concedidos resulta en una escasa afección de estos a la situación general de niveles en la zona. De esta manera se mantiene el funcionamiento general del acuífero en la cuenca seleccionada, y la afección solo se refleja en un descenso de escasos metros, en la zona S de Lanco, en el sector central de la masa acuífera (Figura 2-48).

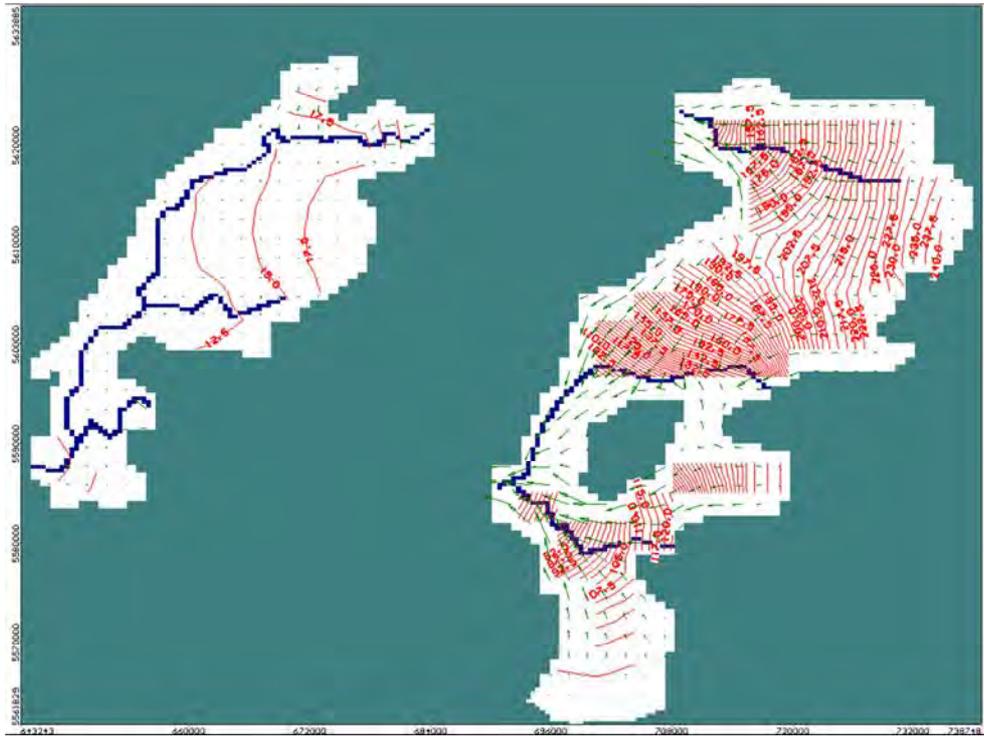


Figura 2-47. Caso Base con la explotación del 10% (superior) de los Derechos de Agua Concedidos Subterráneos (equidistancia de la piezometría igual a 2,5 m), (Amphos 21).

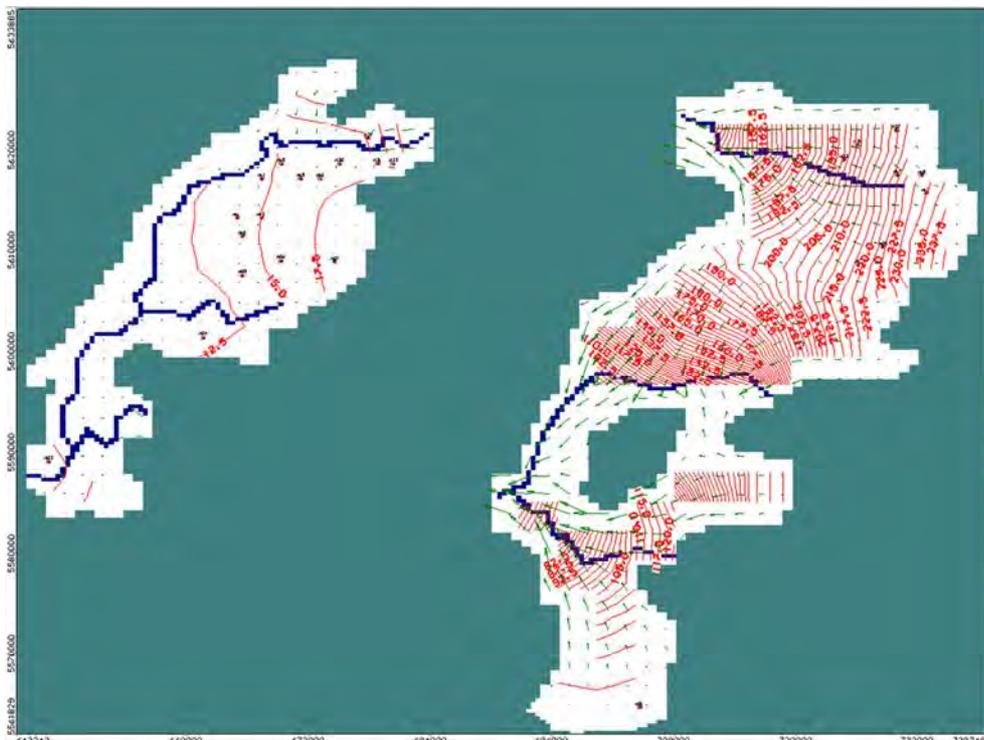


Figura 2-48. Caso Base sin la explotación del 10% (superior) de los Derechos de Agua Concedidos Subterráneos (equidistancia de la piezometría igual a 2,5 m), (Amphos 21).

La relación río-acuífero es, casi en su totalidad, a favor de los ríos, manteniendo estos un régimen efluente, como ya se asumió en el modelo conceptual descrito previamente.

Por partes la masa acuífera W, mantiene una estrecha relación entre el río y el acuífero, siendo más compleja ésta hacia la zona N, por encima del pueblo de Lanco. Existen bajos gradientes de las aguas subterráneas, que desembocan en las bajas velocidades de flujo mostradas. La recarga que se produce en esta zona es de un total de 198.372,62 m³/d para toda la zona.

El agua del acuífero descarga al río Calle-Calle un caudal total de 217.170 m³/d, siendo de forma inversa el caudal solo de 27.333,98 m³/d. De esta manera podemos calificar que el río Calle-Calle, hasta su confluencia con el río San Pedro es en un 87,41% de carácter efluente, y un 12,59% influente (vierte sus aguas al acuífero), sucediendo en la mayor parte de estas últimas de carácter mixto (por un extremo del cauce el río es ganador y por el otro vierte sus aguas al acuífero). Este caso se produce en aquellos cauces o sectores de cauce (meandros por ejemplo) con una disposición perpendicular a la dirección de flujo general del acuífero. En este mismo sector es donde el río Cruces se une con el río Calle-Calle en la ciudad de Valdivia. En el tramo del río Cruces existente en la masa acuífera W. En esta zona, el río Cruces introduce en el acuífero un total de 6.001 m³/d. Así mismo, el acuífero drena al río 30.832 m³/d, indicando de igual forma el carácter más efluente del río en este sector.

Por su parte, la masa acuífera E responde de forma muy parecida, pero elevando el gradiente del nivel freático, debido a las mayores elevaciones topográficas de este sector y una mayor recarga (pluvio-nival). La recarga que se produce en esta zona es de 617.110 m³/día, tres veces superior a la de la otra masa acuífera definida.

En la zona N de la masa acuífera E, el río Calle-Calle aporta al acuífero 228.200 m³/día y drena del mismo 343.590 m³/día, indicando un aumento en la proporción de zonas influentes del mismo.

En el caso del río Cruces (sectores San Pedro y Quinchilca), el río introduce en el acuífero un volumen/caudal de 149.560 m³/día, la mitad de los 292.380 m³/día que el acuífero drena al río. De esta manera domina el funcionamiento de los ríos como controladores del funcionamiento en este sector, y por ende y en líneas generales, en el comportamiento del acuífero en ambos sectores.

2.9.6.2 Explotación de los Derechos de Agua Concedidos

Este escenario plantea una explotación del 100% de los Derechos de Agua Concedidos en la cuenca del río Valdivia. Esto plantea una explotación de 244.426 m³/día, considerando regímenes de explotación continuos. El caso más real es el expuesto en el Caso Base.

El análisis de los niveles y su comparación en el caso de la explotación de los Derechos de Agua Subterránea Concedidos resulta en una moderada afección de estos a la situación general de niveles en la zona en que se producen. De esta manera se mantiene el funcionamiento general del acuífero en la cuenca seleccionada, y la afección solo se refleja en un descenso de alrededor de 4 metros en la zona central de la masa acuífera W e inferior (2 m) en la zona N de dicha masa.

La relación río-acuífero es, casi en su totalidad, a favor de los ríos con ligeras diferencias respecto al Caso Base (Tabla 2-11), manteniendo estos un régimen efluente, como ya se asumió en el modelo conceptual descrito previamente.

La masa acuífera W, mantiene una estrecha relación entre el río y el acuífero, siendo más compleja ésta hacia la zona N, por encima del pueblo de Lanco. Existen bajos gradientes de las aguas subterráneas, que desembocan en las bajas velocidades de flujo mostradas. La recarga que se produce en esta zona es de un total de 198.366,02 m³/d para toda la zona.

El agua del acuífero descarga al río Calle-Calle un caudal total de 113.610 m³/d, siendo de forma inversa el caudal solo de 107.000 m³/d. De esta manera podemos calificar que el río Calle-Calle en este caso extremo es en un 60% de carácter efluente, y un 40% influente (vierte sus aguas al acuífero), sucediendo en la mayor parte de estas últimas de carácter mixto (por un extremo del cauce el río es ganador y por el otro vierte sus aguas al acuífero). Este caso se produce en aquellos cauces o sectores de cauce (meandros por ejemplo) con una disposición perpendicular a la dirección de flujo general del acuífero.

En este mismo sector es donde el río Cruces se une con el río Calle-Calle en la ciudad de Valdivia. En el tramo del río Cruces existente en la masa acuífera W. En esta zona, el río Cruces introduce en el acuífero un total de 6.004,7 m³/d. Así mismo, el acuífero drena al río 30.825 m³/d, indicando de igual forma el carácter más efluente del río en este sector.

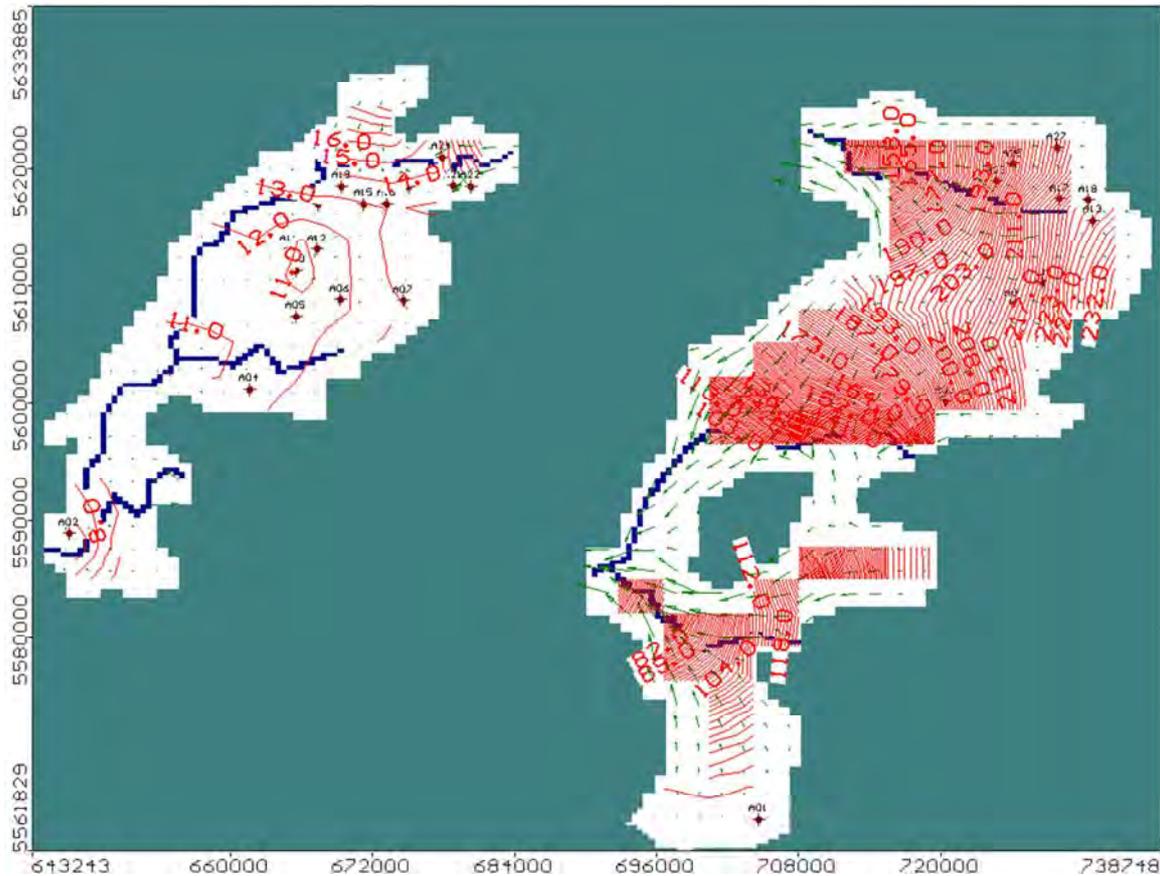


Figura 2-49. Situación de niveles en el área de Valdivia en el caso de la explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (equidistancia de 1 m entre curvas de nivel), (Amphos 21).

Por su parte, la masa acuífera E responde de forma muy parecida, pero elevando el gradiente del nivel freático, debido a las mayores elevaciones topográficas de este sector y una mayor recarga (pluvio-nival). La recarga que se produce en esta zona es de 617.110 m³/día, tres veces superior a la de la otra masa acuífera definida.

En la zona N de la masa acuífera E, el río Calle-Calle aporta al acuífero 180.830 m³/día y drena del mismo 283.900 m³/día, indicando una disminución de las zonas efluentes con respecto al Caso Base.

En el caso del río Cruces (sectores San Pedro y Quinchilca), el río introduce en el acuífero un volumen/caudal de 248.580 m³/día, muy inferior a los 591.680 m³/día que el acuífero drena al río. Esto supone una ganancia de las zonas de río influentes o mixtas, sobre las efluentes, que aún permite caracterizar los cauces de la zona como mayormente efluentes.

De esta manera dominan los ríos como controladores del funcionamiento en este sector, y por ende y en líneas generales, en el comportamiento del acuífero en ambos sectores.

Tabla 2-11. Balance en estado estacionario para el caso de explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (volumen).

Masa acuífera	Entrada			Salida		
	Recarga (m ³ /d)	Ríos (m ³ /d)	Total (m ³ /d)	Ríos (m ³ /d)	Pozos (m ³ /d)	Total (m ³ /d)
Masa W	198.366,02	60.965,11	259.331,13	157.689	191.890	349.579
Masa E	689.310	134.851	824.161	596.030	52.531	648.561
TOTAL	887.676.02	195.816,11		753.719	244.426	

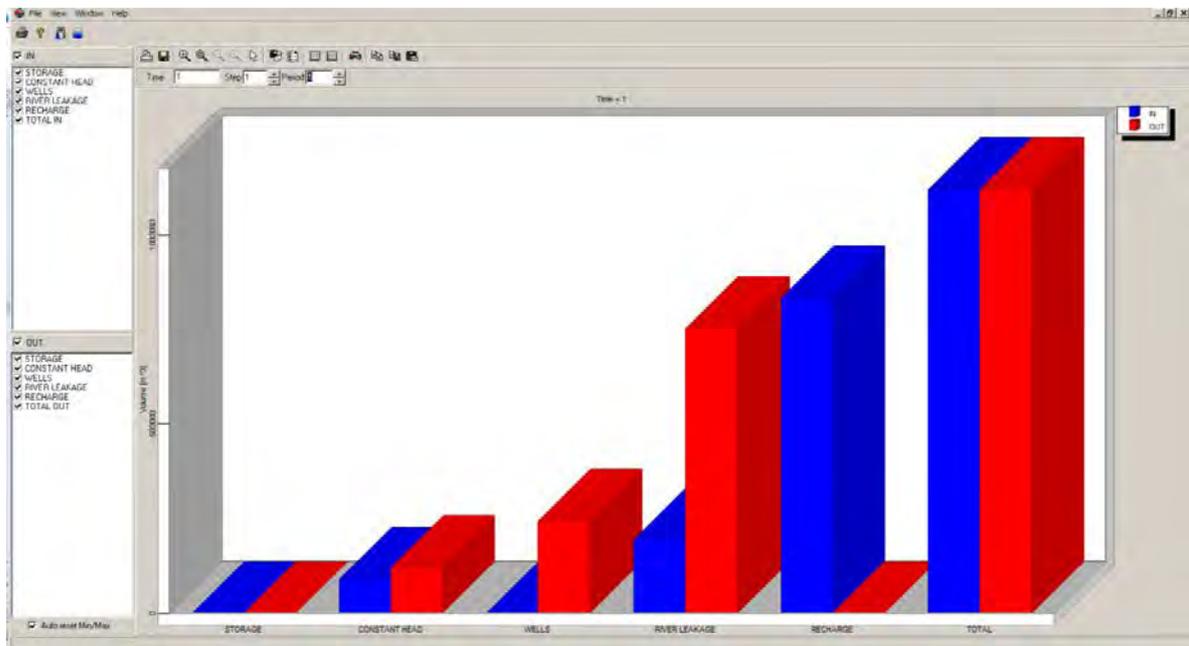


Figura 2-50. Balance de agua del modelo con la explotación de los Derechos de Agua Concedidos (Amphos 21).

2.9.6.3 Explotación de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite

En este caso, se planteó un escenario real (10%) de explotación de los Derechos de Agua Concedidos (hasta la fecha) en que se añade, además, un estimativo de la explotación de los Derechos de Agua en Trámite (10%) conocidos. Ello permite prever la respuesta general del funcionamiento del acuífero en las condiciones futuras, mejorando su gestión.

El análisis de los niveles y su comparación con el caso de la explotación de los Derechos de Agua Subterránea Concedidos resulta en una escasa afección de estos a la situación general de niveles en la zona en que se producen (Figura 2-51). De esta manera se mantiene el funcionamiento general del acuífero en la cuenca seleccionada, y la afección solo se refleja en un descenso de alrededor de 1 m en la zona central de la masa acuífera W e inferior (0,5 m) en la zona N de dicha masa.

La relación río-acuífero es, casi en su totalidad, a favor de los ríos con ligeras diferencias respecto al Caso Base (Tabla 2-12). Sin embargo se apreció un cambio significativo con respecto al escenario extremo de explotación continua de los Derechos Concedidos, al considerar en ambos casos la explotación del 10% del total. Este cambio supone una menor depresión de los niveles acuíferos en las zonas de explotación, suponiendo un escenario más ajustado a las condiciones reales de planificación del aprovechamiento de las aguas subterráneas

La masa acuífera W, mantiene una estrecha relación entre el río y el acuífero, siendo más compleja ésta hacia la zona N, por encima del pueblo de Lanco. Existen bajos gradientes de las aguas subterráneas, que desembocan en las bajas velocidades de flujo mostradas. La recarga que se produce en esta zona es de un total de 198.366,02 m³/d.

El agua del acuífero descarga al río Calle-Calle un caudal total de 178.490 m³/d, siendo de forma inversa el caudal solo de 26.378 m³/d. De esta manera podemos calificar que el río Calle-Calle en este caso extremo es en un 87,12% de carácter efluente, y un 12,88% influente (vierte sus aguas al acuífero), sucediendo en la mayor parte de estas últimas de carácter mixto (por un extremo del cauce el río es ganador y por el otro vierte sus aguas al acuífero). Este caso se produce en aquellos cauces o sectores de cauce (meandros por ejemplo) con una disposición perpendicular a la dirección de flujo general del acuífero.

En este mismo sector es donde el río Cruces se une con el río Calle-Calle en la ciudad de Valdivia. En esta zona, el río Cruces introduce en el acuífero un total de 6.019,9 m³/d. Así mismo, el acuífero drena al río 30.759 m³/d, indicando que se mantiene el mismo comportamiento del caso base y, de igual forma, el modelo conceptual del acuífero.

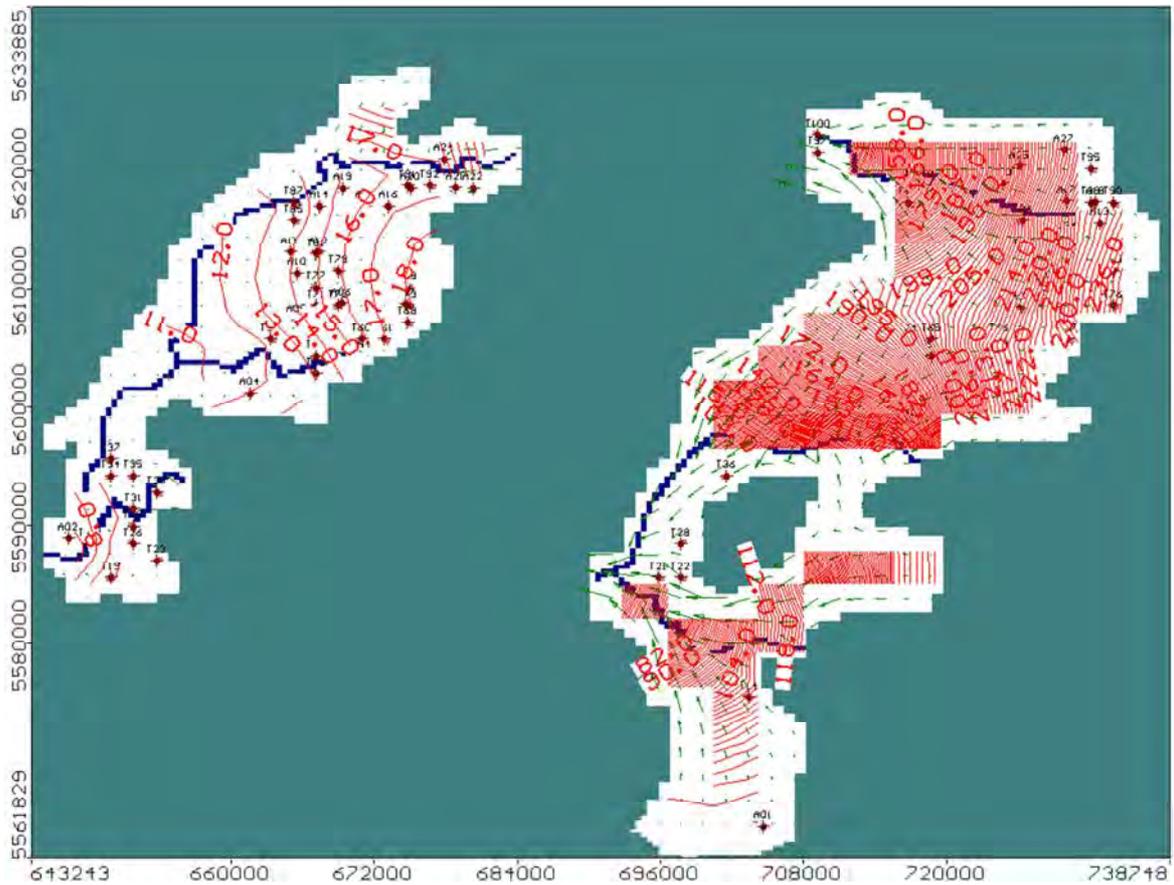


Figura 2-51. Escenario de explotación de un 10% de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).

Por su parte, la masa acuífera E responde de forma muy parecida, pero elevando el gradiente del nivel freático, debido a las mayores elevaciones topográficas de este sector y una mayor recarga (pluvio-nival). La recarga que se produce en esta zona es de 617.000 m³/día, tres veces superior a la de la otra masa acuífera definida. El descenso producido en esta zona, debido a la explotación de las aguas subterráneas es de aproximadamente 0,5 a 1 m, con lo que no supone una variación muy grande.

En la zona N de la masa acuífera E, el río Calle-Calle aporta al acuífero 247.820 m³/día (28,96%) y drena del mismo 597.990 m³/día (71,04%), indicando un aumento en la proporción de zonas efluentes, que se mantiene relativamente próximo al del Caso Base.

En el caso del río Cruces (sectores San Pedro y Quinchilca), el río introduce en el acuífero un volumen/caudal de 150.140 m³/día, inferior a los 291.990 m³/día que el acuífero

drena al río. De esta manera dominan los ríos como controladores del funcionamiento en este sector, y por ende y en líneas generales, en el comportamiento del acuífero en ambos sectores.

Tabla 2-12. Balance en estado estacionario para el caso de explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (volumen).

Masa acuífera	Entrada			Salida		
	Recarga (m ³ /d)	Ríos (m ³ /d)	Total (m ³ /d)	Ríos (m ³ /d)	Pozos (m ³ /d)	Total (m ³ /d)
Masa W	198.366,02	6.641,37	205.007,39	267.925	191.890	459.815
Masa E	689.310	106.266	795.576	613.260	6.681,1	619.941,1
TOTAL	887.676,02	112.907,37		881.185	198.571,1	

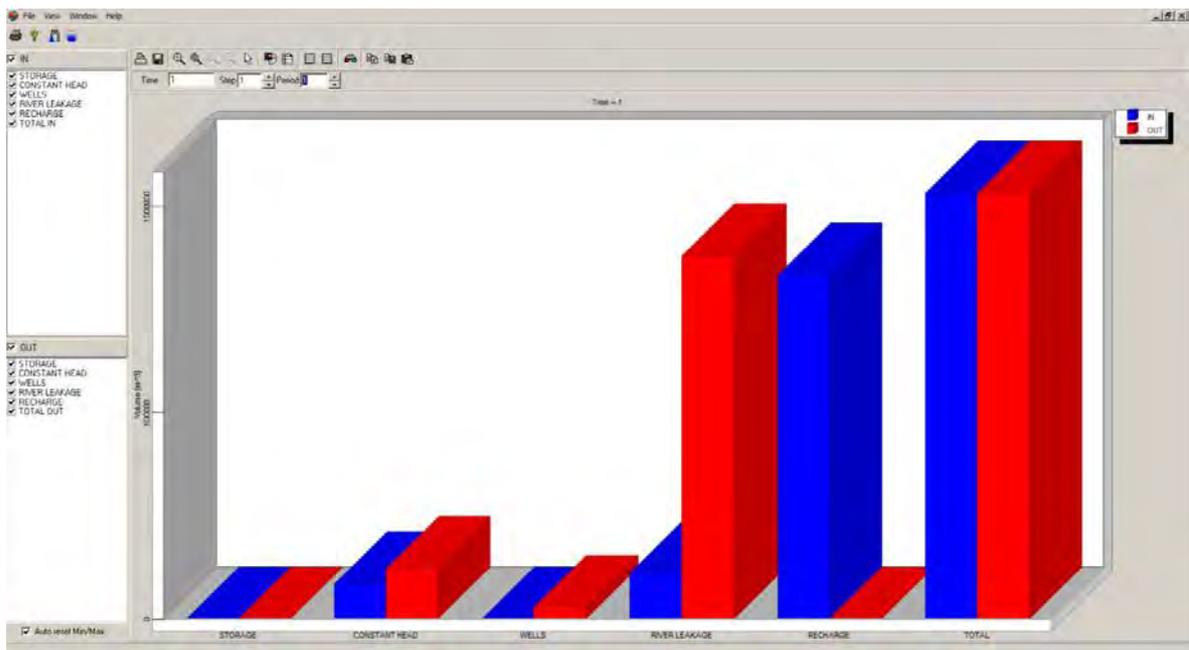


Figura 2-52. Balance de agua del modelo con la explotación de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite (10%) (Amphos 21).

2.9.6.4 Explotación de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite al 100 %.

En este caso, se planteó un escenario real (100%) de explotación de los Derechos de Agua Concedidos (hasta la fecha) en que se añade, además, un estimativo de la explotación de los Derechos de Agua en Trámite (100%) conocidos. Ello da una visión extrema y poco real de una situación poco probable en la que todas las extracciones de agua subterránea (las actualmente concedidas y las actualmente en trámite) se encontrasen a pleno funcionamiento.

El análisis de los niveles y su comparación con el caso de la explotación de los Derechos de Agua Subterránea Concedidos resulta en una afección cercana al metro de depresión del nivel piezométrico en las zonas de mayor existencia de explotaciones (San José de Mariquina y la zona central (Figura 2-51). Esta situación ficticia de explotación total muestra un escenario extremo que sería poco probable, en que en las dos zonas citadas anteriormente se provocaría un cambio local en el funcionamiento de la relación río acuífero. En este caso extremo, se podría producir el descolgamiento de los cauces respecto del acuífero, pasando a aportar agua al acuífero en un escenario de sobreexplotación.

La relación río-acuífero es, localmente, a favor del acuífero con ligeras diferencias respecto al Caso Base (Tabla 2-12).

La masa acuífera W, mantiene una estrecha relación entre el río y el acuífero, siendo más compleja ésta hacia la zona N, por encima del pueblo de Lanco. Existen mayores gradientes de las aguas subterráneas, que desembocan en las altas velocidades de flujo mostradas de carácter localizado. La recarga que se produce en esta zona es de un total de 198.366,02 m³/d.

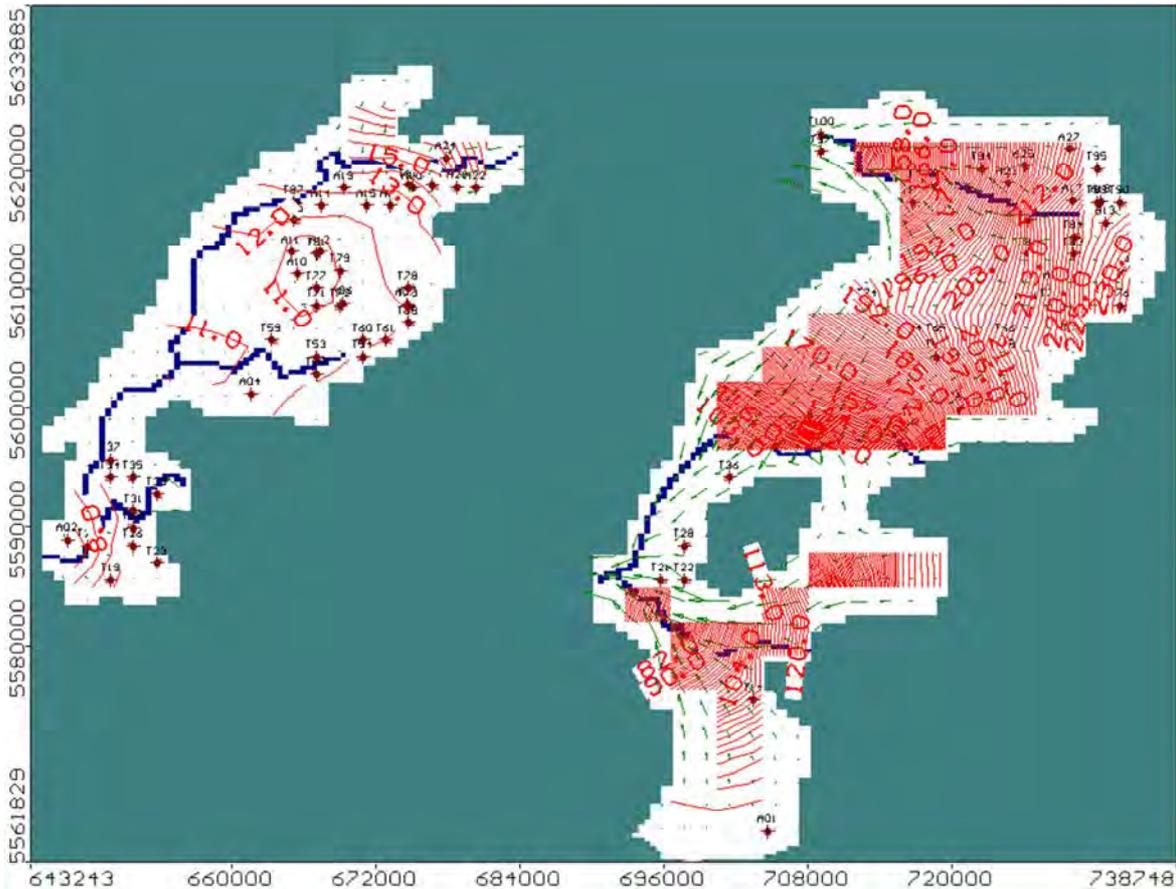


Figura 2-53. Escenario de explotación de un 100% de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite en la cuenca del río Valdivia (Amphos 21).

Por su parte, la masa acuífera E responde de forma muy parecida, pero elevando el gradiente del nivel freático, debido a las mayores elevaciones topográficas de este sector y una mayor recarga (pluvio-nival). La recarga que se produce en esta zona es de 617.000 m³/día, tres veces superior a la de la otra masa acuífera definida. El descenso producido en esta zona, debido a la explotación de las aguas subterráneas es de aproximadamente 1 m, con lo que no supone una variación muy grande.

Tabla 2-13. Balance en estado estacionario para el caso de explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (volumen).

Masa acuífera	Entrada			Salida		
	Recarga (m ³ /d)	Ríos (m ³ /d)	Total (m ³ /d)	Ríos (m ³ /d)	Pozos (m ³ /d)	Total (m ³ /d)
Masa W	198.366,02	6.641,37	205.007,39	267.925	191.890	459.815
Masa E	689.310	106.266	795.576	613.260	6.681,1	619.941,1
TOTAL	887.676,02	112.907,37		881.185	198.571,1	

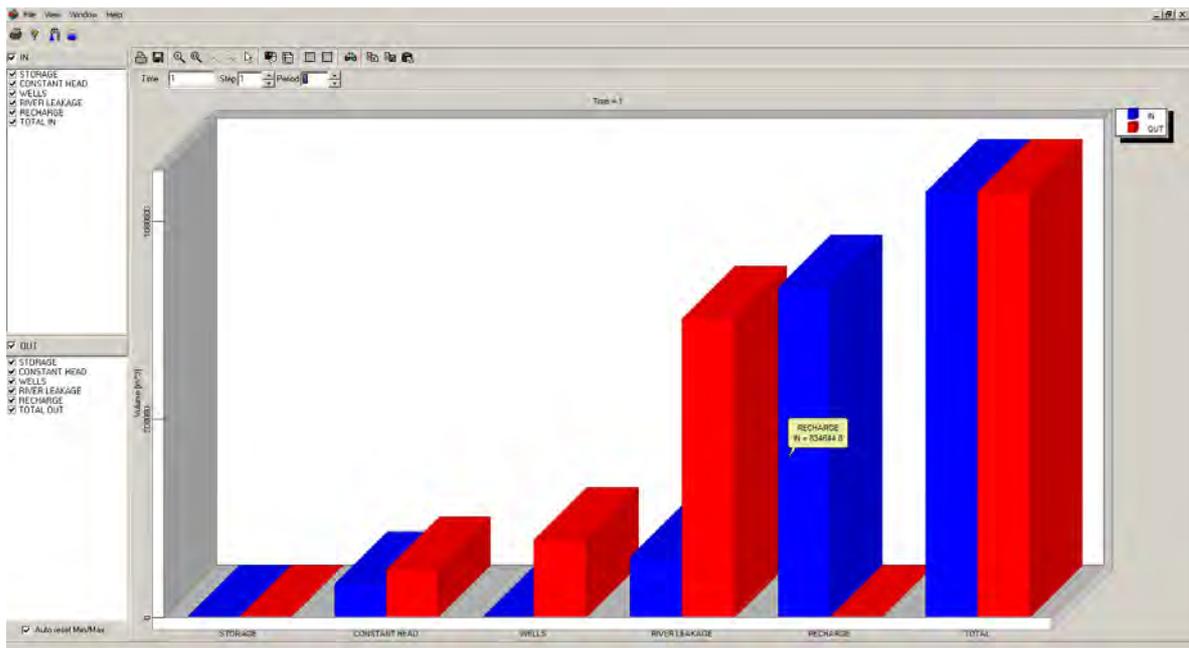


Figura 2-54. Balance de agua del modelo con la explotación de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite (10%) (Amphos 21).

3. Estudio de la Cuenca de Río Bueno

3.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1.1 Recopilación y análisis de la información existente

En esta actividad Amphos 21 ha realizado una recopilación y actualización de los antecedentes existentes que pueden aportar datos al desarrollo del estudio, se considera dentro de esta actividad la revisión de los trabajos publicados en: congresos, informes, estudios, tesis, expedientes, estadísticas, datos puntuales, etc., que sean de dominio público a través de instituciones como la Dirección General de Aguas (DGA), el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Comisión Nacional de Riego (CNR), Centro de Información Recursos Naturales (CIREN), Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), Instituto Desarrollo Agropecuario, Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), Conservador de Bienes Raíces (CBR); Instituto Geográfico Militar (IGM), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Empresas de Servicios Sanitarios en la Región, Universidades, Centros de Investigación, etc.

De los principales trabajos que entregan información de interés para la evaluación hidrogeológica de la Cuenca Río Bueno se pueden citar los siguientes antecedentes:

- ✓ *Mejoramiento y ampliación de la red de aguas subterráneas, Regiones VII a X (2010) MOP-DGA.*
- ✓ *Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea de la depresión central de las regiones de Los Ríos y Los Lagos (2008). SERNAGEOMIN.*
- ✓ *Modelación hidrogeológica de los acuíferos en la cuenca del Río Bueno en la X Región (2004). Universidad de Chile.*
- ✓ *Geología para el ordenamiento territorial: Región de Los Lagos (2005) Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.*
- ✓ *Exploración de los recursos subterráneos de la Cuenca del Río Bueno, X Región (2003). Dirección de Obras Hidráulicas.*

Los antecedentes existentes disponibles y no disponibles de la zona de estudio se han recopilado en una base de datos (Anexo A – Fichas de antecedentes) destacando la fuente, año, autor, título, descripción, información destacada que ofrece y resume, entre otros. Además se ha realizado una ficha resumen con la información relevante (Anexo A,

Fichas de antecedentes) y un resumen de estudios existentes disponibles para el presente.

Acorde con el trabajo realizado, se han definido los límites del modelo conceptual que incluyen los acuíferos de la cuenca de Río Bueno, estableciéndose la geometría en 3 D de las unidades hidrogeológicas que fueron identificadas y caracterizadas mediante sus parámetros hidráulicos.

1. Límites y geometría del basamento: Los límites y geometría del basamento se han definido en base a la prospección geofísica realizada por AC Consultores 2003, interpolando sus datos para la consecución de superficies 3D.
2. Caracterización de acuíferos principales: La caracterización de los acuíferos consistió en la revisión de los antecedentes disponibles y una interpretación hidrogeológica en base a las columnas litológicas, antecedentes hidrogeológicos, geofísica, niveles de agua y ensayos de bombeo recopilados.
3. Límites y geometría del sistema acuífero: Los límites y geometría del acuífero han sido trazados considerando el mapa geológico trazado por el Sernageomin (2003) y los mapas hidrogeológicos de la zona, en consonancia con la distribución de los aprovechamientos de agua subterránea.
4. Parámetros hidráulicos del modelo conceptual: Para la estimación de los parámetros hidrogeológicos del medio acuífero se ha realizado una revisión de las pruebas de bombeo disponibles en la zona, procedentes de los Expedientes de Derechos de Agua e informes de construcción de APR y AP.
5. Áreas de recarga y descarga: Se realizó una definición de las áreas de recarga y descarga en la cuenca del río Bueno, tomando como eje principal las observaciones y mediciones realizadas en terreno, acoplado esta información al análisis hidrológico e hidrogeológico realizado, junto a la revisión de antecedentes.
6. Estimación de la recarga en la zona de estudio: La estimación de la recarga se ha realizado, en base a la revisión bibliográfica, en función de los materiales a través de los que se produzca la infiltración.

7. Uso de agua y extracciones: La evaluación del uso del agua en la cuenca del río Bueno se realizó a través del análisis del Catastro Público de Aguas (CPA) y las observaciones realizadas en la campaña de terreno. De ello se derivan datos importantes para la estimación del balance hídrico.
8. Condiciones de borde: Se han definido como los perímetros del contacto roca-relleno de la cuenca y los niveles del agua en ríos y lagos.
9. Interacción río-acuífero: La interacción río-acuífero se ha analizado a través del catastro de terreno (observaciones in-situ) y la revisión del Catastro Público de Aguas recopilado.
10. Piezometría y dirección de flujo: El mapa piezométrico elaborado en el marco del presente estudio es resultado de los trabajos de catastro de puntos de agua realizado entre los meses de septiembre-octubre de 2012. De esta manera se han considerado todos aquellos pozos y norias encuestadas, en las que ha sido factible la medición del nivel freático.

3.1.2 Prospección geofísica

En el área de estudio se dispuso de información geofísica que abarca las zonas de interés de la cuenca del río Bueno y que ha sido recopilada de diversos estudios existentes.

En primer lugar se ha obtenido información relevante del estudio "Exploración de recursos subterráneos Cuenca del río Bueno" (2003) de AC Ingenieros Consultores Ltda. donde se realizó una prospección geofísica mediante el método de gravimetría y transiente electromagnético (TEM) para representar la geometría del acuífero sedimentario en la cuenca del río Bueno.

El objetivo fue el de determinar la profundidad del basamento y diferenciar la estratigrafía geoelectrica de los sedimentos para caracterizar el subsuelo de la cuenca. El estudio se realizó mediante 3 líneas gravimétricas a nivel regional (gran extensión), con estaciones dispuestas entre 1 a 1,5 km, que aprovechó el trazado de la Ruta 5 Sur y trazados transversales hasta el lago Ranco, bordeando su trazado norte (ver Anexo F.1 – Geofísica Cuenca Río Bueno). Así fueron medidos un total de 273 estaciones gravimétricas en 342 km de longitud (Tabla 3-1).

Tabla 3-1 Descripción de las líneas gravimétricas trazadas en el estudio

Perfil	Cantidad de estaciones	Longitud (Km) (distancia acumulada horizontal)
L1E	114	131
L2N	75	98
L3N	84	113
	273	Total 342 Km

Con TEM fueron medidos 20 puntos distribuidos sobre las líneas gravimétricas, siendo utilizados como puntos de control para la localización del basamento en profundidad.

Para dicho estudio se utilizó un instrumental geofísico de este tipo:

- Gravímetro Scintrex CG3 (error ~ 0.03 mgal, considerando error de altura).
- GPS geodésico Ashtech SCA-12S, 1 estación base y 2 móviles (error ~ 10 cm, modo dinámico).
- GPS de navegación en tiempo real Garmin 12XL (error ~ 30 m).
- Sistema de adquisición y proceso montado en computador Notebook 586.

En este caso, a diferencia del presente estudio, las mediciones topográficas de las estaciones gravimétricas fueron referidas al Datum Sudamericano 1956.

3.1.2.1 Método de la Gravimetría

Los datos gravimétricos del estudio geofísico de 2003 fueron incorporados a una base de datos en ambiente OASIS-MONTAJ de Geosoft y procesados en forma estándar. El efecto de marea es corregido automáticamente por el gravímetro o, si esta opción está desactivada, se realiza numéricamente durante el proceso. La diferencia en las lecturas fue compensada sobre el universo de estaciones diarias en función del tiempo (cierres diarios).

Las correcciones aplicadas para obtener la Anomalía de Bouguer total (Δg) fueron las siguientes:

$$\Delta g = G_{obs} - G_{teo} - \Delta_{boug} + \Delta_{a_{libre}} + \Delta_{topo}$$

donde:

G_{obs} :	gravedad observada
G_{teo} :	gravedad teórica (WGS84) = $G_0 (1+C1 \sin 2\alpha)/(1-C2 \sin 2\alpha)^{1/2}$
G_0 =	978.032,67714
$C1$ =	0,00193185138639
$C2$ =	0,00669437999013
α =	latitud
Δ_{boug} :	corrección de bouguer = $2nGph$
G =	constante de gravitación universal (0.00667 para densidades en [gr/cc] y alturas en [m])
ρ =	densidad media de la corteza (2,67 gr/cc)
h =	altura [m]
Δ_{a_libre} :	corrección de aire libre = $0,3086h$

Para la corrección topográfica (Δ_{topo}) se usó el programa Terrain de Geosoft, utilizando una cartografía digital proporcionada por el cliente, completada y grillada con celda de 100 m.

El resultado final de estas correcciones es la gravedad de Bouguer. Estos valores están referidos a una base arbitraria, que no tiene relevancia en el presente caso, puesto que se debe descontar un regional que se determina por condiciones complementarias (afloramientos, profundidad del basamento suministrada por sondeos TEM, etc.). La interpretación se realiza sobre los valores residuales que así resultan. En estas mismas figuras aparece el regional estimado en cada caso (línea superior continua).

En los sectores investigados los sedimentos están compuestos principalmente de una cubierta cuaternaria (areniscas, conglomerados, etc.) y rocas sedimentarias terciarias (arcillas, areniscas, etc.), en variadas combinaciones. El basamento corresponde principalmente a roca metamórfica (esquistos paleozoicos, etc.).

Por consiguiente, los datos pueden ser interpretados mediante un modelo de dos capas, donde la capa superior es asimilada a los materiales sedimentarios (considerando una densidad promedio de los diferentes tipos de estratos), mientras que la capa inferior o substrato corresponde a la roca basal de mayor densidad. Considerando valores característicos de estos tipos de materiales, con valores entre 1.9-2.1 gr/cc para los sedimentos y entre 2,7-2,9 gr/cc para el basamento, se ha estimado como representativo un contraste de densidad de 0,8 gr/cc.

3.1.2.2 Método del Transiente Electromagnético (TEM)

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

Las corrientes inducidas en el subsuelo se distribuyen de acuerdo al mecanismo físico de difusión y el comportamiento que muestran depende de las resistividades, tamaños y formas de las estructuras geoelectricas subsuperficiales. En zonas de bajas resistividades, la disipación de las corrientes es lenta, con una amplitud inicial pequeña. En zonas de altas resistividades, se tiene una amplitud inicial mayor, pero el decaimiento es más rápido. El análisis numérico de la curva transiente, o de decaimiento en el tiempo del campo magnético, permite inferir información cuantitativa acerca de los parámetros geoelectricos del subsuelo.

3.1.3 Trabajo de catastro

Los trabajos de catastro realizados por Amphos 21 para el presente estudio se han desarrollado en las siguientes fases:

✓ Visita a terreno inicial:

Durante los días 11 y 12 de septiembre se realizó una visita a terreno en compañía del inspector fiscal con el fin de validar el sistema de trabajo en terreno, comprobar condiciones de accesibilidad, condiciones hidrológicas e hidrogeológicas relevantes descritas en antecedentes previos.

✓ Planificación y metodología del trabajo de catastro:

Para realizar una buena planificación de la fase de levantamiento de información en terreno fue necesario reconocer en gabinete el orden de magnitud de los distintos parámetros capturados. A partir de estos se ha definido una estrategia de detalle para abordar de manera eficiente el catastro de puntos de agua de la zona.

Se analizaron bases de datos con información catastral, expedientes de derechos de aguas, catastros previos e información cartográfica de la cuenca del río Bueno. Estas fueron depuradas debido al gran volumen de información, presencia de datos desorganizados y abundantes errores, entre los que se encuentran:

8. Campos desplazados o sin información (caudal, coordenadas, etc).
9. Registros incompletos.
10. Diferentes sistemas de proyección y huso, unidades, duplicados y errores de transformación geográfica.
11. Coordenadas fuera de área o inexistentes de acuerdo a sistema de proyección
12. Unidades de caudales distintas (l/s, m³/d, lt/min) en un mismo campo.
13. Magnitud de caudales erróneos, debido a la acumulación de datos procedentes de distintas fuentes no unificadas (Ej: uso de puntos en lugar de comas, siendo 15,0 l/s, 15.000 l/s).
14. Registro temporal de las concesiones de caudales mensuales erróneos y en algunos casos inexistentes.

La información errónea y/o incompleta mencionada anteriormente fue depurada mediante los expedientes físicos provistos por la DGA. La información que no fue posible verificar, fue tomada en cuenta para su validación en terreno (criterio de filtrado 1).

Como resultado del análisis de los datos presentes en la zona de estudio, se establecieron los siguientes criterios de selección de puntos a catastrar en terreno (criterio de filtrado 2):

✓ Puntos subterráneos:

Puntos de agua subterráneas en donde los caudales se encuentren entre 10 y 150 l/s dado su altos valores en relación los usos de agua descritos. Adicionalmente se seleccionaron todos los pozos con caudal inferior a 0,05 l/s (excesivamente bajos).

✓ Puntos superficiales:

Puntos de agua superficiales corrientes y detenidos con:

- c. Caudales inferiores a 0,05 l/s (es inusual encontrar concesiones superficiales tan bajas por lo que se hace conveniente realizar una validación *in-situ*).
- d. Caudales superiores a 1.000 l/s que no pudieron ser verificados, por no disponer de su expediente de derechos de agua, para uso de riego, minería y/o industria.

En base al total de puntos seleccionados se diseñó una campaña de muestreo para la zona de estudio organizada en cuadrículas y celdas, integrando los puntos de agua superficial y subterránea, accesos, roles e información logística disponible (Figura 3-1).

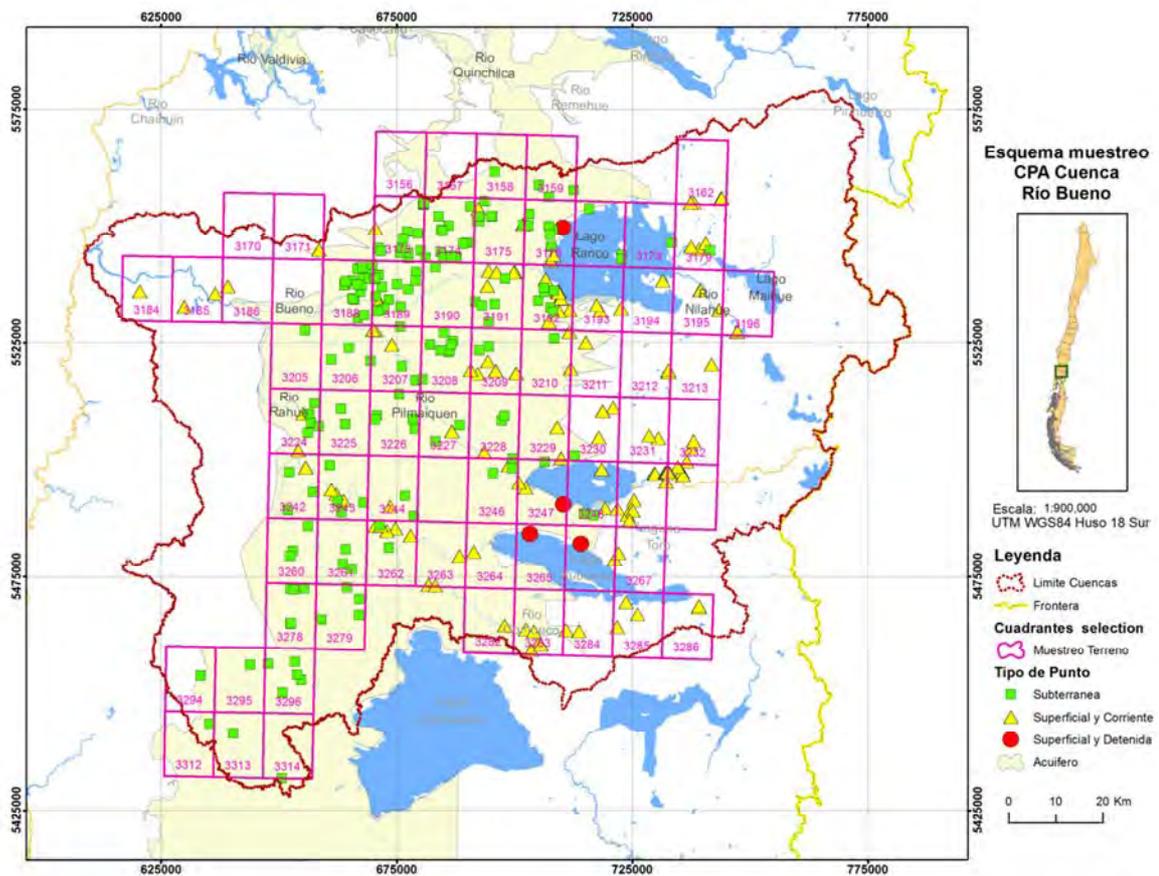


Figura 3-1. Esquema de muestreo (cuadrícula y celdas) (Amphos 21).

En la planificación de terreno se consideró catastrar aproximadamente 6 a 8 registros diarios con sus predios correspondientes y se realizó en 2 meses.

Se elaboraron fichas de encuesta de terreno (Anexo A – Fichas de antecedentes) en las que se colectó el siguiente tipo de información: la configuración de uso de las aguas que riegan el predio, identificando pozos, bocatomas, canales, ríos, áreas de cultivo y tipos de cultivos. Además se incluyó un croquis de la ubicación de cada punto.

En cada punto de agua visitado como: bocatomas, tranques nocturnos y pozos se georreferenció su ubicación, se tomó una fotografía y un video de corta duración que dará cuenta del lugar y de la distribución de las aguas.

En el caso de los pozos y norias se incluyó la medida del nivel estático o dinámico de las aguas subterráneas, datos de captación (comuna, nombre del predio, propietario, tipo de captación) y uso de captación (riego, agua potable, industrial, otros). Será especificado si está en uso y las características constructivas del pozo.

Finalmente, en consenso con el inspector fiscal se ha preparado una ficha de catastro que se utilizará en terreno para poder organizar de mejor manera la información de cada predio y punto de agua visitado, dichas fichas se pueden observar en la Figura 3-2 y Figura 3-3.

AMPHOS 21		FICHA DEL PUNTO DE AGUA	
CÓDIGO DGA	Coordenadas UTM	X	
CONCESIÓN	WGS84 HUSO 185	Y	
PROVINCIA	COTA m.s.n.m	Z	
COMUNA			
COD. INTERNO A21	Fecha/hora		
NOMBRE DEL PROPIETARIO			
PREDIO			
ENTREVISTADO			
CUENCA			
ACUÍFERO(s)			
Uso del Agua <input type="radio"/> Minería <input type="radio"/> Domestico <input type="radio"/> Industrial <input type="radio"/> Riego <input type="radio"/> Otros			
N° resolución DGA			
Año			
Inscripción CBR <input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Pendiente			
PUNTO DE AGUA SUBTERRÁNEA <input type="radio"/> Pozo <input type="radio"/> Noria <input type="radio"/> Eren <input type="radio"/> Fuent			
Equipo de bombeo		Régimen de bombeo	
Motor	MES		
	DIA/MES		
Potencia/HP	HORAS/DIA		
	Q medio	Unidad	L/seg
EXTRACCIÓN			
Material de la Camisa			
Diámetro del Pozo			
Profundidad (m)			
Capacidad Nominal			
Estado de Agua: <input checked="" type="radio"/> En Uso <input type="radio"/> Sin Uso <input type="radio"/> Turbia <input type="radio"/> Pozo Seco <input type="radio"/> Contaminado			
Foto N°			
Medida de Nivel de Agua			
Fecha/hora de la medida		Prof. Del nivel del agua (m)	
Referencia de la medida (h)		(estático/dinámico)	
PUNTO DE AGUA SUPERFICIAL <input type="radio"/> Bocatoma <input type="radio"/> Canal <input type="radio"/> Vertiente			
Nombre del Canal/Bocatoma		Caudal	
Comunidad de aguas		Volumen	
Nombre del Rio/Estero/Lago/Vertiente asociado			
Temporada de Riego		Tipo de punto: <input type="checkbox"/> Captación <input type="checkbox"/> Resitución	
Tipo Bocatoma: <input type="radio"/> Bocatoma Alta Montaña (reja) <input type="radio"/> Bocatoma Planicie <input type="radio"/> Bocatoma profunda			
Foto N°			
Video N°			

EMBALSE Y TRANQUES		<input type="radio"/> Embalse	<input type="radio"/> Tranque
Nombre		Superficie Regada (Ha)	
Comunidad de aguas			
Dimensiones		Funcionamiento	
Fecha inicio operación		Embalse (hr/turno)	
Volumen Máximo		Volumen Mínimo	
Temporada de Riego		Filtraciones	
Fotos N°		Videos N°	

PUNTOS DE DESCARGA	
TIPO <input type="checkbox"/> Hidroeléctrica <input type="checkbox"/> Industri <input type="checkbox"/> Agua Potable <input type="checkbox"/> OBS (Color, Olor)	
<input type="checkbox"/> Agua Servida <input type="checkbox"/> Abastecido <input type="checkbox"/> Piscicultura	
Caudal	
Foto N°	Video N°

OBSERVACIONES E INCIDENCIAS	
Persona responsable del catastro	
Observaciones y actividades del entorno (usos del suelo, mineras cercanas, vertidos, etc.)	
¿Se ha podido inventariar el punto de agua ?	<input checked="" type="radio"/> SI <input type="radio"/> Punto no accesible <input type="radio"/> No se ha localizado al propietario <input type="radio"/> Datos del contacto incorrecto <input type="radio"/> Cambio de propietario (indicar nuevos datos) <input type="radio"/> Punto abandonado/en mal estado/ sellado <input type="radio"/> Ha cambiado las condiciones de entorno
Croquis de localización	

Figura 3-2. Ficha de agua para el catastro en la cuenca (Amphos 21).

AMPHOS 21		FICHA DE PREDIO	
CÓDIGO DGA	Coordenadas UTM	X	
CONCESIÓN	WGS84 HUSO 185	Y	
PROVINCIA	COTA m.s.n.m	Z	
COMUNA			
COD. A21	Fecha/hora		
NOMBRE DEL PROPIETARIO			
PREDIO			
ENTREVISTADO			
CUENCA/SUBCUENCA			
ACUÍFERO(s)			
Tipos de puntos en el predio <input type="radio"/> Pozo <input type="radio"/> Noria/Eren <input type="radio"/> Bocatoma <input type="radio"/> Embalse/Tranque <input type="radio"/> Canal <input type="radio"/> Descarga			
ROL PROPIEDAD O PREDIO			
ROL PROPIEDAD o PREDIO			
Dimensiones (largo x ancho)			
N° Foto entorno/entrada predio			
USO DE SUELO			
<input type="checkbox"/> Residencial <input type="checkbox"/> Equipamiento <input type="checkbox"/> Infraestructura <input type="checkbox"/> Espacio Público <input type="checkbox"/> Areas Verdes <input type="checkbox"/> Forestal <input type="checkbox"/> Actividades			
USO DEL AGUA			
<input type="checkbox"/> Pesca/Albora <input type="checkbox"/> Agricultura <input type="checkbox"/> Ganadería <input type="checkbox"/> Industrial <input type="checkbox"/> Residencial <input type="checkbox"/> Beldad/Uso domestico <input type="checkbox"/> Forestal			
<input type="checkbox"/> Minería <input type="checkbox"/> Agua Potable <input type="checkbox"/> Aguas Servidas <input type="checkbox"/> Hidroeléctrica			
FUENTE DEL AGUA			
<input type="radio"/> Pozo <input type="radio"/> Noria <input type="radio"/> Eren <input type="radio"/> Bocatoma <input type="radio"/> Embalse <input type="radio"/> Tranque <input type="radio"/> Descarga			
Tipo de Riego			
<input type="radio"/> Surcos (S) <input type="radio"/> Aspersión (A) <input type="radio"/> Por Bordos (B) <input type="radio"/> Inundación (I) <input type="radio"/> Por Chubas (C) <input type="radio"/> Goteo (G) <input type="radio"/> Otro (O)			
Tipo y áreas de cultivo			
Tipo de Cultivo	Sistema de Riego	Variedad	Superficie
			Fuente de Agua (Para riego)
Foto N°		Video N°	

OBSERVACIONES E INCIDENCIAS	
Persona responsable del catastro	
Observaciones y actividades del entorno (usos del suelo, mineras cercanas, vertidos etc.)	
¿Se ha podido inventariar el predio?	<input checked="" type="radio"/> SI <input type="radio"/> Punto no accesible <input type="radio"/> No se ha localizado al propietario <input type="radio"/> Datos del contacto incorrecto <input type="radio"/> Cambio de propietario (indicar nuevos datos) <input type="radio"/> Punto abandonado/en mal estado/ sellado <input type="radio"/> Ha cambiado las condiciones de entorno
Croquis de localización	
Observaciones	

Figura 3-3. Ficha de predio para el catastro en la cuenca del río Bueno (Amphos 21).

3.1.4 Depuración del C.P.A.

3.1.4.1 Antecedentes

A partir de los archivos de la CPA recopilados para la región de Osorno, se conformó el archivo general de base de datos de CPA, que agrupa solicitudes concedidas desde comienzo del 1900 hasta mediados de 2012. La información se encontraba organizada en 41 campos relacionados con información de carácter administrativo como: unidad de resolución, Código de expedientes, N° y fecha de resolución, etc. Información asociada al punto como: Tipo de punto, coordenadas y sistemas de proyección, usos de agua, naturaleza, caudal, unidades de caudal, entre otros. Por otra parte, los registros de la BDD recopilan cada alteración de la solicitud por cada punto y caudal asociado, existiendo expedientes con más de 120 alteraciones. En total, la BDD presenta 4.515 registros, que representan un total de 2.934 expedientes (con coordenadas UTM válidas).

A pesar de presentar una estructura definida en los campos y registros mencionados, los datos presentaban numerosas deficiencias de distinta naturaleza. Estos son los errores más frecuentes que se localizaron en la BDD:

- ✓ Campos sin información.
- ✓ Datos en campos no correspondientes (frecuentemente campos contiguos).
- ✓ Caudales en diferentes unidades (Lt/seg- Lt/min - Lt/día - m³/año -m³/mes - m³/día - m³/min- m³/seg).
- ✓ Caudales sin unidades.
- ✓ Magnitudes de caudales y datos numéricos amplificadas.

Ejemplo:

Pozo con caudal CPA 2.500 Lt/seg. - Caudal expediente 2,5 Lt/seg.

- ✓ Coordenadas inexistentes.
- ✓ Coordenadas fuera de área.
- ✓ Sistema de proyección y datum no definidos.
- ✓ Magnitud de coordenadas erróneas.

Ejemplo:

Coordenada UTM Este con valor 5.629.583.000 (la magnitud Este debe estar cercana a cientos de miles, alrededor de 500.000 metros).

Coordenada UTM Norte con valor 674.587.000 (la magnitud Norte debe ser en millones de metros).

Cabe señalar que no todos los registros se encuentran asociados a coordenadas geográficas. El 62% (2.824 registros) posee coordenadas en algún sistema geográfico, que representan el 63% de los expedientes obtenidos en la recopilación de antecedentes. Existe, por el contrario, otro 37% que no ha podido ser localizado al no contar con sus coordenadas.

Por otra parte, se encontraron errores de consistencia en la información, en los que se modificaban datos básicos para la interpretación de los registros (punto y caudal)

La estructura general de los campos presentes en la BDD se muestra en la Figura 2-4:

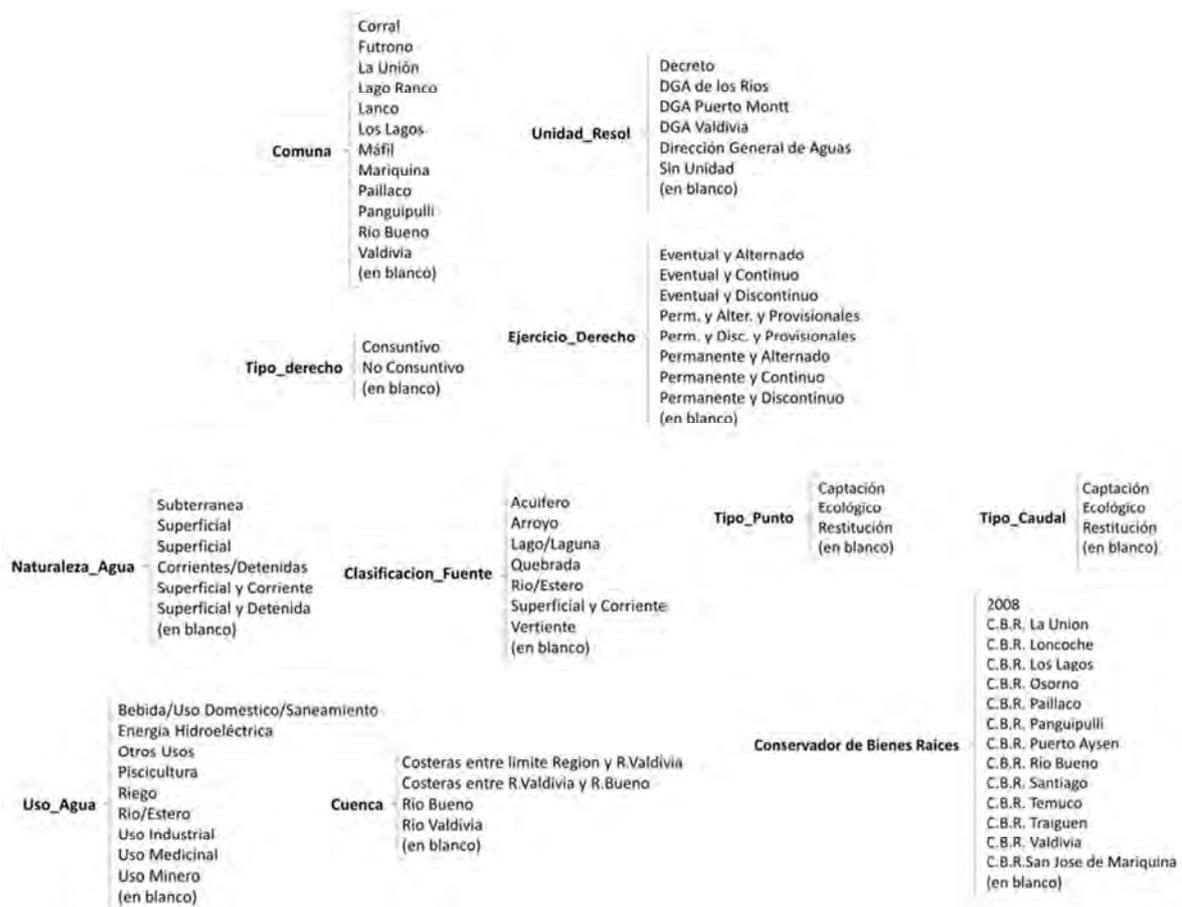


Figura 3-4. Estructura general de los campos presentes en la Base de Datos, previa a su depuración (Amphos 21)

3.1.4.2 Objetivos y alcance

Tras la sistematización y depuración de los datos de CPA, se incorporaron los datos validados en terreno (catastro) al set de datos existentes y verificados en conjunto a los expedientes.

La totalidad de los datos recopilados han sido incorporados en una BDD tipo Access, pudiendo ser consultables y actualizados de forma continua, con la posibilidad de ser integrados en cualquier sistema de administración de base de datos.

3.1.4.3 Metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se realizaron los siguientes procedimientos:

3.1.4.3.1 Recopilación de antecedentes y archivos CPA

Se realizó la recopilación de los antecedentes disponibles en DGA relativos al Catastro Público de Aguas (CPA), esta información fue recibida en formato Excel en archivos de Derechos de Agua Concedidos (4) y Derechos de Agua en Trámite (4).

A su vez se recopilaron más de 9.000 archivos en formato digital, con información escaneada de Expedientes de Derechos de Agua, equivalente a más 60 Gb de información.

3.1.4.3.2 Unificación de información y formato

La información fue unificada en un único archivo, previa validación de los campos y tipos de datos presentes en cada planilla. Finalmente se creó un archivo único, con un total de 4.515 registros.

3.1.4.3.3 Verificación de errores lógicos

Tras analizar las inconsistencias en la información se procedió a identificar los errores sistemático producto del copiado y pegado de diferentes fuentes sin verificación previa de los datos. Estos constituyen caracteres numéricos no reconocidos, o valores numéricos con órdenes de magnitud mayores o menores al dato real.

3.1.4.3.4 3.4 Jerarquización de errores presentes en la BDD

Dada la multitud de errores presentes en la BDD se realizó una jerarquización de las variables más importantes, definiendo las de mayor interés en verificar.

Se determinó, en conjunto con el Inspector Fiscal, que 22 de los 41 campos existentes debían ser considerados en la BDD final. Los campos seleccionados son los siguientes:

Archivo, Nombre, Apellido_Paterno, Apellido_Materno, Código_Expediente, Nro_Sol, Comuna, Unidad_Resol, Fecha, Nro_Resol, Tipo_Derecho, Ejercicio_Derecho, Naturaleza_Agua, Uso_Agua, Tipo_Punto, UTM_Norte, UTM_Este, Huso, Datum_UTM, Tipo_Caudal, Mes, Caudal (Lt/seg).

De este grupo de variables se estableció que el Caudal Concedido era el campo de mayor importancia para los balances y modelos, estableciendo la prioridad y orden de revisión de expedientes.

Posteriormente a la revisión de expedientes por caudales, se revisaron los registros y/o expedientes con coordenadas erróneas o con rango de datos diferentes a los UTM correctos para la zona en estudio.

3.1.4.3.5 Definición de estructura y modelo de datos

Tras el análisis de los campos de la BDD y su combinación, se concluyó la imposibilidad de dividir los datos en sub tablas funcionales al no existir 2 o más campos comunes que sean capaces de interrelacionarlas. Esto dificulta administrar de mejor manera consultas complejas, pero siendo posible realizar otras más simples, reportes y formularios.

En aquellos casos en que el tipo derecho sea No Consuntivo, se han agregado los registros de Caudales de Restitución actualmente omitidos en favor de registrar los datos necesarios al momento de generar consultas sobre los Derechos de Agua.

A su vez, en las situaciones en que exista más de un punto de captación (que comparta caudal o grupos de puntos con caudal autorizado en conjunto), se ha ingresado a cada punto el caudal promedio, de manera que la suma total de caudales sea coincidente con el expediente. Esto facilita la realización de operaciones matemáticas sobre los caudales, que de otra manera estarían sobredimensionados.

3.1.4.3.6 Depuración de datos mediante verificación de expedientes

Los datos fueron verificados, en su mayoría, a través de la revisión individual de los expedientes digitales. De esta forma se ha podido obtener una base de datos útil y funcional, que permita posteriormente la toma de decisiones.

Tras la verificación de los expediente se procedió al traspaso de los datos a la estructura final de BDD (Anexo C – Catastro Público de Aguas).

3.1.5 Análisis e interpretación de la información obtenida

La interpretación de los resultados se realizó a partir de la correlación de toda la información correspondiente a estudios previos de las cuencas principales de las regiones de los Ríos y los Lagos, información obtenida de las estaciones meteorológicas y fluviométricas y de los datos obtenidos de las campañas de terreno realizadas.

Se trabajó sobre los acuíferos principales de las regiones de los Ríos y los Lagos, específicamente en el acuífero sedimentario de la cuenca del río Bueno, donde la demanda por derechos de aguas subterráneas ha aumentado considerablemente en los últimos años.

Este estudio considera el levantamiento de información hidrogeológica de los acuíferos del río Bueno, con el objeto de formular un modelo que represente los flujos del sistema hidrogeológico, priorizando la generación de un modelo conceptual más detallado para los respectivos rellenos sedimentarios.

3.1.6 Cuantificación del balance hídrico

Se propuso un balance hídrico, en el que se estimaron las entradas y salidas del sistema acuífero, definiendo las zonas donde se realizaron los balances.

Una tarea importante fue el establecimiento de la interacción entre las componentes superficial y subterránea del flujo. Esto se realizó mediante la integración y análisis de la información de:

- Catastro de puntos de agua (niveles freáticos y piezométricos).
- Caudales recopilados y aforados cuyas entradas principales están dadas por las infiltraciones de lluvias y riego así como las recargas difusas, laterales, fluviales, y de redes de agua potable y aguas servidas, y por las salidas dadas principalmente por los bombeos de los pozos, las recargas a ríos y esteros.
- Geometría de los acuíferos reconocidos (obtenida a través de la prospección geofísica)
- Estructuras geológicas que realizan un control sobre los cursos superficiales o que establecen una condición de borde para los acuíferos.
- Observaciones de terreno.

Finalmente, se combinó toda esta información para establecer el funcionamiento del sistema acuífero del río Bueno.

3.1.7 Funcionamiento del modelo conceptual

A partir de los antecedentes generados y las actividades antes mencionadas se procede a desarrollar el modelo conceptual hidrogeológico.

El modelo conceptual del funcionamiento del sistema acuífero del río Bueno explica el funcionamiento hidrogeológico, relacionando la recarga de los acuíferos, el flujo subterráneo y superficial, las descargas a los ríos o sistemas superficiales y las extracciones a través de los bombeos de pozos.

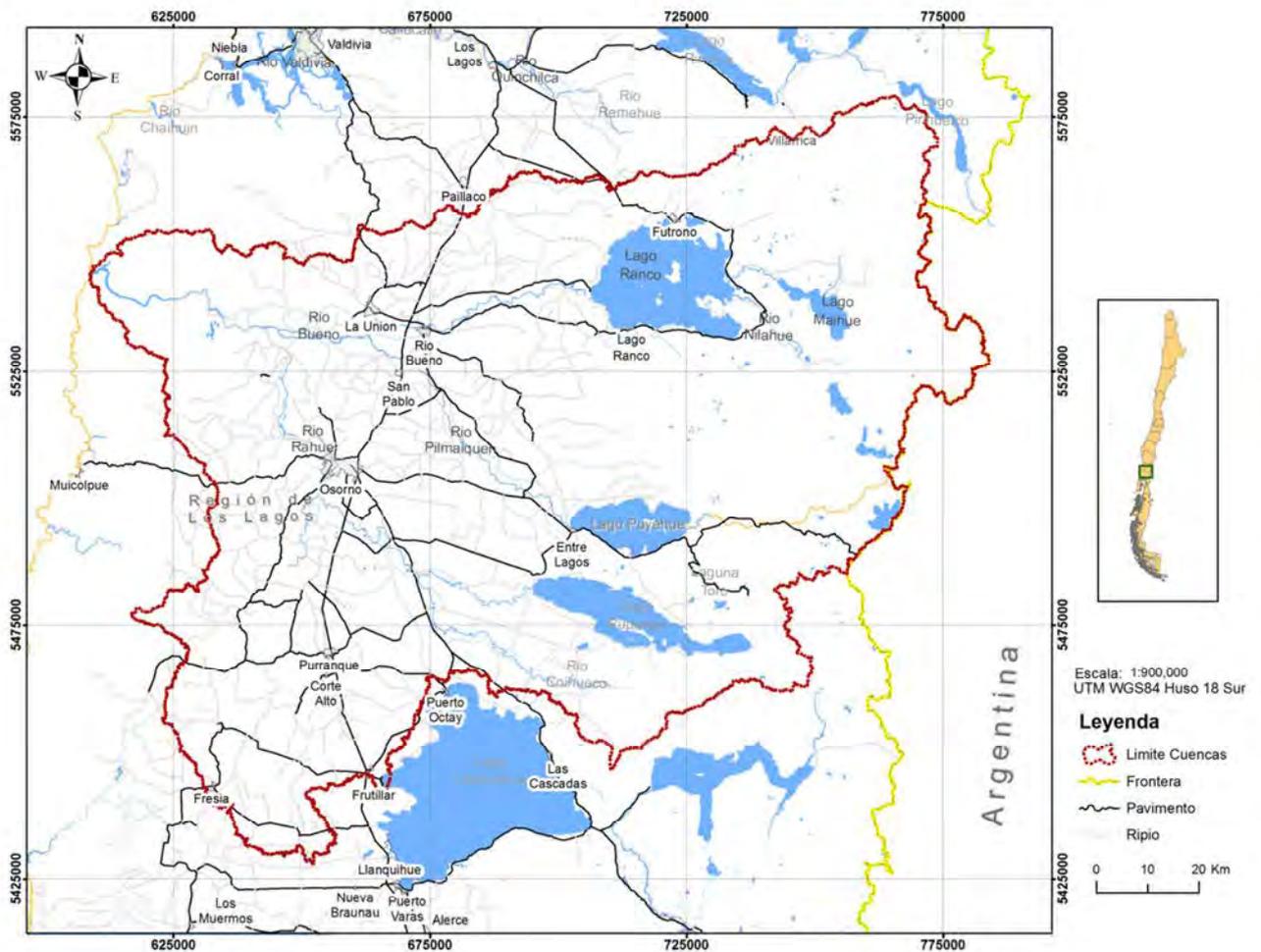
Las condiciones de contorno se definieron de forma que a su vez, no tengan ambigüedad en su definición ni parametrización. Estas fueron suficientemente adecuadas a la realidad, de forma que permitieron además incorporar la variabilidad hidrológica en las zonas de entrada que se establezcan.

Por último se determinaron los valores de los parámetros de entrada al modelo, de acuerdo a los antecedentes y a toda la información recabada para este estudio en las actividades anteriores.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.2.1 Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio se encuentra en la Región de los Ríos, y parte de la Región de Los Lagos. Este sector abarca la Cuenca Hidrográfica del Río Bueno, comprendiendo la zona entre las coordenadas Norte = 5.443.886 y 5.564.603; y las Este=608.443 y 782.346 (en WGS84, 18S). Los límites son la Cuenca de Valdivia por el norte, el Océano Pacífico hacia el oeste, extendiéndose por el este hasta la frontera con Argentina (Figura 3-5). El área abarca las provincias de Ranco, Llanquihue y Osorno.



3.2.2 Geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico, existe una serie de elementos fisiográficos que se pueden identificar claramente; los grupos principales son (Figura 3-6):

- Cordillera de los Andes volcánica activa.
- Precordillera morrénica.
- Lagos de barrera morrénica.
- Depresión Intermedia o Llano Central con Morrenas y Conos.
- Cordillera de la Costa.
- Planicies Litorales y fluvio-marinas.

La cordillera volcánica activa se caracteriza por la presencia principalmente de sierras y cordilleras que se empinan entre los 1.000 y 1.600 m.s.n.m. Se define como un relieve fuertemente rebajado por la erosión de los glaciales y ríos. La morfología dominante de la cordillera volcánica activa corresponde a los nevados conos volcánicos que en forma aislada se levantan al extremo oriental de los grandes lagos.

La precordillera, posee un carácter de acumulación de sedimentos fluvio-glaciovolcánicos. En esta zona se presenta como formas del relieve de lomas sometidas a una intensa acción erosiva lineal por los cuerpos fluviales y lacustres. La Depresión Intermedia presenta una topografía fuertemente ondulada y los ríos se profundizan creando los sistemas aluviales.

Las Planicies Litorales de sedimentación fluvio-marina en esta zona se presentan muy estrechas e interrumpidas por un muro costero que se empina sobre los 600 msnm. A pesar de su poca relevancia, este cordón tiene importancia para el sector La Unión, Río Bueno y Río Negro, determinando una atenuación en el efecto húmedo de los vientos del oeste y favoreciendo un dominio de los secos vientos del sur. A este sector del relieve costero se le denomina Cordillera Pelada.

Los lagos de barrera morrénica que se encuentran en la cuenca son: Ranco, Maihue, Puyehue y Rupanco. Todos estos lagos, morfológicamente denotan un antecedente glacial que ha sido preservado por morrenas glaciales.

3.3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

El análisis hidrológico de la zona de estudio se basó en la información de las estaciones meteorológicas de la Dirección General del Agua (Tabla 3-2).

Tabla 3-2. Estaciones representativas en la zona de estudio.

Código	Nombre Estación	UTM ESTE (WGS_84_18S)	UTM NORTE (WGS_84_18S)	Elevación m.s.n.m.
10304002-7	Lago Maihué	742590	5544234	150
10307001-5	Lago Ranco	715040	5533959	120
10322002-5	Anticura	738037	5495697	170
10340002-3	Rupanco	695462	5483824	100
10350001-K	Fresia	633320	5443005	148
10356001-2	Río Negro en Chahuilco	649693	5491524	45
10360002-2	Adolfo Matthei	660200	5505218	55
10371001-4	Trinidad	633118	5536195	40

Para completar y extender las estadísticas de las estaciones incompletas en la cuenca se realizaron correlaciones lineales (Gumbel y Goodrich, dobles acumuladas y correlación ortogonal) con diversas estaciones base donde se disponía de series más extensas y completas.

3.3.1 Climatología

La zona de estudio se caracteriza por presentar dos regímenes definidos: el clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea (en el sector centro y bajo de la cuenca) y clima templado frío lluvioso con influencia mediterránea (sector precordillerano de la cuenca):

- ✓ Clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea: se caracteriza por presentar precipitaciones a lo largo de todo el año aunque los meses de verano presentan menor pluviosidad que los meses invernales. Las temperaturas no sufren

una gran variación por latitud, siendo la unidad térmica y lo poco significativo de las oscilaciones, una notable característica de este clima (Figura 3-7).

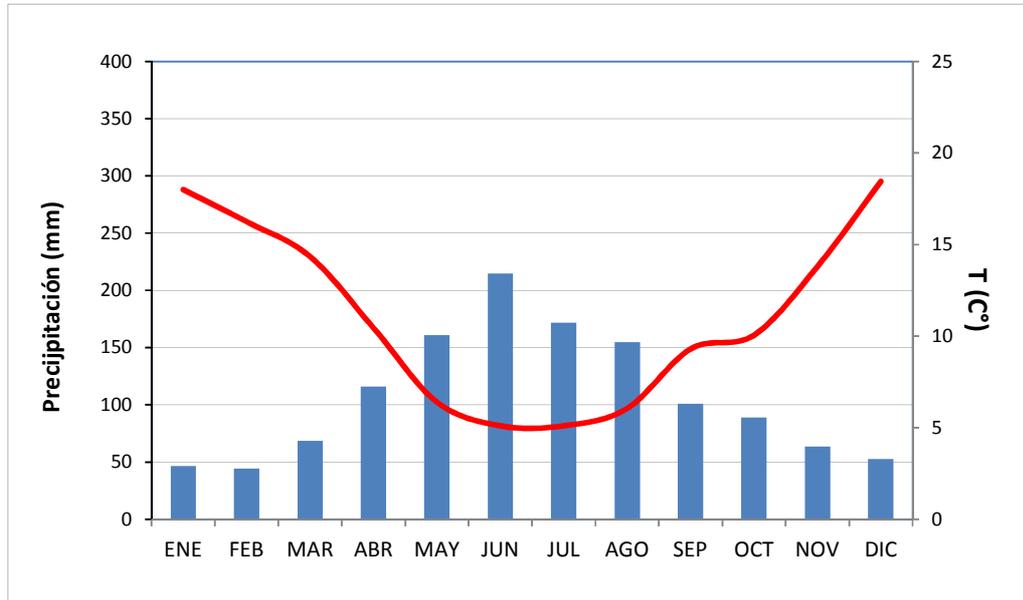


Figura 3-7 Figura con las precipitaciones (mm) y temperaturas (°C) medias mensuales (basado en las estaciones meteorológicas de la cuenca). Elaboración: Amphos 21.

- ✓ Clima templado frío lluvioso con influencia mediterránea: se caracteriza por las bajas temperaturas durante todo el año y el aumento de las precipitaciones con la altura, las cuales llegan a los 3.000 mm anuales, sobre los 1.200 m.s.n.m.

3.3.2 Temperatura

Las temperaturas mínimas se alcanzan durante los meses de junio, julio y agosto. Dentro de las cuencas precordilleranas la diferencia entre la temperatura máxima absoluta y mínima absoluta alcanza hasta los 20°C (entre 21°C y -4°C), especialmente en estos meses más fríos. La media del mes más cálido supera los 13°C.

Se dispuso de la información de la temperatura mensual de algunas estaciones de la cuenca hasta el 2011 por lo que se actualizaron las isotermas del mapa hidrogeológico de Chile de 1987 correspondientes a la zona de estudio (Figura 3-8).

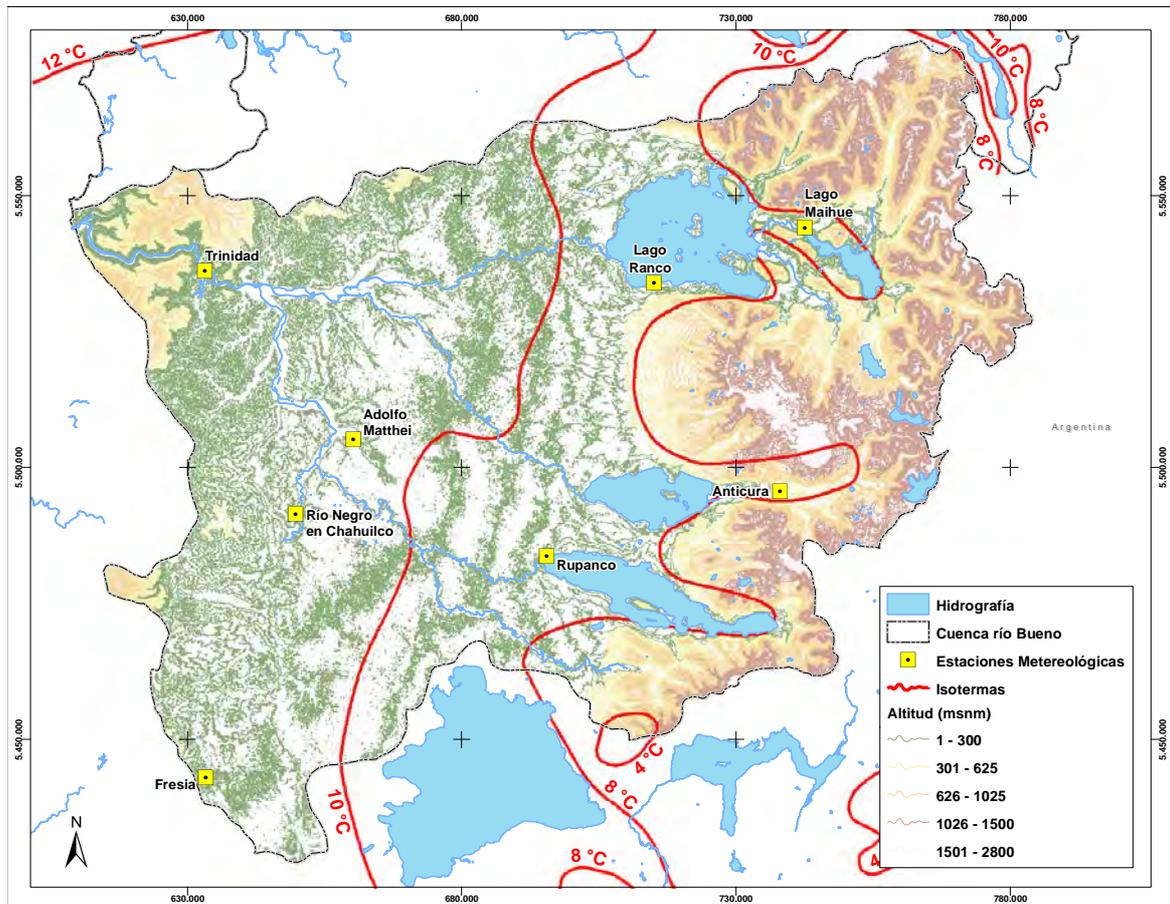


Figura 3-8. Distribución de las isotermas en la Cuenca de río Bueno. (Amphos 21)

3.3.3 Régimen de precipitaciones

La zona de estudio pasa constantemente por periodos en que se presenta un superávit o, por el contrario, un déficit en las precipitaciones, cuestiones que están relacionadas con la presencia de dos ciclos o corrientes marinas, El Niño y La Niña. Cuando ocurre este último fenómeno, se viven intensas sequías en la zona austral, las que afectan fuertemente a dos sectores vitales de la economía chilena: la agricultura, actividad económica fundamental en el centro-sur del país, y la generación de energía eléctrica.

En la Figura 3-9 se representa la variación temporal de la precipitación media mensual durante los años indicados. En esta se observan claramente las dos estaciones definidas. Los años promediados son los siguientes:

- Estación Lago Maihue: 1977-2011.
- Estación Lago Ranco: 1958-2011.

- Estación Anticura: 1998-2004.
- Estación Rupanco: 1994-2011.
- Estación Fresia: 1994-2011.
- Estación Río Negro en Chahuilco: 2004 – 2011.
- Estación Adolfo Matthei: 1983-2011.
- Estación Trinidad: 1998 – 2011.

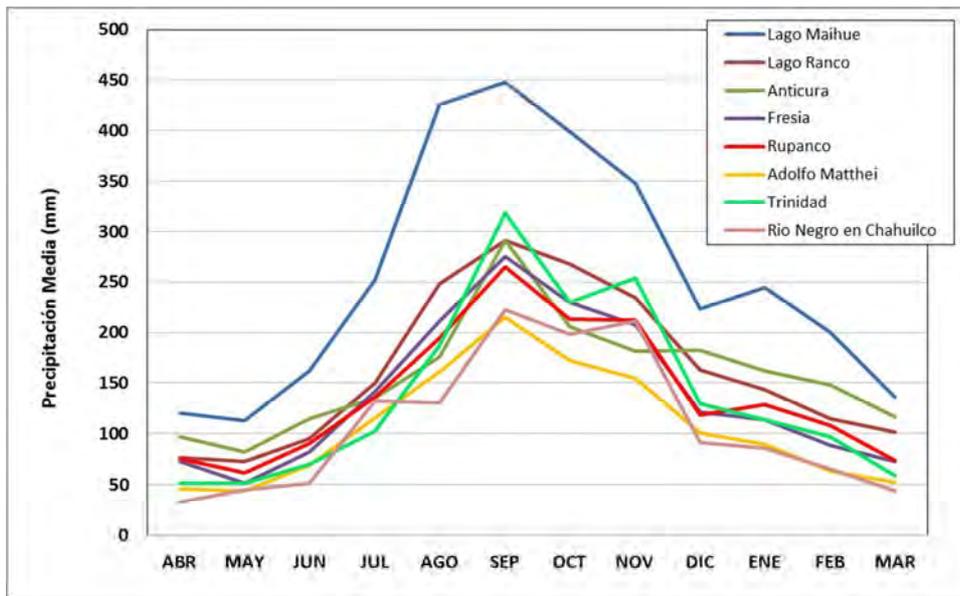


Figura 3-9. Precipitación media mensual en estaciones meteorológicas de la cuenca (1994-2011).
Elaboración: Amphos 21.

Según las estaciones meteorológicas estudiadas, la cuenca se caracteriza por presentar dos regímenes pluviométricos anuales claramente definidos:

- El primero, más seco, que se produce entre los meses de diciembre a mayo.
- El segundo, muy húmedo, comprendido entre los meses de junio a noviembre.

En la cuenca del río Bueno se realizó una regresión con datos de las estaciones y se estimó un gradiente de precipitación de 250 mm cada 100 m ($P = 4,66x + 1.244$). En la Figura 3-10 se presenta la relación de la precipitación con la altitud, donde se ha actualizado la gráfica con valores de precipitación anual (mm).

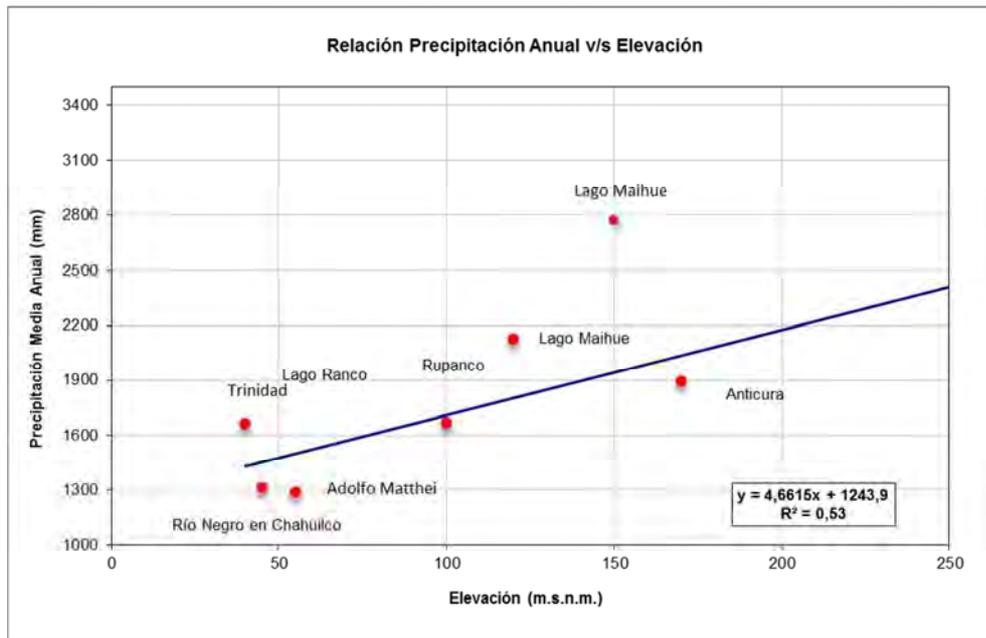


Figura 3-10 Relación de la precipitación anual y la elevación. Elaboración: Amphos21.

3.3.4 Evapotranspiración real

La evapotranspiración real, tomada de Balance Hidrológico (1987) presenta en las zonas de menor altitud de la cuenca valores medios de 550-600 mm/año, y en las zonas más elevadas, con altitudes que oscilan entre los 1.500 y 1.800 m, valores medios de ETR de 500 mm/año.

3.3.5 Análisis de la información Fluviométrica

En la cuenca del río Bueno en su parte oriental existe un gran número de lagos, donde destacan por su tamaño los lagos Ranco, Rupanco y Puyehue. La cuenca del río Bueno está compuesta principalmente por las subcuencas del Rahue, los afluentes del lago Ranco y del Bueno. El río Rahue nace en el extremo occidental del lago Rupanco, y luego de su trayecto en dirección noroeste su curso torna hacia el norte, hasta su junta con el río Bueno. Los principales afluentes del lago Ranco, el Calcurrupe y el Nilahue, nacen en el lago Maihue y en la cordillera de Los Andes, respectivamente. El río Bueno nace en el extremo occidental del lago Ranco y toma una dirección hacia el oeste hasta su desembocadura en el océano Pacífico. El Pilmaiquén, afluente del Bueno, nace en el lago Puyehue y toma una dirección hacia el noroeste hasta su junta con el Bueno (Figura 3-11).

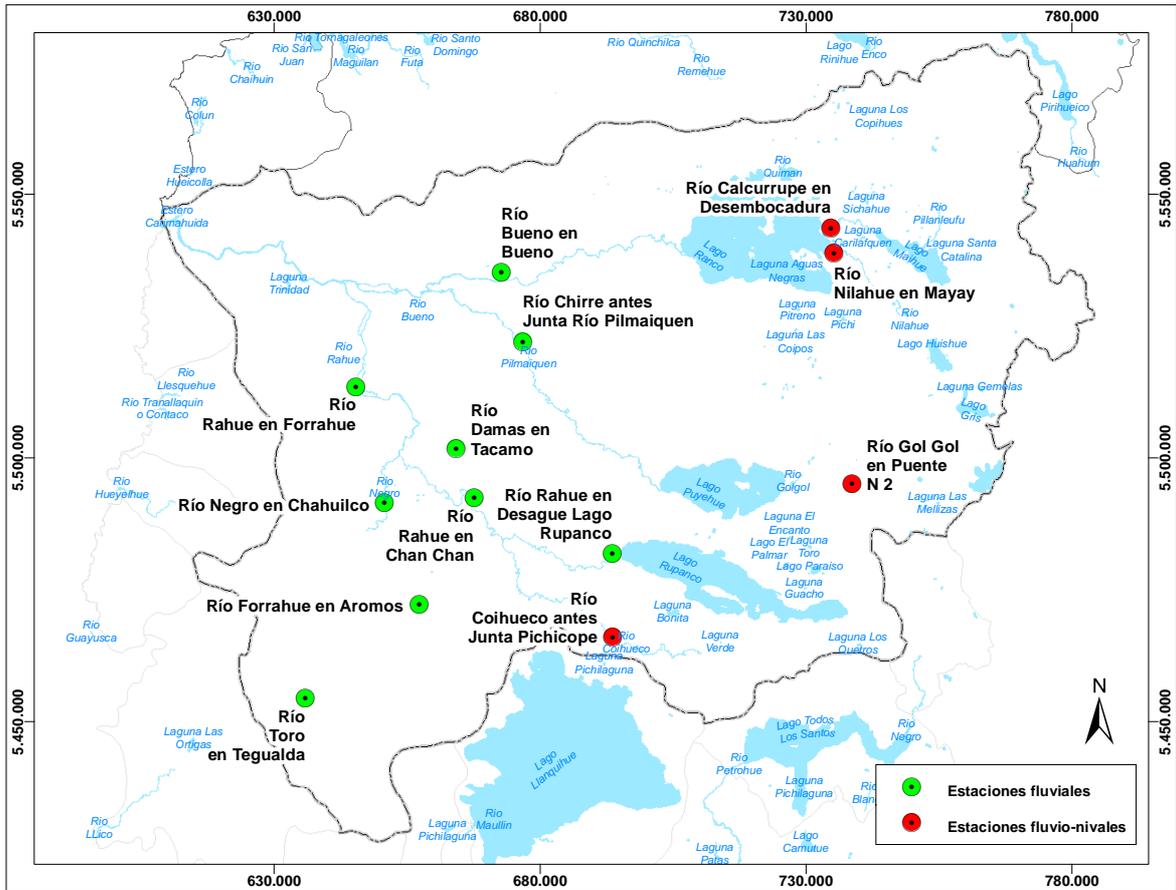


Figura 3-11 Localización de las Estaciones Fluviométricas interpretadas en la Cuenca del río Bueno. Elaboración: Amphos 21.

En el análisis de la información hidrológica la información que se utilizó para la realización del presente estudio hidrológico fue proporcionada por el Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH) de la Dirección General de Aguas (Tabla 3-3):

Tabla 3-3. Estaciones Fluviométricas interpretadas de la Cuenca del río Bueno.

Nombre	Código	UTM ESTE (WGS_84_18S)	UTM NORTE (WGS_84_18S)	Tipo	Información	Estado
Río Calcurrupe en Desembocadura	10304001-9	734.691	5.543.626	Pluvio-nival	1987 - 2011	Vigente
Río Nilahue en Mayay	10306001-K	735.256	5.538.972	Pluvio-nival	1988 - 2011	Vigente
Río Bueno en Bueno	10311001-7	672.766	5.535.111	Pluvial	2002 - 2011	Vigente
Río Gol Gol en Puente N 2	10322003-3	738.629	5.495.122	Pluvio-nival	2009 - 2011	Vigente
Río Chirre antes Junta Río Pilmaiquen	10327001-4	676.710	5.522.061	Pluvial	2001 - 2011	Vigente
Río Rahue en Desagüe Lago Rupanco	10340001-5	693.530	5.481.778	Pluvial	1986 - 2011	Vigente
Río Coihueco antes Junta Pichicope	10343001-1	693.636	5.466.096	Pluvio-nival	1987 - 2011	Vigente
Río Rahue en Chan Chan	10344004-1	667.578	5.492.406	Pluvial	2008 - 2011	Vigente
Río Toro en Tegualda	10351001-5	635.864	5.454.433	Pluvial	2000 - 2011	Vigente
Río Negro en Chahuilco	10356001-2	650.737	5.491.524	Pluvial	1986 - 2011	Vigente
Río Damas en Tacamo	10362001-5	664.147	5.501.831	Pluvial	1986 - 2011	Vigente
Río Forrahue en Aromos	10363002-9	657.265	5.472.270	Pluvial	1992 - 2011	Vigente
Río Rahue en Forrahue	10364001-6	645.427	5.513.480	Pluvial	1986 - 2011	Vigente

En general la cuenca del río Bueno presenta un régimen pluvial, con sus crecidas más importantes en los meses de invierno. Sin embargo, es posible advertir una leve influencia nival en la parte alta de la cuenca, en los afluentes del lago Ranco, los ríos Calcurrupe y en el río Coihueco.

Para el análisis hidrológico se han utilizado dos grupos de estaciones, donde el primero es de régimen pluvial, y el segundo de régimen pluvio – nival.

- ✓ Grupo 1. Régimen Pluvial: compuesto por las estaciones fluviométricas que coinciden con el sector medio y bajo de la cuenca (Figura 3-12). La distribución

estacional muestra un comportamiento similar al régimen de las precipitaciones analizado en el capítulo anterior.

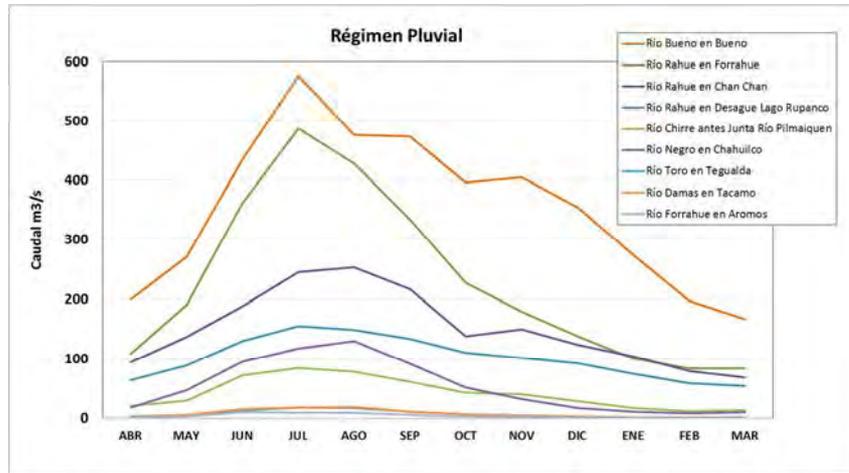


Figura 3-12. Variación media mensual de las estaciones pluviales. Elaboración: Amphos 21.

- ✓ Grupo 2. Régimen Pluvio – Nival: Este grupo está formado por las estaciones fluviométricas ubicadas en los afluentes del Lago Ranco, los ríos Calcarrupe y Nilahue, y la ubicada en el río Coihueco en las zonas más altas de la cuenca (Figura 3-13)

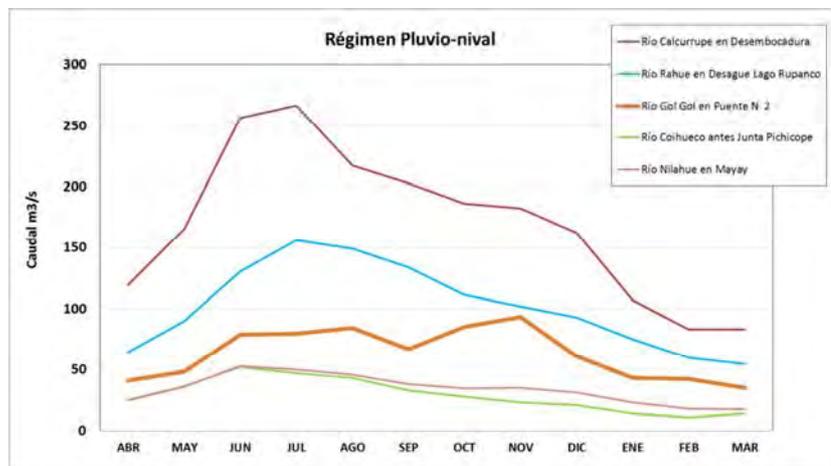


Figura 3-13. Variación media mensual de las estaciones pluvio-nivales. Elaboración: Amphos 21.

3.3.6 Actualización de los límites de las cuencas y subcuencas

La forma de una superficie determina el modo en que el agua pueda fluir a través de la misma. Las herramientas de análisis hidrológico de ArcGIS (ArcHydro 2.0) proveen un

método que permite describir las características físicas de una superficie. Utilizando un modelo de elevación digital (DEM), es posible delinear un sistema de drenaje y cuantificar las características del sistema.

Las cuencas pueden ser delineadas automáticamente a partir del DEM, utilizando como entrada la información de dirección de flujos, lo cual posibilita conocer el área de contribución de agua. Asimismo, a partir de la cuenca río Bueno ha sido factible actualizar las delineaciones de las subcuencas. A continuación en la Figura 3-14 se exponen los nuevos límites de la cuenca del río Bueno y la actualización de las subcuencas que la integran.

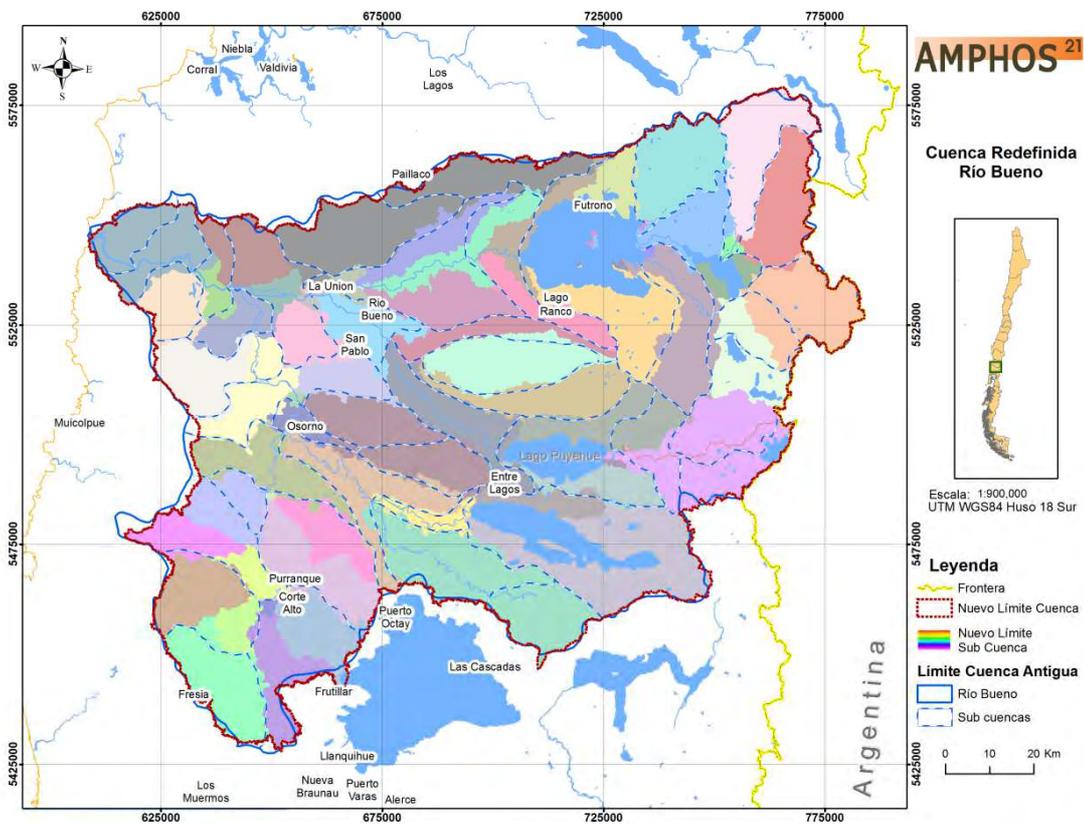


Figura 3-14 Actualización de los límites de las cuencas y subcuencas de la cuenca del río Bueno. Elaboración: Amphos 21.

3.3.7 Red de drenaje y Diagrama unifilar

Una de las principales características de la geografía de la cuenca de los ríos corresponde a sus cursos hidrográficos. La región posee alrededor de 10.500 km de ríos y esteros destacando entre ellos los ríos Bueno y La Unión, entre otros. Además, presenta una serie

de lagos y lagunas, las cuales cubren alrededor de 1.000 km² de extensión, siendo el Lago Ranco el más extenso de la cuenca del río Bueno.

El río Bueno nace en el extremo poniente del lago Ranco, y tras un recorrido de 130 km en dirección general E-W, desemboca en el Océano Pacífico al norte de la punta Dehui, después de trasponer una barra que impide en la actualidad la navegación desde su boca.

Quince kilómetros aguas abajo de la ciudad de Río Bueno, le afluye desde el sur, el río Pilmaiquén, que constituye el emisario del lago Puyehue. Tiene un recorrido de 68 km en dirección al NW. El río Pilmaiquén presenta un salto en roca de 17 m de altura a menos de 10 km de su origen, donde se ubica la central hidroeléctrica Pilmaiquén.

Otro importante tributario del río Bueno es el río Rahue, que le afluye también por su ribera sur a 40 km de su desembocadura en el mar. El Rahue nace en el extremo poniente del lago Rupanco, y en sus márgenes del curso medio se levanta la ciudad de Osorno, en pleno Valle Central.

El área costera presenta cuencas pequeñas cuyo origen está en la Cordillera de la Costa, siendo las más relevantes la del río Lingue en la comuna de Mariquina, el río Chaihuín en Corral y el río Colún en La Unión.

De acuerdo con la hidrografía de la cuenca del río Bueno se ha elaborado un diagrama unifilar. Esta se entrega de forma gráfica en la Figura 3-15.

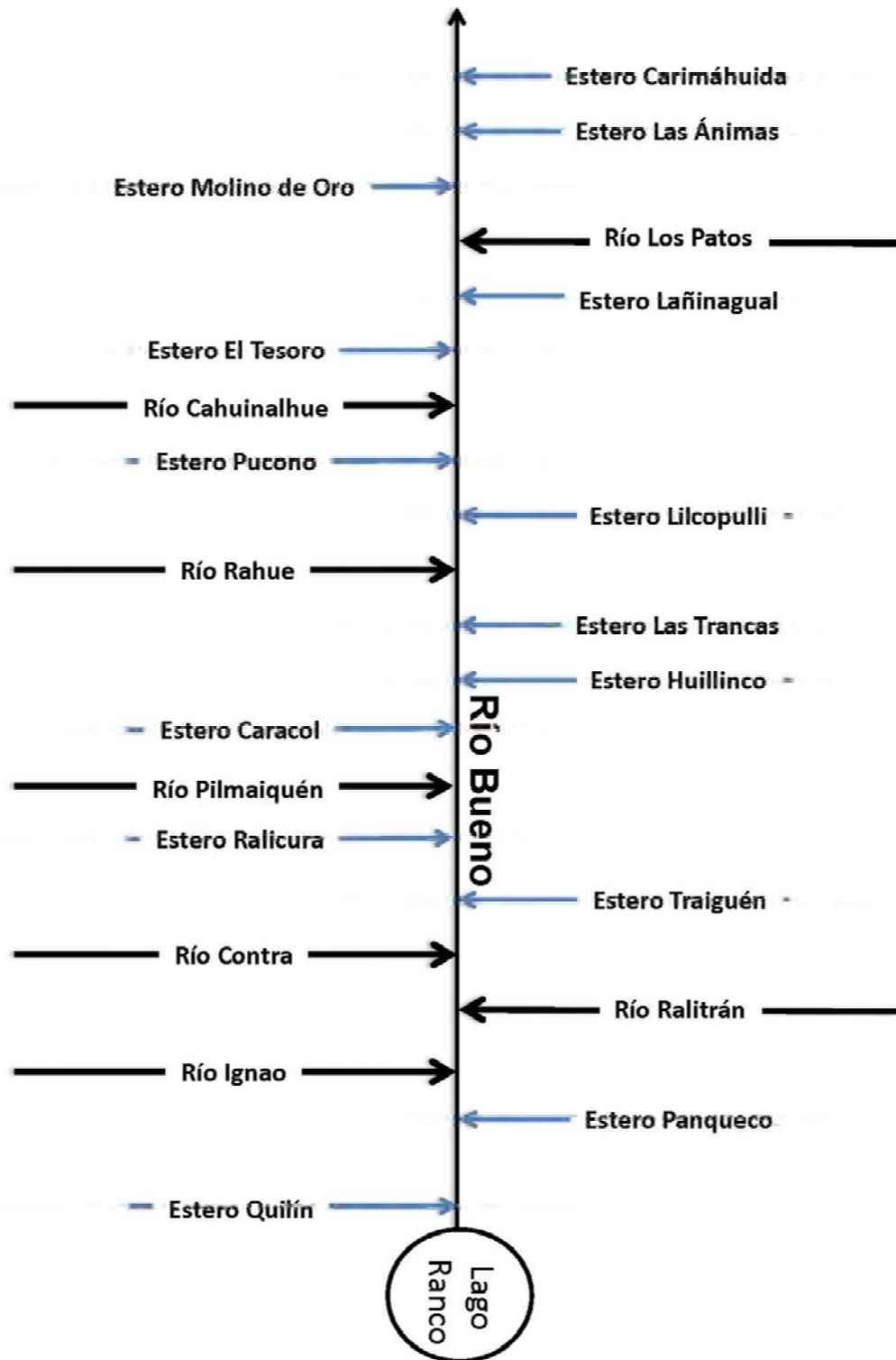


Figura 3-15. Diagrama unifilar río Bueno. Elaboración: Amphos 21.

3.4 MARCO GEOLÓGICO

3.4.1 Geología general

La zona de estudio presenta un conjunto de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de edades que fluctúan entre Paleozoico Superior y Holoceno. Hacia el W, se presenta un basamento metamórfico del Paleozoico-Triásico perteneciente al Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM) o Serie Oeste que forma casi en su totalidad la Cordillera de la Costa con rocas sedimentarias Cenozoicas subordinadas. El valle central se encuentra constituido por rocas sedimentarias y volcánicas Cenozoicas, además de presentar depósitos sedimentarios glaciares, fluviales, glaciofluviales y piroclásticos Cuaternarios. Hacia el W constituyendo la Cordillera de los Andes se encuentran Rocas intrusivas graníticas y volcánicas Paleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas (Figura 3-16 y Anexo E – Mapa Geológico).

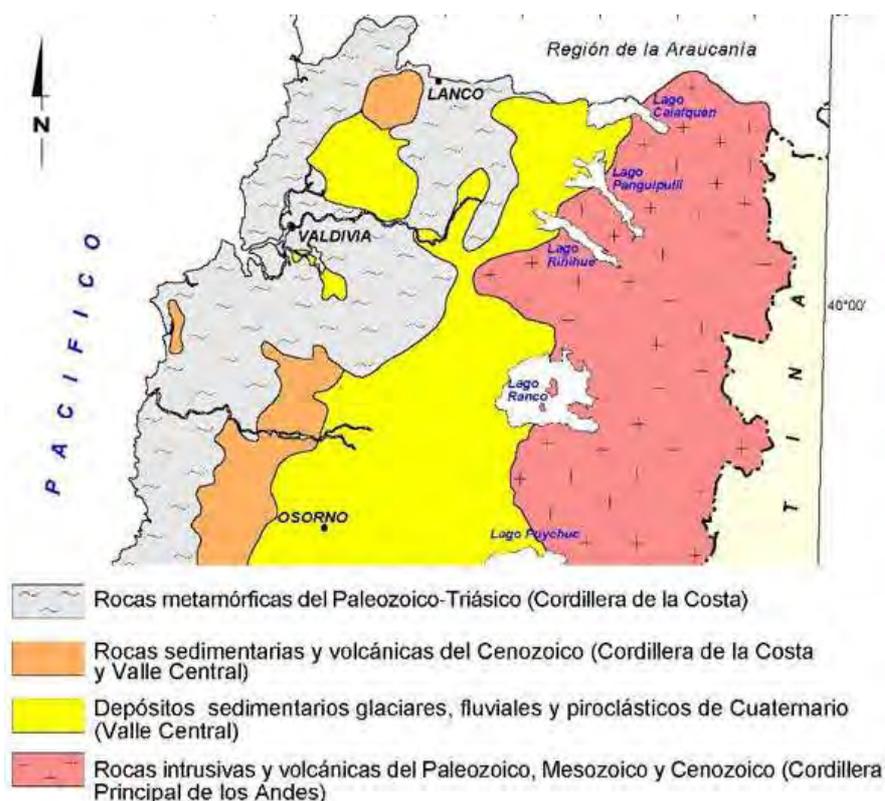


Figura 3-16. Marco Geológico de la región de Los Ríos y Los Lagos (SERNAGEOMIN, 2002).

La zona entre los 38°-42° S presenta todos los rasgos generales de un sistema de arco volcánico de borde continental: una fosa oceánica, un arco externo no-volcánico (Cordillera de la Costa), una depresión central y un arco interno volcánico (Cordillera de los Andes). Otras características, como por ejemplo, la existencia de rocas metamórficas de alta P/T en el arco externo, y de baja P/T en el arco interno, la ubicación de focos sísmicos principalmente en el arco externo, y la distribución de fuentes termales y de volcanismo en el arco interno, son típicas de una estructura de esa naturaleza (Kaizuka, 1975).

El CMBM que corresponde a un prisma de acreción en la costa, se encuentra intruido por las granodioritas Chaihuín, Oncol y dacitas Laurel del Cretácico. La cuenca de Antearco de Valdivia está compartimentada por los depocentros de San José de la Mariquina y Valdivia, desarrollados en paleovalles fluviales estrechos. Estos están determinados por una tectónica de fallas normales e inversas, rellenados por fangolitas y areniscas ricas en material orgánico carbonoso, con intercalaciones de mantos de carbón pertenecientes a los Estratos de Pupunahue-Catamutún, del Oligoceno-Mioceno, que subyace a las fangolitas y areniscas con fósiles marinos de la Formación Santo Domingo, del Mioceno. Estos depocentros se encuentran parcialmente unidos por depósitos del Pleistoceno Medio: morrénicos (gravas y arenas en matriz arenosa fuertemente oxidada) de la Glaciación Río Llico, y glaci-fluviales (arenas, limos y gravas) de la Glaciación Santa María; depósitos del Pleistoceno Superior: fluvioestuarinos (arenas, limos, arcillas y gravas, con fósiles marinos y turba intercalados) del último interglacial, y glaci-fluviales (gravas y arenas) de la Glaciación Llanquihue; y depósitos del Pleistoceno y/o Holoceno fluviales y de playa, con gravas y arenas. (McDonough, et al, 1998).

3.4.2 Estratigrafía de la zona de estudio

A continuación se incluye la estratigrafía de la cuenca de Río Bueno.

3.4.2.1 Rocas Fundamentales

En general, la cuenca del río Bueno abarca una amplia zona de la Región de los Lagos, desde la Cordillera de los Andes a la Cordillera de la Costa. Las unidades geológicas de rocas fundamentales se encuentran ubicadas en estos dos extremos de la cuenca, oriental y occidental, mientras que en el sector central, correspondiente a la Depresión Intermedia, se observan predominantemente unidades sedimentarias.

3.4.2.2 Cordillera de los Andes

De acuerdo con SERNAGEOMIN (2002), la Cordillera de los Andes en el sector de la cuenca del río Bueno está formada en superficie por diversas unidades de rocas fundamentales correspondientes a los períodos Carbonífero-Pérmico, Jurásico, Cretácico Inferior, Oligoceno-Mioceno, Mioceno, Mioceno-Plioceno, Plioceno-Pleistoceno, Pleistoceno y Cuaternario.

Considerando su edad, las formaciones de rocas fundamentales son las siguientes:

- CPg: las rocas más antiguas que han sido observadas en esta zona corresponden al Batolito Panguipulli-Riñihue, del Carbonífero-Pérmico, de unos 328 a 235 millones de años, ubicado al Norte de Lago Ranco, y formado por granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de moscovita.
- Jsg: el Plutón Panguipulli, del Jurásico Medio-Superior, con edad entre 180 y 142 millones de años, en una pequeña zona ubicada al noreste del lago Ranco, formado por monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda.
- Kig: granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita existentes en algunos sectores ubicados al Norte del lago Todos los Santos. Estas rocas corresponden al Cretácico Inferior, con una edad de 144 a 90 millones de años.
- OM2c: secuencias volcanosedimentarias del Oligoceno-Mioceno: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas, en zonas reducidas al este del lago Ranco.
- Mg: desde el punto de vista del área cubierta, se trata de la formación más extensa en la zona andina de la cuenca del río Bueno, cubriendo gran parte de la cordillera de los Andes, excepto frente a los lagos Puyehue y Rupanco. Corresponde al Mioceno (18 a 6 millones de años de edad) y está formada por granodioritas, dioritas y tonalitas.
- MP2: una pequeña formación ubicada al Sur del lago Ranco corresponde al Mioceno Superior-Plioceno, conformada por secuencias volcanosedimentarias: conglomerados, lavas andesíticas, domos y tobas.
- PPI3: Formación Malleco, que se evidencia en una zona relativamente amplia entre los lagos Rupanco y Llanquihue, del período Plioceno-Pleistoceno. Está conformada por

secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados.

- PI3t: depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso, del Pleistoceno, ubicados en una zona amplia de la precordillera andina y la Depresión Intermedia entre los lagos Puyehue y Ranco.
- PI3: secuencias lávicas y centros volcánicos básicos e intermedios, además de depósitos piroclásticos andesítico-basálticos, del Pleistoceno, ubicados en una extensa zona de la Cordillera de los Andes, entre los lagos Ranco y Rupanco.
- Q3i: estratovolcanes y complejos volcánicos del Cuaternario: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos, principalmente calcoalcalinos. Estas rocas se encuentran a lo largo de todo el sector andino de la cuenca del río Bueno.

3.4.2.3 Cordillera de la Costa

En la cordillera de la costa se observan unidades de rocas más antiguas que en el sector andino. En efecto, a lo largo de la costa de las provincias de Ranco, Osorno y Llanquihue existen extensos afloramientos de rocas paleozoicas correspondientes al basamento metamórfico.

Sin embargo, en la vertiente oriental de esa cadena montañosa, que corresponde al límite Oeste de la cuenca del río Bueno, existen cuatro unidades principales, que corresponden a rocas del Paleozoico, Pleistoceno, Mioceno y Oligoceno-Mioceno.

Ordenadas cronológicamente, las unidades señaladas son:

- PzTr4(a): *Complejo Metamórfico Bahía Mansa*, formado por metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico. Esquistos pécticos. Esta unidad cubre la vertiente occidental de la cordillera de la costa, que coincide con la cuenca del río Bueno sólo en el curso final del cauce, de unos 25 km de longitud, entre Mashue y la desembocadura, y algunos sectores de escasa magnitud cerca de la ciudad de La Unión.

- PI3t: depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso, del Pleistoceno, ubicados en una pequeña zona de la cordillera de la costa, próxima a la ciudad de La Unión.

- M1m: secuencias sedimentarias marinas transgresivas de plataforma: areniscas finas, arcillolitas y limolitas asociadas a la Formación Cholchol, del Mioceno. Corresponde a la unidad más extensa en esta zona de la cuenca del río Bueno, ocupando la vertiente oriental de la cordillera de la costa.

- OM1c: *Estratos de Parga*, formados por secuencias sedimentarias continentales parálicas o aluviales del Oligoceno-Mioceno; conglomerados, areniscas, lutitas, calizas y mantos de carbón. Se observan en un sector reducido del extremo sudoccidental de la cuenca del río Bueno, próximo a Parga.

Por otro lado, en el estudio del SERNAGEOMIN de 2002 que abarcó una parte reducida de la cuenca del río Bueno, específicamente un sector rectangular de unos 55 km por 45 km centrado en la ciudad de Osorno, es decir, en la Depresión Intermedia, sólo identificó rocas sedimentarias de la formación Santo Domingo, que constituye una unidad sedimentaria continental-marina de edad correspondiente al Mioceno inferior a medio, en la cuesta homónima en la provincia de Valdivia, donde aflora extensamente y se encuentra su localidad tipo.

En el área de ese estudio, la formación está expuesta en la zona al occidente de La Unión y Trumao, en ambas riberas del río Bueno. Los estratos tienen una disposición subhorizontal, o están inclinados con una dirección de manto preferencial al NW, con ángulos que varían entre 10° y 30°.

En la cuenca de Osorno-Llanquihue, la Formación Santo Domingo tiene su mayor espesor registrado en un pozo de Los Muermos, fuera de la cuenca del río Bueno, en el cual se registraron más de 2.000 m de rocas marinas neógenas. En el área de la cuenca del río Bueno se exponen conglomerados finos, areniscas conglomeráticas, areniscas y fangolitas fosilíferas, de colores gris claro a gris oscuro, parduzco en algunos sectores debido a la intensa meteorización. En general, las rocas están intensamente fracturadas y con características meteorización esferoidal. Los clastos, líticos y cuarzo, son principalmente metamórficos.

3.4.2.4 Depósitos Sedimentarios No Consolidados

De acuerdo con lo observado en el Mapa Geológico de 2002, la Depresión Intermedia presenta una amplia cobertura de rellenos sedimentarios correspondientes al Pleistoceno-Holoceno, que abarcan la cuenca del río Bueno en un ancho medio de unos 60 km desde las estribaciones orientales de la cordillera de la costa hasta las primeras formaciones rocosas andinas.

Estos rellenos corresponden a depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. Se trata de lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales, abanicos fluvio-glaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue (Q1g1, de 35.000 a 14.200 años de edad), Santa María (Q1g2, de 262.000 a 132.000 años de edad), Río Llico (Q1g3, de 480.000 a 338.000 años de edad) o Caracol (Q1g4, de 687.000 a 512.000 años de edad).

Sin embargo, esta secuencia de rellenos cuaternarios se ve interrumpida, en superficie, en la Depresión Intermedia, por extensas áreas de depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso, del Pleistoceno. Estos sectores se ubican en el sector occidental de la Depresión Intermedia, en torno a Osorno, entre las ciudades de Río Bueno y Río Negro.

Por otro lado, entre Quilacahuín y Futahuente, al pie de la Cordillera Nevada o Cordón de Cauile, esta unidad interrumpe, en superficie, la continuidad de los rellenos cuaternarios, con excepción de las zonas aledañas a los cursos de los ríos Bueno, Chirre, Pilmaiquén, Damas y Negro.

Por otro lado, en la zona de la Depresión Intermedia en los alrededores de Osorno, se puede subclasificar los rellenos sedimentarios en siete unidades, que se detallan a continuación.

- Depósitos Fluviales del Holoceno (Hf): depósitos compuestos de gravas, ripios y arenas que ocupan los lechos, barras y las terrazas más bajas de cursos fluviales activos, como los ríos Rahue, Pilmaiquén, Bueno y Llolelhue. Los depósitos son clastosoportados, moderadamente seleccionados y en parte imbricados, en una matriz arenosa en ocasiones ausente. Los clastos se presentan subredondeados a bien redondeados, en su mayoría, frescos. En sectores donde el torrente es de escasa

energía, los bancos de los ríos, periódicamente inundados, se constituyen de arenas y limos. Características son las terrazas del río Bueno a la altura de Trumao y hacia el poniente. En algunos sectores, los bancos de arenas y limos interdigitan con las gravas, evidenciando cambios repentinos en la capacidad de transporte del caudal. En general, representan depósitos que se han formado muy recientemente o durante el presente, a través de reiterativas inundaciones.

- Depósitos Fluviales del Pleistoceno al Holoceno (PIHf): depósitos inconsolidados compuestos de ripios, gravas y arenas moderadamente a bien seleccionadas, bien redondeadas y en parte imbricadas, con matriz de arenas gruesas y medias. Tienen estructuras de estratificación plana horizontal, cruzada y granodecreciente. Corresponden a depósitos no consolidados de cursos fluviales actuales que generalmente forman terrazas de 1 a 15 m de alto por sobre el lecho que actualmente ocupa la corriente de agua, como en los ríos Pilmaiquén, Rahue y Negro. La mayoría de los clastos están frescos y duros y provienen, principalmente, del retrabajo de depósitos glacifluviales (Plgf1). Suelos entre 10 a 50 cm se han desarrollado encima de estos depósitos, a partir de limos superiores en las zonas más occidentales, y de probable origen piroclástico en sectores más orientales. El menor espesor de suelo y la relación morfoestratigráfica con los depósitos glaciales y glacifluviales de la Glaciación Llanquihue indican que los depósitos fluviales se han formado después del último retiro de los glaciares asignados a la Glaciación Llanquihue.

- Depósitos Glacifluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1): estos depósitos conforman extensas llanuras en el margen oriental del área, hacia el occidente se encuentran cada vez más encauzados, controlados por el relieve y asociados a los actuales cauces de los ríos Rahue, Damas, Pilmaiquén, Bueno y Llollelhue, en los que conforman terrazas de entre 5 a 40 m. La morfología está caracterizada por una red de drenaje joven, con un sistema de antiguos canales, activos y abandonados que representan antiguas corrientes de desagüe que provienen de los lóbulos glaciares Puyehue y Rupanco. Comprenden gravas y ripios moderadamente a bien seleccionados, subredondeados a redondeados, clastosoportadas, con bajo porcentaje de matriz arenosa y que en sectores constituyen depósitos de hasta 20 m de espesor. Por lo general con buena estratificación plana horizontal, granodecreciente y localmente cruzada, aunque en los sectores más orientales se muestran más macizos. Generalmente están interestratificadas con lentes o estratos de arena exhibiendo

estratificación plana horizontal y cruzada, o con estructuras de paleocanales. La mayoría de los clastos son duros y sin cáscaras de alteración, excepto algunos de granitos que son blandos y posiblemente representan un retrabajo de sedimentos más antiguos. Estos depósitos representan materiales transportados por flujos de desagüe muy dinámicos, caracterizados por bruscos cambios en la capacidad de carga y canales que migran rápidamente. La continuidad de las llanuras y depósitos con las morrenas, y la ausencia de alteración los clastos glacifluviales permiten correlacionar a estos depósitos con la Glaciación Llanquihue.

- Secuencia piroclástica-epiclástica San Pablo (Plsp): los depósitos piroclásticos-epiclásticos incluidos en la Secuencia volcano-sedimentaria San Pablo, comprenden flujos piroclásticos subaéreos y subacuáticos, depósitos lacustres y, localmente, depósitos de retrabajo fluvial. Básicamente, los materiales piroclásticos corresponden a cenizas y lapilli compuestos por fragmentos líticos y escoriáceos, pómez, cristales y vidrio mientras que los epiclastos son grava, gravilla y arena. Los máximos espesores observados en estos depósitos se aproximan a 50 m. Según las características y apariencia local de los depósitos se han distinguido tres tipos principales: (a) masivo, sedimentos muy homogéneos y bien consolidados, con una matriz arenosa y con poca o ninguna estratificación interna y sin lentes de arcillas o limos. Contiene clastos angulares de aproximadamente 1-3 cm, epiclastos redondeados de hasta 5 cm y, en lugares, bolones totalmente meteorizados de 1 a 3 m de diámetro; (b) estratificado, con gran variedad de estratos o lentes internos distinguibles, compuestos de arcillas, arenas finas, limos y con grietas de relleno sedimentario. Contiene clastos angulares (< 1 cm), epiclastos redondeados y bloques y bolones meteorizados con estratificación o laminación; (c) fino, compuesto por sedimentos poco consolidados de limos, arcillas y, en menor proporción, arenas gruesas angulosas, con abundantes epiclastos (< 5 cm) y, localmente, laminaciones de arcillas gris clara con pómez de tamaños inferiores a 1 cm. La secuencia San Pablo culmina con un notable depósito de flujo piroclástico, moderadamente a muy consolidado, con facies subacuáticos y facies distales fluviales locales.
- Depósitos Glacifluviales de la Glaciación Santa María (Plgf2): las exposiciones de estos depósitos son raras e incluyen ripios, gravas y arenas clastosoportadas, moderadamente a bien seleccionadas, con evidencias de oxidación, lo que les confiere un color amarillo anaranjado. Los clastos están subredondeados a bien redondeados,

en escasa matriz arenosa. Las gravas muestran buena estratificación plana horizontal, granodecreciente, y generalmente están interestratificadas con canales y lentes de arenas que manifiestan estratificación plana horizontal y cruzada. En la zona sudoeste del área se exponen 5 m de espesor de estos depósitos, corresponden principalmente a arenas con escasos niveles de gravas y gravillas y parcialmente cementados, los que se interpretan como depósitos glaciales distales. Muestran una meteorización restringida a los horizontes superiores, de hasta 1 m de profundidad y depositación de óxidos de manganeso en la matriz y en la superficie de algunos clastos. Generalmente estos depósitos están cubiertos por un espesor de 1 a 3 m de suelo y por las características sedimentológicas, grado de alteración y continuidad de las morrenas de Glaciación Santa María, se asigna estos depósitos glaciales al mismo ciclo glacial.

- Depósitos morrénicos y glaciales de la Glaciación Santa María (Plm2): estos depósitos forman un ancho cordón morrénico fragmentado, al Oeste de las morrenas asignadas a la Glaciación Llanquihue. En el área sólo se presentan al noroeste, conformado un pequeño lomaje. Exposiciones en las morrenas revelan un till duro y compacto, con clastos predominantemente duros, generalmente menos del 10% tienen cáscaras de meteorización de 2 a 6 mm de espesor. Los depósitos se presentan en una matriz y mal seleccionados. La matriz, por lo general, está oxidada, compacta, semicementada y compuesta de limos y arenas finas de colores gris pardo. La mayoría de los clastos son gravas y bolones, predominantemente subredondeados a redondeados. Un suelo de espesor de alrededor de 1 m se ha desarrollado sobre el till, con niveles de diferente coloración que se pueden deber a distintos eventos piroclásticos.
- Depósitos morrénicos y glaciales de la Glaciación Río Llico (Plm3): estos depósitos se encuentran al Oeste de Osorno, formando lomajes y cordones de hasta 200 m.s.n.m., aproximadamente, y 1 a 8 km de ancho, que sobresalen de los relieves más bajos conformados por depósitos de la Secuencia piroclástica-epiclástica San Pablo. Se extienden hacia el Sur del río Bueno, desde el Alto Quilmahue hasta el río Rahue, donde el cordón está disectado por éste. Hacia el Sur el cordón reaparece en la zona de Munirrumo, al Oeste de la ciudad de Osorno, y se extiende hasta el límite Suroeste del mapa. Corresponden a depósitos masivos, insertos en una matriz, mal seleccionados y sin estratificación interna, de ripios y gravas con matriz de limos y arcillas. Los clastos, de coloraciones rojiza, amarillenta y anaranjada, presentan cáscaras de alteración de 3 a 8 mm que se desprenden sucesivamente. Alrededor del

30% tienen consistencia blanda, pudiendo ser cortados con un cuchillo. Sólo alrededor del 10% aparecen moderadamente meteorizados. La matriz presenta un color pardo oscuro rojizo.

- Depósitos morrénicos y glaciales de la Glaciación Caracol (Tegualda, Plm4): los depósitos asignados a la Glaciación Tegualda afloran en un sector al Sur del río Bueno, conocido como Alto Quilmahue. Las exposiciones se encuentran ubicadas más al occidente y a mayor cota que los depósitos asignados a la Glaciación Río Llico, que no alcanzan a cubrirlos. Son depósitos masivos, con una matriz muy alterada que presenta generalmente colores pardos y grises, y que se compone probablemente de arcillas secundarias. Los clastos, ripios y gravas y en menor proporción bolones, son subangulosos a subredondeados, de colores rojos, anaranjados y grises, y texturas altamente obliteradas. La mayoría son blandos y deleznales, con cáscaras de 6 a 8 mm, y sólo en algunos de ellos, de grano fino, se conservan núcleos duros. Las exposiciones presentan, normalmente, coberturas de suelo residual de más de 2 m.

Por otro lado, debe señalarse que en el estudio realizado por Enap en 1983 se determinó que la cuenca geológica de Osorno - Llanquihue presenta una notoria profundización del basamento rocoso, alcanzando los rellenos del Cuaternario más de 1.000 m de espesor en la zona próxima a Puerto Montt, y de unos 500 m de espesor hacia el sector sudoccidental de la cuenca hidrográfica del río Bueno (sector Fresia). En ese mismo estudio se determinó, además, que en el sector central de la cuenca del río Bueno, en las proximidades de Osorno, los rellenos cuaternarios alcanzan espesores de 600 m. Estos datos se verán confirmados con los resultados de las prospecciones geofísicas que se efectuaron expresamente para el presente estudio.

3.4.3 Columna estratigráfica

ERA	SIST.	Secuencias Sedimentarias	Secuencias Volcanosedimentarias	Secuencias volcánicas	Rocas Intrusivas
		CENOZOICO	<p>Quaternario</p> <p>Qm Pleistoceno-Holoceno Depósitos litorales: arenas y gravas de playas actuales.</p> <p>Q1 Pleistoceno-Holoceno Depósitos aluviales, ooluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.</p> <p>Qf Pleistoceno-Holoceno Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas, subactuales y llanuras de inundación.</p> <p>Q1g Pleistoceno-Holoceno Depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glaciolacustres; diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. En la Cordillera Principal, regiones I a IV. En la Depresión Central, regiones IX y X; en regiones XI y XII: lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales, abanicos fluvioglaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue (1; 35-14,2 ka); Santa María (2; 262-132 ka); Río Llico (3; 480-338 ka) o Caracol (4; 687-512 ka).</p> <p>P11m Pleistoceno Secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas; coquinas, conglomerados coquínaceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos.</p> <p>M1m Mioceno Secuencias sedimentarias marinas transgresivas platformales; areniscas finas, arcillolitas y limolitas.</p>	<p>OM2c Oligoceno-Mioceno Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epilásticas y piroclásticas.</p> <p>MP2 Mioceno Superior-Plioceno Secuencias volcanosedimentarias: conglomerados lavas, andesíticas, domos y tobas.</p>	<p>Q3i Cuaternario Estratovolcánicos y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos; principalmente calcoalcalinos. holocenos en la Cordillera Principal, regiones Metropolitana a X; volcanes San José, Peteroa, Antuco, Llaima, Villarrica, Osorno y Calbuco.</p> <p>PI3 Pleistoceno Secuencias lávicas y centros volcánicos básicos a intermedios; depósitos piroclásticos andesítico-basálticos.</p> <p>PI3t Pleistoceno Depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. En la Depresión Central y valles de la Cordillera Principal</p> <p>PPI3 Plioceno-Pleistoceno Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados; lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados.</p> <p>M3i Mioceno Inferior-Medio Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas.</p>
	Neógeno				

Paleozoico	Triásico	Jurásico	Cretácico	Paleógeno														
									Mesozoico								<p>Kiag Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo (123-85 Ma) Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita.</p> <p>Jsg Jurásico Medio-Superior (180-142 Ma) Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. Cordillera Principal, regiones X y XI: Pluton Panguipulli y borde oriental del Batolito Norpatagónico.</p>	
																		<p>CPg Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma) Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita, región X Batolito Panguipulli-Rifihue</p> <p>Rocas Metamórficas:</p> <p>DC4 Devónico-Carbonífero Metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de 'mélange'.</p>

3.4.4 Geología estructural

Los controles estructurales son homólogos entre la región de los Ríos y la de Los Lagos hasta los 41°S. La zona de Falla Liquiñe-Ofqui en el sector cordillerano es la más importante del área. En ese lugar aparece bien expuesta al E de Liquiñe y hacia el S. Esta estructura regional, de rumbo general variable entre N-S y N20°E, afecta claramente a las unidades litológicas pre-Triásico Superior.

Las trazas principales de desplazamiento del Sistema de Falla de Liquiñe-Ofqui han controlado la localización de algunos de los centros del frente volcánico Plio-Cuaternario. Los volcanes activos Mocho-Choshuenco, caldera Puyehue, Casablanca y el erodado volcán Quinchilca, se ubica a lo largo de las trazas principales. A las trazas principales se asocian, en el Holoceno, fallas extensionales de orientación NW y fallas compresionales de dirección NE relacionadas con movimientos transcurrentes. Dichas trazas principales manifiestan, también durante el Plioceno-Cuaternario, un componente extensional, evidenciado por la existencia de cuencas neotectónicas de orientación aproximada N-S, que constituirían el límite oriental de la Depresión Central.

Por otra parte, la formación y el Batolito Panguipulli aflora exclusivamente al W de la falla mientras que el complejo Igneo-Metamórfico de la Cordillera de los Andes lo hace exclusivamente al este de ella.

De acuerdo a análisis de imagen de radar (realizado por el Sernageomin) en la Cordillera de la Costa, se corrobora la existencia de importantes lineamientos de rumbo NW que coinciden con trazas de fallas extensionales, de las cuales las orientales limitan, por el W la distribución de las secuencias sedimentarias continentales marinas del Terciario, representadas en la Depresión Central por las cuencas Osorno-Llanquihue, constituyendo el contacto actual entre ellas y el basamento metamórfico. En conjunto, un sistema extensional de rumbo NE y otro transcurrente de dirección NW, habrían controlado la localización de los depocentros de las cuencas terciarias y la ubicación de cuencas neotectónicas en el borde occidental de la Depresión Central. El sistema transcurrente se interpreta como un sistema estructural antiguo, penetrativo y regional, que ha afectado tempranamente al protolito de las rocas del basamento metamórfico, posiblemente en el Paleozoico superior- Triásico y que ha tenido reactivaciones, al menos durante el Terciario y Cuaternario (SERNAGEOMIN, 1997).

3.5 INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA

3.5.1 Estratigrafía geoelectrica de los sedimentos (TEM)

De acuerdo a la información general de la geología superficial y de la correlación entre la resistividad y los parámetros que la afectan en este tipo de ambiente (principalmente la granulometría, el contenido de arcillas y el tipo de fluidos) se puede establecer de manera tentativa una clasificación de unidades según la resistividad (Tabla 3-4).

De acuerdo a la tabla presentada, se observan dos unidades geoelectricas favorables como potenciales acuíferos (o contenedores de capas acuíferas) en el área de estudio, estimándose de manera preliminar que la unidad de 7 a 40 ohm-m es de menor permeabilidad que el estrato de 40 a 100 ohm-m, por un mayor contenido de finos.

Tabla 3-4. Unidades geoelectricas de la cuenca.

Resistividad [ohm-m]	Descripción de la unidad geoelectrica
100-750	Cubierta y Depósitos Cuaternarios de granulometría gruesa.
40-100	Cubierta y Depósitos Cuaternarios de granulometría media (potencial acuífero primario).
7-40	Cubierta y Depósitos Cuaternarios de granulometría fina (potencial acuífero secundario).
2-6	Depósitos Cuaternarios Arcillosos (unidad de baja permeabilidad).
11-22	Sedimentos Terciarios Finos
60-300	Sedimentos Terciarios Compactos.
750-1650	Roca Basal Metamórfica (unidad impermeable).

Del análisis e interpretación de los sondeos TEM, se observa una regular a baja discriminación de estratos, debido al poco contraste de resistividad que ofrecen las capas que conforman la secuencia sedimentaria. Esto implica que dentro de un estrato geoelectrico pueden existir capas más delgadas, algunas de las cuales podrían ser potenciales acuíferos. Por otra parte, considerando el total de los TEM, se logra una diferenciación general de 4 estratos para la cubierta y depósitos cuaternarios, y de dos estratos para los sedimentos terciarios.

3.5.2 Morfología y profundidad del basamento

Línea 1

El basamento aumenta progresivamente su profundidad desde la estaca 40 hacia el sur, hasta valores que sobrepasan los 2 km, y quedando abierta una gran cuenca. El TEM 12, situado aproximadamente entre las estacas 43 y 44, se localiza en un alto del basamento, y muestra el estrato superior (hasta alrededor de 121 m de profundidad) como favorable a la contención de capas acuíferas. Desde alrededor de las estacas 45 hasta la 79 se tiene una cuenca de relieve variable y una profundidad máxima de unos 600 m, en las estacas 66-67. Desde la estaca 81 a la 112 se observa otra cuenca, con mayor variación del relieve que la anterior, también con una profundidad máxima del orden de los 600 m en las estacas 96-97. El TEM 18, aproximadamente entre las estacas 83 y 84, muestra dos estratos geoelectrónicos (hasta unos 180 m de profundidad) favorables a la contención de capas acuíferas. Hacia el extremo norte, la línea se acerca a cerros que podrían formar parte del basamento y, por lo tanto, la interface sedimentos-basamento tiende a ser somera.

Línea 2

En esta línea ninguno de los dos TEM (4 y 5) alcanzó a detectar basamento, por lo que como puntos de control se usaron la profundidad en el cruce con la línea 1 y el hecho que el extremo Este del perfil se acerca a cerros –posible basamento- y entonces la interface sedimentos basamento- debe tender a ser somera. Esta línea permite apreciar varias subcuencas. Desde la estaca 16 al Oeste se observa una cuenca abierta a profundidades de 1200 m, con un alto relativo en las estacas 11-12. Entre las estacas 16 y 42 se tiene otra cuenca cuya máxima profundidad de alrededor de 800 m se alcanza en las estacas 31-32. Entre las estacas 42 y 64 se observa una gran depresión, que alcanza una profundidad del orden de 2000 m bajo las estacas 54-56. Finalmente, desde la estaca 64 al Este se tiene un relieve que desciende rápidamente hasta unos 700 m en la estaca 66-67 y luego asciende con algunos altibajos hasta el extremo en la estaca 75.

Línea 3

Para esta línea se usaron como puntos de control los TEM 16 y 1, además de la profundidad dada por el cruce con la línea 1 y el acercamiento a cerros en el extremo Este. Desde la estaca 1 a la 27 se aprecia una cuenca de unos 1200 m de profundidad alrededor de la estaca 15. El TEM 16 muestra tres estratos poco favorables a la

contención de capas acuíferas, dadas la alta resistividad de la cubierta y la baja resistividad de los estratos subyacentes. Entre las estacas 27 y 46 se distingue una suave cuenca. Luego, desde la estaca 46 a la 67 se observa una depresión un poco mayor, con un paleocauce más profundo de alrededor de 900 m en las estacas 59-60. Finalmente, desde la estaca 67 al E se tiene un relieve muy variable que en promedio va siendo cada vez más somero a medida que se acerca a cerros, posible basamento. El TEM 1, cerca de la estaca 70, muestra una cubierta demasiado resistiva como para ser favorable a la contención de capas acuíferas.

3.5.3 Conclusiones de la geofísica

El estudio geofísico de Gravimetría y TEM, de carácter regional, en el sector del estudio Cuenca del Río Bueno, X Región, presenta los siguientes resultados generales:

- Se diferencian 4 estratos geoelectricos que se interpretan como materiales de cubierta y depósitos cuaternarios: 2 que pueden ser potenciales contenedores de capas acuíferas (resistividad 7-40 y 40-100 ohm-m) y otros 2 que serían desfavorables por su resistividad muy alta (100-750 ohm-m) o muy baja (2-6 ohm-m).
- Se aprecian 2 estratos geoelectricos que se interpretan como rocas sedimentarias terciarias, uno de baja resistividad (11-22 ohm-m, posibles arcillolitas), otro de mayor resistividad (60-330 ohm-m, rocas más compactas y posibles materiales volcánicos). Estos 6 estratos definen lo que conforman el estrato superior del modelo gravimétrico, a la que se le atribuye una densidad uniforme.
- Se detectó un substrato denso (asumido 0.8 gr/cc más denso que la capa superior) y resistivo (750-1650 ohm-m), detectado en 4 puntos TEM y definido en cuanto a morfología y profundidad en las 3 líneas gravimétricas como la interface sedimentos-basamento.

3.6 CARATERIZACION HIDROGEOLÓGICA

3.6.1 Contexto hidrogeológico

En la parte alta del río Bueno destaca la existencia de formaciones rocosas de origen volcanosedimentario que consisten principalmente en coladas, brechas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de lutitas, calizas, areniscas y conglomerados de baja permeabilidad que forman el basamento de este sector de la cuenca. Por lo tanto, las infiltraciones de aguas meteóricas escurren por el subsuelo principalmente hasta los cuerpos lacustres Rancho, Maihue, Puyehue, Rupanco y Llanquihue. Las aguas de estos lagos se infiltran a través del material morrénico originando una fuente constante de abastecimiento del acuífero.

En el sector del valle central escurren dos acuíferos: uno en dirección WNW paralelo a los ríos Pilmaiquen y Rahue y el otro lo hace en dirección SSW paralelo al batolito costero hasta juntarse ambos con el acuífero de la cuenca del río Maullín por el sur. El medio por el cual escurre el acuífero es material de relleno o depósitos no consolidados de origen glacial, consistente en morrenas y materiales aluviales de alta permeabilidad.

Destaca el batolito costero como un gran murallón impermeable consistente en rocas metamórficas y sedimentarias del período Paleozoico que provoca la bifurcación antes señalada en los acuíferos. Destaca la baja profundidad del acuífero que se mantiene hasta su desembocadura con profundidades de 2 a 3 metros. En las cercanías de la ciudad de Osorno destaca una extensa área de aguas surgentes entre los ríos Pilmaiquen y Rahue.

En general el conocimiento de las aguas subterráneas no ha tenido un desarrollo relevante, debido principalmente a que las aguas superficiales han sido la fuente que sustenta el desarrollo regional.

Actualmente debido a que la disponibilidad superficial está bastante acotada las aguas subterráneas se constituyen en una fuente de importancia creciente, lo cual insta a avanzar en estudios de evaluación hidrogeológica, medición sistemática de acuíferos y desarrollo de modelación.

3.6.2 Caracterización de las Unidades Hidrogeológicas Acuíferas

La caracterización de Unidades Hidrogeológicas Acuíferas consiste en una revisión de los antecedentes expuestos en el capítulo 3.1.1, realizada en su mayoría a partir de la información técnica de captaciones de agua subterránea de las oficinas de la Dirección

General de Aguas de la Regiones de Los Ríos y Los Lagos, las bases topográficas y del mapa hidrogeológico del SERNAGEOMIN. Así se realizó una interpretación hidrogeológica en base a esta información, a la estratigrafía de pozos y ensayos de bombeo recopilados.

3.6.2.1 Delimitación de Acuíferos

La Depresión Intermedia en el sector de la cuenca del río Bueno está conformada por estratos de sedimentos del Pleistoceno-Holoceno relativo a las unidades geológicas existentes, y a los resultados de las prospecciones geofísicas realizadas.

Los resultados del estudio geofísico existente indican que los rellenos sedimentarios poseen un espesor mínimo de unos 200 m, lo cual se confirma con los antecedentes estratigráficos disponibles (AC Ingenieros Consultores Ltda, 2003).

En base al material analizado se pueden distinguir varios sistemas acuíferos que se describen a continuación.

Acuíferos A2//A1

Formado por un acuífero superior libre (A2) constituido por gravas y arena de los depósitos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y/o fluviales (PIHf, Hf), litorales (Hp), eólicos (Heo) y arenas y limos estuarinos (He), que se disponen sobre un acuífero confinado (//A1) en depósitos del mismo tipo, correspondientes a la Glaciación Santa María (Plgf2).

El acuífero //A1 es confinado por depósitos de cenizas, lapillis, gravas, arenas y arcillas piroclásticos-epiclásticos (Plsp), limos, arcillas y arenas finas glaciolacustres (Plgl2), o localmente por limos, arcillas, arenas finas, gravas y bloques morrénicos (Plm2).

El acuífero A1, a nivel regional, posee transmisividades bajas a media-alta (T: 50 a 400 m²/d), permeabilidades bajas a altas (K: 10⁻⁵ a 10⁻³ m/s), caudales de explotación variables entre 2 y 15 l/s y específicos inferiores a 1,98 (l/s)/m. El espesor de los depósitos saturados con agua es inferior a los 10 m y el nivel estático se encuentra entre 1 y 5 m bajo la superficie del terreno.

Acuíferos A2/A1

Corresponde a los depósitos de gravas y arenas de glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y Santa María (Plgf2), que en su conjunto constituyen un acuífero libre. Se presenta en los márgenes de valles profundos de los ríos principales, como el Pilmaiquén, Negro, Rahue y Blanco y en el sector localizado al noreste de Río Bueno hasta el Lago Raneo, donde los depósitos glaciofluviales (Plgf2) subyacen directamente a depósitos glaciofluviales (Plgfl) y fluviales (PIHf y Hf), los cuales en su conjunto constituyen un acuífero libre con conexión a la red fluvial local. En general, en el sector localizado al noreste de Río Bueno, el nivel freático y la profundidad del agua, se encuentra, entre 10 y 20 m y el espesor saturado en agua supera los 20 m.

Este sistema a nivel regional posee transmisividades bajas a muy altas (T: 50 a 3000 m²/d), permeabilidades bajas a altas (K: 10⁻⁵ a 10⁻³ m/s), caudales de explotación variables entre 1 y 80 l/s y específicos entre 0,11 y 18,75 (l/s)/m.

Acuíferos //B1

Acuífero libre cubierto, semiconfinado o confinado en bloques, gravas y arenas gruesas a finas, con arcilla o arcilla limosa en algunos niveles e intercalaciones de estratos de arcilla limosa pertenecientes a depósitos morrénicos de la Glaciación Llanquihue (Plm1) que se intercalan y gradan lateralmente con gravas y arenas de los depósitos glaciofluviales de la misma glaciación (Plgf 1) y que se distribuye en el sector frontal de los lagos Ranco, Maihue, Puyehue, Rupancho y Llanquihue. En sectores, estos depósitos se encuentran cubiertos por arcillas y limos laminados glaciolacustres (PlgM) y/o limos, arcillas y arenas finas estuarinas (He).

Cuando el acuífero es libre, los niveles estáticos se encuentran entre 28,9 y 74,3 m, si es confinado se registra un nivel de 6 m, y en la situación de semiconfinado los niveles varían entre 10,7 y 71,8 m bajo la superficie del terreno. Regionalmente, posee transmisividades bajas a altas (T: 50 a 1.000 m²/d), caudales de explotación variables entre 1 y 50 l/s y específicos entre 0.85 y 3.14 (l/s)/m. El espesor conocido del acuífero varía entre 4 y 115 m y se sitúa entre los 28,9 y 74,3 m (libre) y entre los 1 y 96 m (semiconfinado y confinado) de profundidad.

Los estratos semiconfinantes se componen principalmente de bloques, gravas, arena fina y arcilla-limo.

Acuíferos //B5

Acuífero confinado en bloques y gravas, en matriz de limo, arcilla y/o arena gruesa a fina, compacta y cementada, con óxidos de Fe y Mn, pertenecientes a depósitos morrénicos de la glaciación Santa María (Plm2) que se intercalan y gradan lateralmente con gravas y arenas de depósitos glaciofluviales de la glaciación Santa María (Plgf2), presentes en forma discontinua al oeste de los lagos Ranco, Maihue, Puyehue, Rupanco y Llanquihue.

Este acuífero que se encuentra cubierto principalmente por arcillas y gravas pertenecientes a los depósitos morrénicos Plm2, posee niveles estáticos entre los 9,9 y 29,0 m bajo la superficie del terreno, transmisividades bajas a alta (T: 100 a 750 m²/d), permeabilidad baja (8×10^{-5} m/s), caudales de explotación variables entre 0,01 y 7 l/s y específicos entre 0,08 y 1,5 (l/s)/m. El espesor del acuífero varía entre 5 y 41 m y se sitúa entre los de 24 y 57 m de profundidad.

3.6.2.2 Límites y geometría de la zona acuífera

La zona acuífera de la cuenca del río Bueno forma un sistema de acuíferos libres y confinados, con una extensión horizontal máxima de 80 km (entre Osorno y San Pablo) medido perpendicularmente al borde costero.

Los sectores confinados (//A1 y A2//A1) aparecen ocupando alrededor de un 50% del acuífero, dispuestas en su mayoría en los bordes E y W del acuífero, quedando libre el sector central y la unión del río Rahue con el río Bueno (Figura 3-17 y Figura 3-18). Se componen principalmente de un acuífero superior libre (A2) constituido por gravas y arena de los depósitos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y/o fluviales (PIHf, Hf), litorales (Hp), eólicos (Heo) y arenas y limos estuarinos (He), que se disponen sobre un acuífero confinado (//A1) en depósitos del mismo tipo, correspondientes a la Glaciación Santa María (Plgf2) y acuífero confinado (//A1) en depósitos del mismo tipo, correspondientes a la Glaciación Santa María (Plgf2).

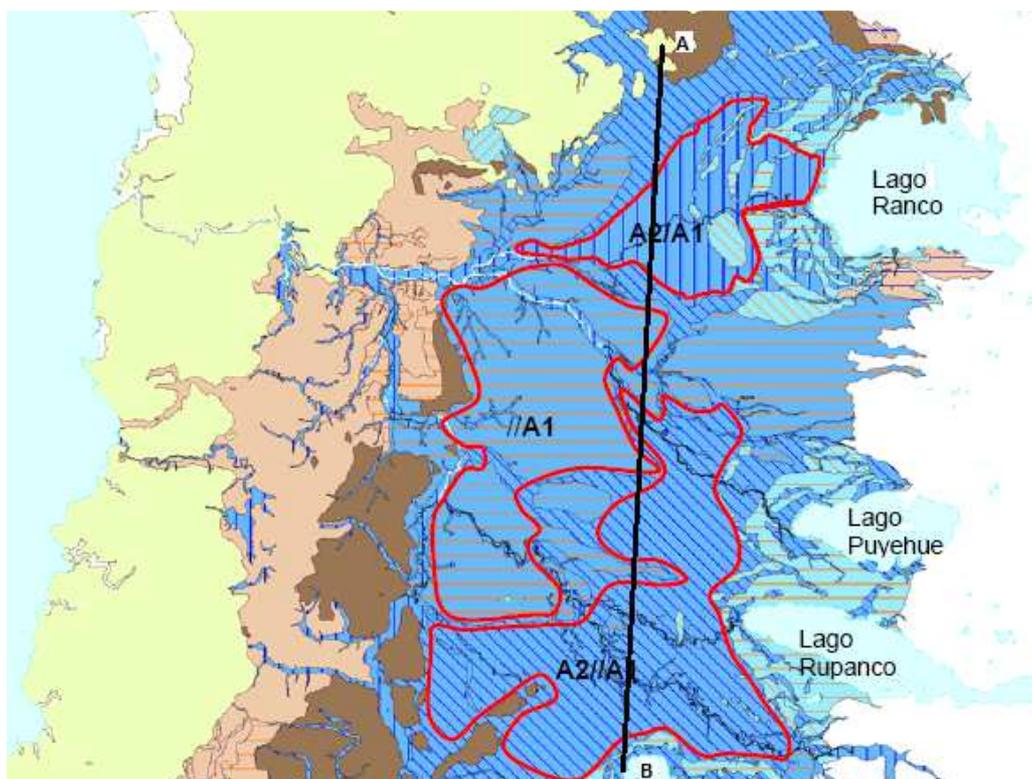


Figura 3-17. Límites de los acuíferos de la cuenca de río Bueno. Fuente: SERNAGEOMIN 2008.

En la zona costera encontramos potentes afloramientos de la Serie W, que compone el basamento del acuífero. Hacia el sur encontramos discordantemente los materiales acuíferos formando sistemas confinados y libres con potencias definidas por el modelado glacial y fluvio-glacial, erosionados actualmente por la red de drenaje actual.

En la zona situada al sur encontramos acuíferos confinados (A2) dispuestos sobre los materiales del Pleistoceno que actúan como confinantes de la serie de depósitos glaciales.

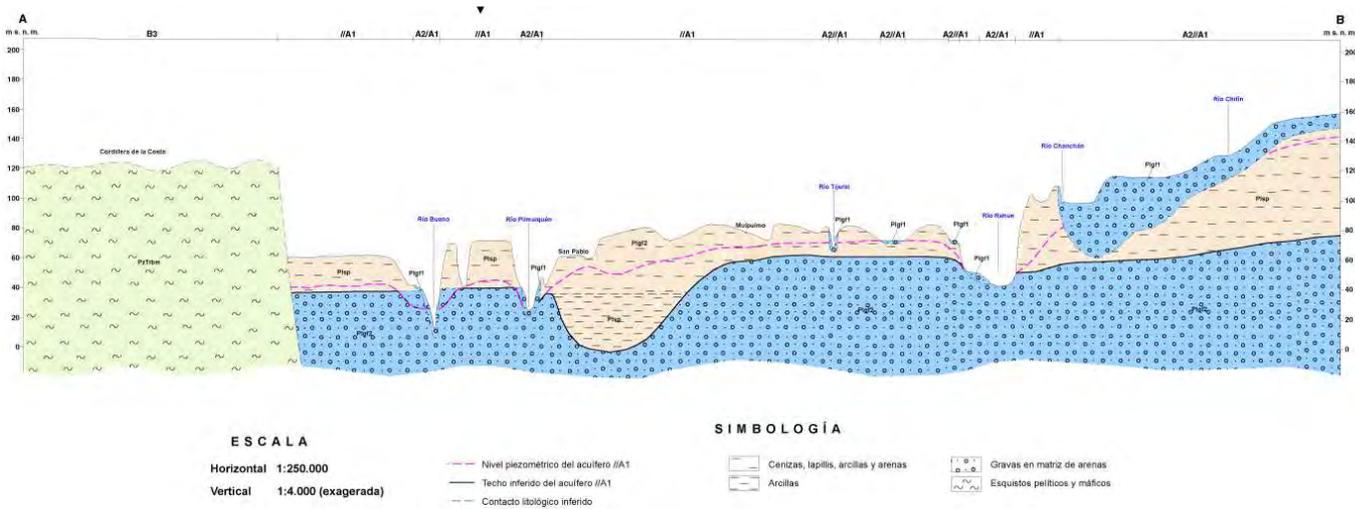


Figura 3-18. Corte hidrogeológico A-B (N-S) de la cuenca de río Bueno (ver Figura 3-17). Fuente: SERNAGEOMIN, 2008.

3.6.3 Parámetros hidráulicos

El análisis de los parámetros hidráulicos se ha realizado a partir de la recopilación de la información hidrogeológica existente, tal como, expedientes y principalmente de estudios hidrogeológicos (Anexo A – Fichas de antecedentes).

3.6.3.1 Conductividad hidráulica (K)

Para el análisis de la conductividad hidráulica se contó con un total de 33 pozos con información relevante (Figura 3-19 y Tabla 3-5). Se consideró que un pozo es representativo de un sector, si su permeabilidad es similar al promedio calculado con los datos de pozos ubicados relativamente cerca.

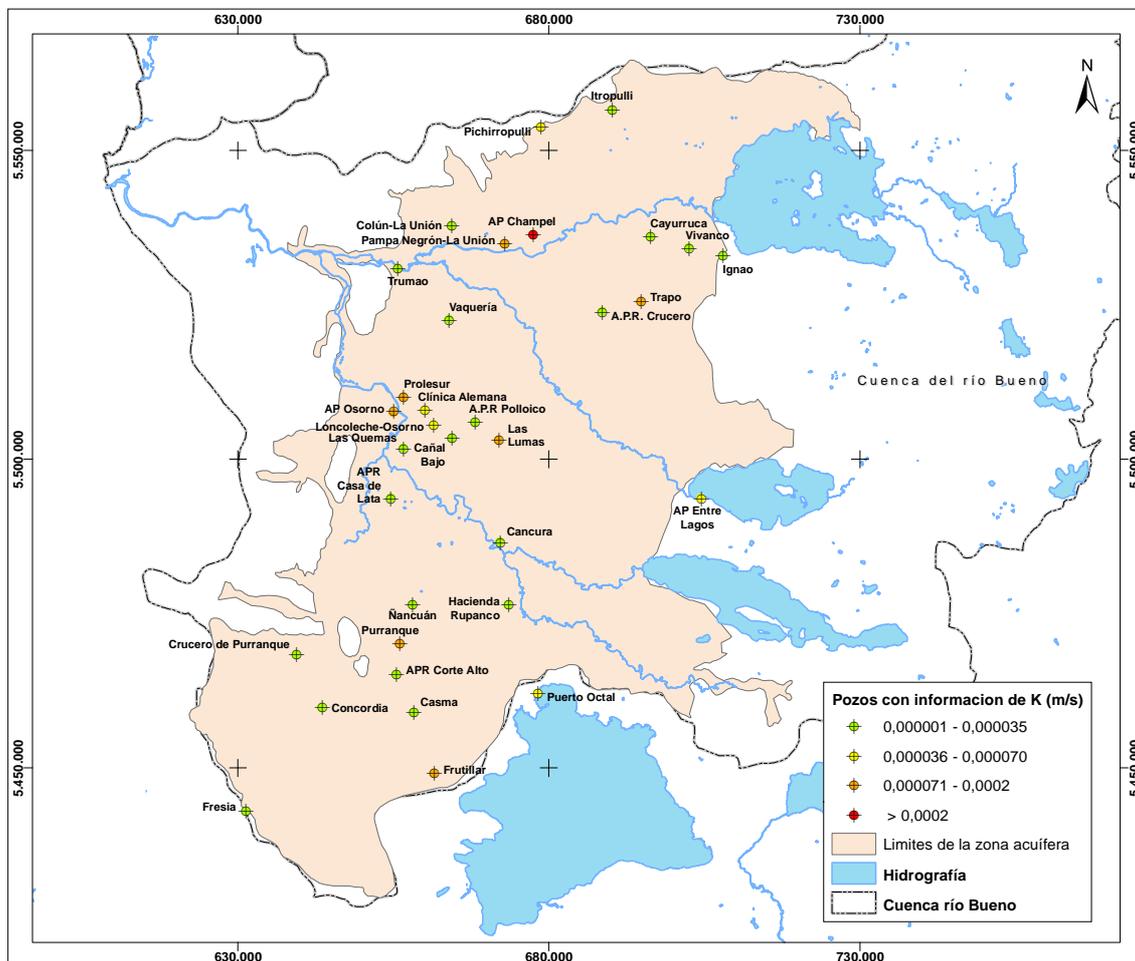


Figura 3-19. Distribución de la permeabilidad (m/s) en el acuífero. Elaboración: Amphos 21.

De los 33 puntos analizados, 30 de ellos (los primeros) presentan valores de K medios (de $1,16 \times 10^{-4}$ a $1,16 \times 10^{-5}$). Los 3 restantes se corresponden a valores de la conductividad hidráulica alta (de $1,16 \times 10^{-3}$ a $1,16 \times 10^{-4}$), siendo estos aquellos situados en Purranque (sur), Frutillar y Champel, distribuidos todos ellos en el margen W del acuífero.

Tabla 3-5. Valores de la conductividad hidráulica (m/s) de la cuenca de río Bueno

Pozo	UTM-N	UTM-E	K (m/s)
Vaquería	5.522.607	663.933	1,31E-06
Hacienda Rupanco	5.476.510	673.478	2,68E-06
Crucero de Purranque	5.468.310	639.430	5,90E-06
Cañal Bajo	5.503.507	664.344	6,56E-06
Casma	5.459.000	658.250	7,12E-06
APR Casa de Lata	5.493.730	654.486	8,62E-06
Ignao	5.532.980	707.880	9,76E-06
Itropulli	5.556.686	690.090	9,87E-06
Concordia	5.459.800	643.550	1,02E-05
Cayurruca	5.536.070	696.260	1,51E-05
Cancura	5.486.550	672.100	1,51E-05
Ñancuán	5.476.500	658.080	1,64E-05
Colún-La Unión	5.537.974	664.287	1,69E-05
Vivanco	5.534.292	702.517	1,78E-05
Fresia	5.443.090	631.250	2,04E-05
APR Corte Alto	5.465.213	655.485	2,84E-05
A.P.R. Crucero	5.523.914	688.530	2,85E-05
Trumao	5.531.000	655.650	2,87E-05
Las Quemadas	5.501.800	656.600	3,06E-05
A.P.R Polloico	5.506.054	668.089	3,23E-05
Pichirropulli	5.553.884	678.606	4,44E-05
Clínica Alemana	5.508.000	660.050	5,19E-05
AP Entre Lagos	5.493.743	704.478	6,02E-05
Puerto Octal	5.462.120	678.180	6,03E-05
Loncoleche-Osorno	5.505.494	661.406	6,98E-05
AP Osorno	5.507.774	655.012	7,09E-05
Prolesur	5.510.021	656.622	7,77E-05
Trapo	5.525.550	694.770	8,44E-05
Las Lumas	5.503.090	671.915	8,59E-05
Pampa Negrón-La Unión	5.534.904	672.866	9,01E-05
Purranque	5.470.200	656.000	1,36E-04
Frutillar	5.449.200	661.500	1,92E-04
AP Champel	5.536.433	677.430	4,35E-04

3.6.3.2 Transmisividades (T)

El base a los datos analizados hasta el momento, procedentes básicamente de la información extraída de los pozos APR y expedientes asociados (Anexo A – Fichas de antecedentes). De los 9 pozos profundos analizados hasta el momento, 6 de ellos

presentan transmisividades bajas (10-100 m²/día), uno de ellos presenta valores medios (100-500 m²/día) y 2 presentan permeabilidades altas. Los mayores valores de transmisividad se disponen en el borde este del acuífero, en el borde del lago Ranco (Localidad de Llifén) y en Río Bueno en la localidad de Trehuaco.

Tabla 3-6. Valores de la transmisividad en la cuenca del río Bueno (Amphos 21)

Transmisividad (m ² /d)	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja	Total analizado
	>1000	1000-500	500-100	100-10	>10	
Río Bueno	0	2	4	0	0	6

3.6.3.3 Coeficiente de almacenamiento (S)

A partir de los antecedentes existentes del análisis de las pruebas de gasto constante disponibles en 16 captaciones del área de interés se han determinado valores para el coeficiente de almacenamiento (S) en el sistema acuífero de la cuenca del río Bueno. Dichos resultados se muestran en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Coeficiente de almacenamiento en diferentes captaciones (Escalona 2004).

Nº	Propietario	S (Coef. Almacenamiento)	Observaciones
1	Parque Industrial Anticura	3,9 x 10 ⁻⁷	En rango de acuífero confinado
2	Agropecuaria Sagalú (Rapanco)	0,06	En rango de acuífero libre
3	Comité de Vivienda Intropulli	0,04	En rango de acuífero libre
4	Fdo. La Masia (Puyehue)	-	No fue posible la determinación
5	Comité APR Felijecho	5,3 x 10 ⁻⁶	En rango de acuífero confinado
6	Fdo. Pufayo	0,16	Valor muy alto
7	Ruta 5 sur s/n	0,02	En rango de acuífero libre
8	Pesquera Mares Australes Ltda.	0,06	En rango de acuífero libre
9	Verónica Cáceres Guajardo	-	No fue posible la determinación
10	Hacienda Rupanco ChanChan	-	No fue posible la determinación
11	APR Casa de Lata	0,05	En rango de acuífero libre
12	Esc. Itropulli - Paillaco	4,4 x 10 ⁻⁵	En rango de acuífero confinado
13	AquaChile SA - Aguas Buenas	5,5 x 10 ⁻⁷	En rango de acuífero confinado
14	María Consuelo Cheyre E.	0,09	En rango de acuífero libre
15	Cristino Nannig Grothe	-	No fue posible la determinación
16	Pilauco s/n Osorno - Ernesto Aubel	0,05	En rango de acuífero libre

Según los resultados presentados en el cuadro anterior y considerando las características de los rellenos existentes en la cuenca del río Bueno, se puede afirmar que el coeficiente de almacenamiento, en general, varía entre 2% y 9%, con mayor tendencia a estar sobre 5%, por lo que se ha adoptado un valor representativo para la cuenca de 7%.

3.6.4 Piezometría y flujos de agua subterránea

A partir de la información de niveles medidos durante la campaña de terreno para el catastro de captaciones del estudio realizado por AC Ingenieros Consultores Ltd., 2003, se trazaron curvas de igual nivel del agua subterránea (equipotenciales), es decir, curvas que representan la superficie piezométrica, correspondiente al periodo enero - abril de 2003 (Anexo G - Hidrogeología).

El flujo subterráneo presenta una dirección E-W en el sector norte de la cuenca de río Bueno, y dirección SE-NW, en el sector sur de ésta. Se observa además, que dichos flujos subterráneos siguen la dirección principal de los escurrimientos superficiales de los ríos Bueno y Rahue (Figura 3-20).

El gradiente hidráulico de la zona acuífera en el sector central de la cuenca, es del orden de un 0,4%. Hacia el sector nororiente el gradiente aumenta considerablemente debido a la mayor pendiente que presenta el terreno en este sector, alcanzando valores del orden de 1,3%.

Finalmente, a partir de las curvas equipotenciales trazadas, es posible mencionar que en el sector de la confluencia de los ríos Bueno y Rahue, el agua subterránea se encuentra a escasa profundidad, hallándose incluso pozos con el nivel estático surgente, debido a que en este sector se observa un estrechamiento del valle que provoca el ascenso de la napa hasta el nivel de terreno.

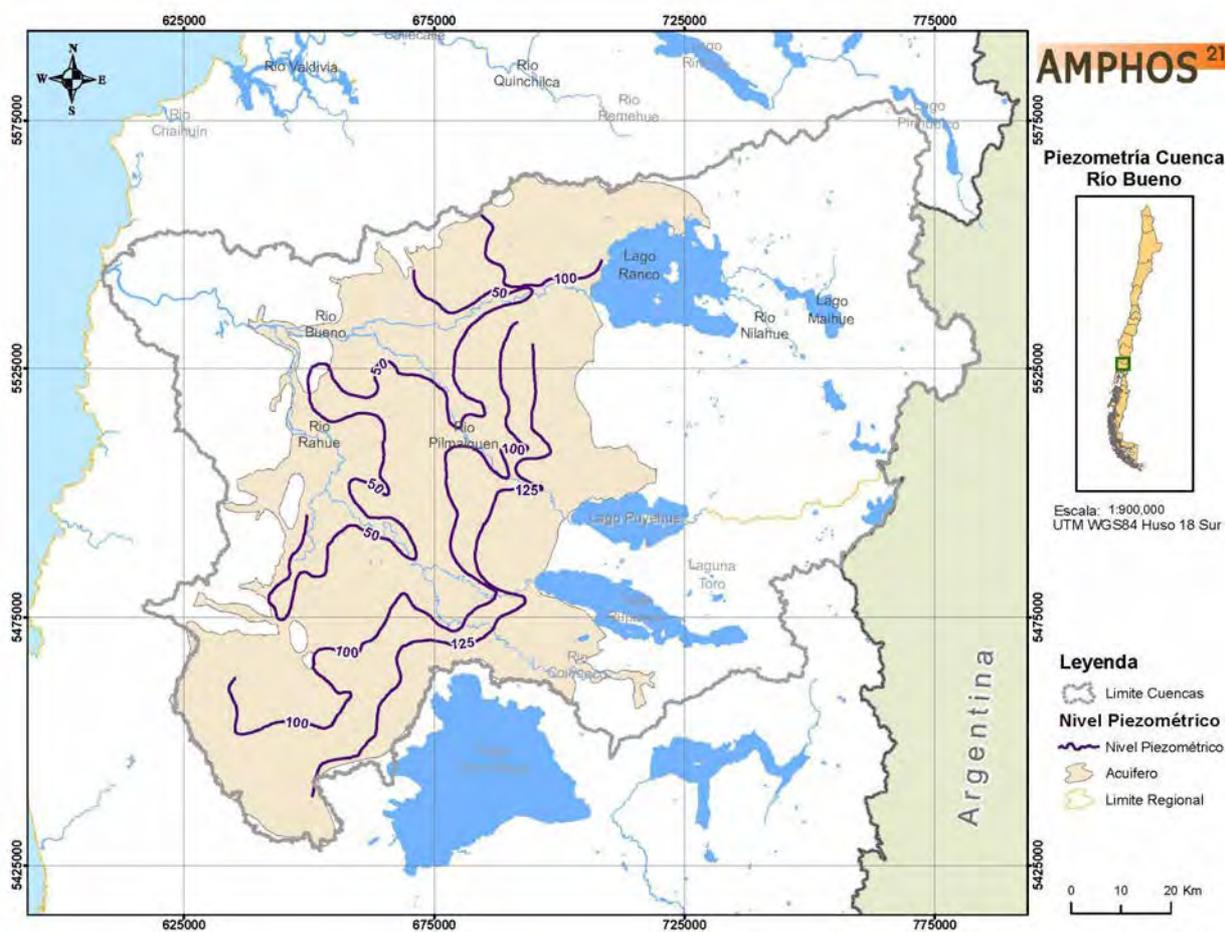


Figura 3-20. Mapa de isopiezas (msnm) en el acuífero de la cuenca de río Bueno. (Amphos 21).

3.6.5 Estimación de la recarga

Uno de los principales mecanismos de recarga en la cuenca del río Bueno corresponde a la infiltración debido a las precipitaciones.

Por ese motivo a partir de la ecuación obtenida en la relación precipitación-elevación (apartado 4.3) se ha calculado la precipitación para los diferentes intervalos hipsométricos (Figura 3-21 y Tabla 3-8) donde se ha determinado que la precipitación anual total en la cuenca corresponde a $1.176 \text{ m}^3/\text{s}$.

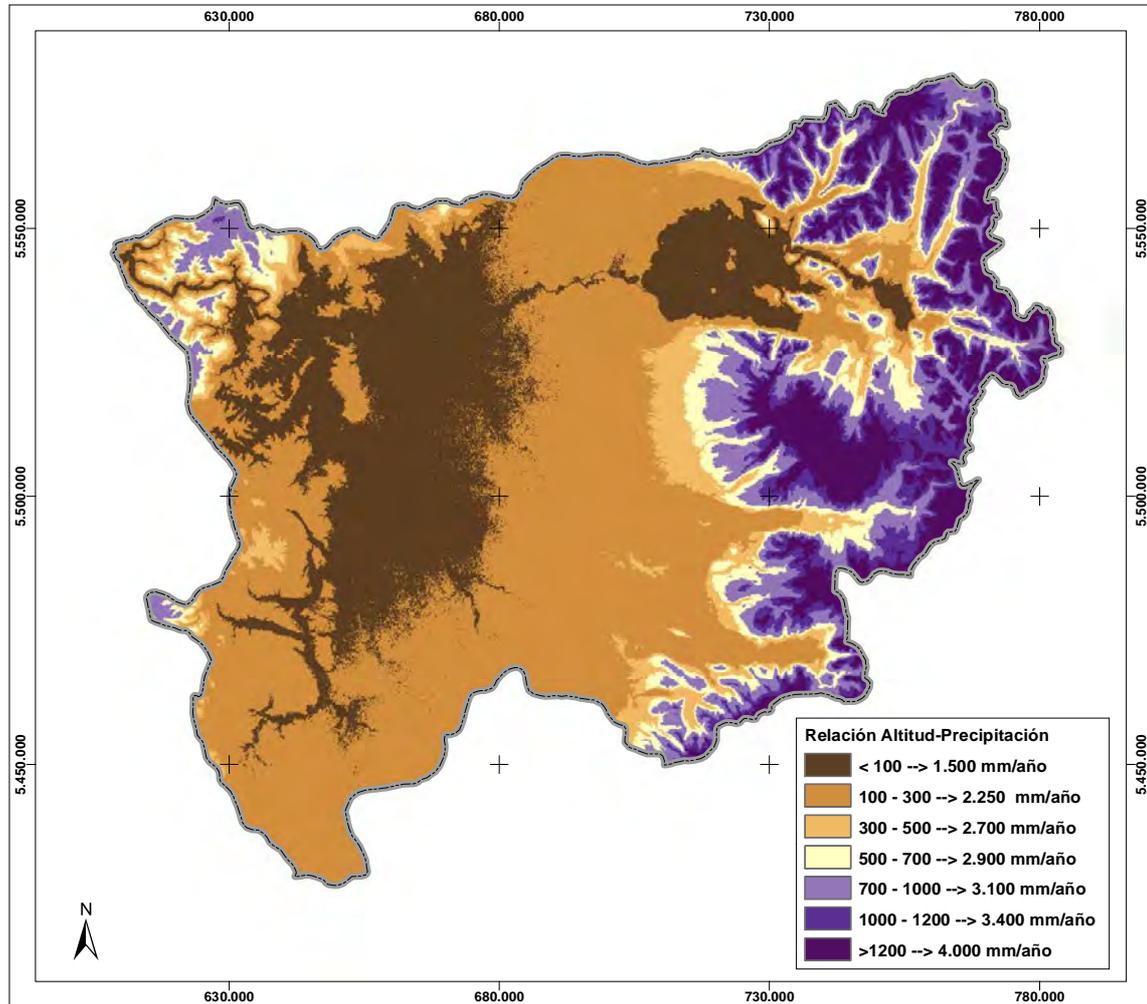


Figura 3-21. Distribución de precipitación (mm/año) en relación con la altitud en la cuenca (Amphos 21).

Tabla 3-8. Estimación de la precipitación a partir de la ecuación altura-precipitación en la cuenca (Amphos 21).

Altura msnm	Área km ²	Precipitación		
		mm /año	m ³ /año	m ³ /s
< 100	3365	1.523	5.125.260.520	163
100-300	6538	2.176	14.227.754.240	451
300-500	1113	2.642	2.939.225.000	93
500-700	925	2.875	2.659.317.500	84
700-1000	1376	3.108	4.275.706.680	136
1000-1200	840	3.341	2.806.740.690	89
>1200	1249	4.040	5.045.838.800	160
Total	15.406	19.705	37.079.843.430	1.176

La magnitud de la infiltración depende entre otros factores, de las características de los suelos. En particular, desde el paralelo 39° Sur, los depósitos eólicos piroclásticos no sólo quedan confinados a las zonas cordilleranas y precordilleranas (como sucede en la zona central) sino que se extienden hacia la depresión intermedia.

En el valle central se encuentran importantes acumulaciones de ceniza. Esta franja se ensancha desde el sector de Loncoche al Sur y se extiende por los suelos de las localidades de La Unión, Río Bueno, y Osorno.

Esta configuración del suelo, provoca que en gran parte de la cuenca del río Bueno, la capa superficial presente importantes cantidades de suelos finos lo que dificulta el proceso de infiltración de excesos de lluvias.

A lo anterior hay que agregar que en algunos sectores de la parte Este del valle central, se han detectado cantidades importantes de óxido de hierro (fierrillo) el que actúa como capa aún más impermeable. Estas zonas corresponden a los denominados suelos ñadis.

Además existen extensas áreas de mal drenaje en las cuales se dificulta la recarga de los acuíferos profundos, producto de la existencia de un estrato superficial de baja permeabilidad y de la baja pendiente del terreno.

Por todo lo anterior, es esperable que la magnitud de la infiltración sea más bien baja en comparación con la precipitación.

En AC Ingenieros Consultores Ltda. 1998, se determinó que el coeficiente de percolación para los suelos se encuentra en el rango de 18% a 27%. Para la zona de río Bueno se estima que el coeficiente debe ser sensiblemente menor debido a tres factores:

- ✓ Existencia de un estrato superficial de muy baja permeabilidad. Este estrato tiene características impermeables o poco permeables (en general formado por ceniza volcánica), y limita superiormente la percolación a los acuíferos.
- ✓ Menor pendiente del terreno. Ante un episodio de precipitación, ayuda a la saturación del estrato superior hasta la zona poco permeable, evitando la percolación al acuífero principal, dado que en esta situación predomina el flujo superficial a través de la red de cauces que drenan la cuenca.
- ✓ Mayor cantidad e intensidad de la lluvia. Esto trae como consecuencia una saturación más rápida del estrato superficial, lo que favorece el escurrimiento superficial y el subsuperficial presente sobre el estrato poco permeable, vale decir limita la incorporación del agua a los acuíferos principales presentes bajo este estrato.

Dado que no existen antecedentes teóricos que permitan determinar con certeza un valor para el coeficiente de percolación, se estima de manera preliminar que este coeficiente debiese variar entre un 5 y un 15% para distintos puntos de la cuenca.

En este punto es importante señalar que la recarga estimada como un 10% de la precipitación es un valor referencial y que se encuentra respaldado por el hecho que la napa se encuentra relativamente superficial en gran parte de la zona de estudio, impidiendo una percolación de mayor magnitud.

3.7 DEFINICION DE COMPONENTES DEL MODELO

Acorde con el trabajo realizado en la Etapa 1, se han definido los límite del modelo conceptual que incluyen los acuíferos del Río Bueno, estableciéndose la geometría en 3 D de los acuíferos que fueron identificados y caracterizados mediante el análisis hidrogeológico.

3.7.1 Límites y geometría del basamento

Los resultados obtenidos de la campaña geofísica extraída de AC Ingenieros Consultores Ltda. (2003) permitieron la caracterización espacial de los acuíferos de la zona de estudio. El trabajo geofísico consistió de un levantamiento de perfiles del basamento rocoso fundamental (por Gravimetría) y sondeos verticales a través del relleno sedimentario, ocupando el método geofísico del Transiente Electromagnético (TEM) (Figura 3-22).

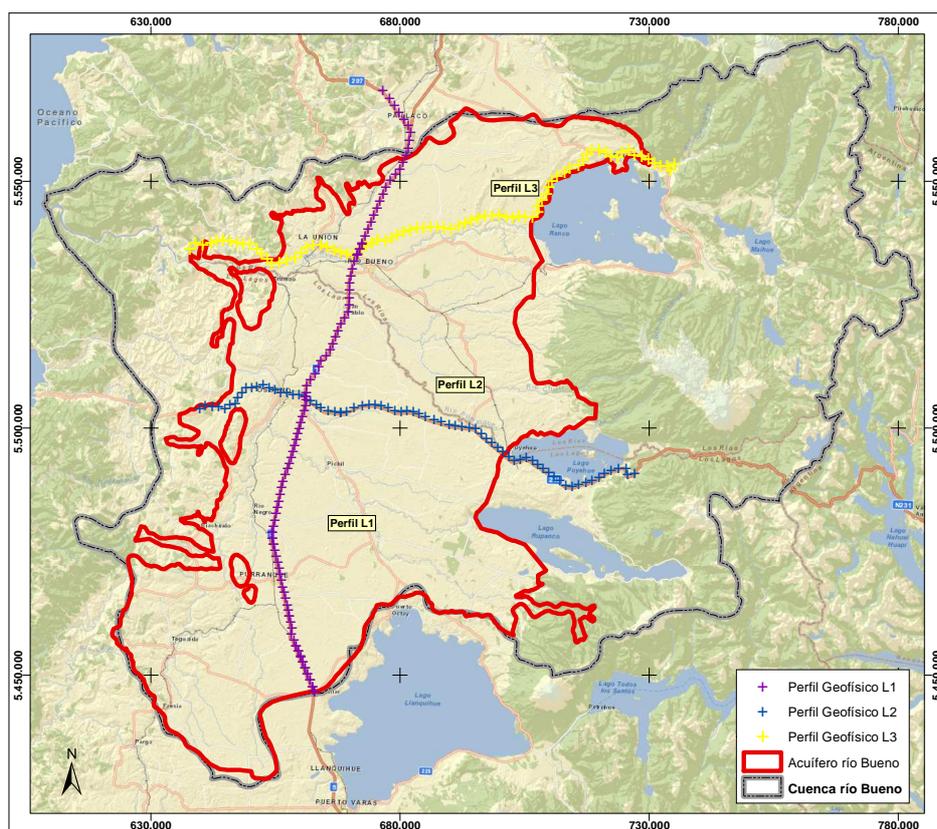


Figura 3-22. Distribución de los perfiles geofísicos en el acuífero caracterizado (Amphos 21).

Respecto de la gravimetría, se midieron 342 km en tres líneas gravimétricas regionales (Perfiles L1, L2 y L3), con estaciones entre 1,0 a 1,5 km, aprovechando la Ruta 5 Sur y los caminos transversales principales. Con TEM se midieron 20 puntos, en parte distribuidos sobre las líneas gravimétricas con el fin de detectar el basamento y usarlo como punto de control o chequeo de la interpretación gravimétrica (Figura 3-23):

Perfil Geofísico Línea 1 (norte-sur)

El basamento aumenta progresivamente su profundidad desde la estaca 40 hacia el sur, hasta valores que sobrepasan los 2 km, y quedando abierta una gran cuenca. El TEM 12, situado aproximadamente entre las estacas 43 y 44, se localiza en un alto del basamento, y muestra el estrato superior (121 m de profundidad) como favorable a la contención de capas acuíferas. El TEM 18, aproximadamente entre las estacas 83 y 84, muestra dos estratos geoelectrónicos (180 m de profundidad) favorables a la contención de capas acuíferas. Hacia el extremo norte, la línea se acerca a cerros que podrían formar parte del basamento y, por lo tanto, la interface sedimentos-basamento tiende a ser somera.

Perfil Geofísico Línea 2 (este-oeste)

En esta línea ninguno de los dos TEM alcanzó a detectar basamento, por lo que como puntos de control se usaron las profundidades en el cruce con la L1.

Esta línea permite apreciar varias subcuencas. Desde la estaca 16 al oeste se observa una cuenca abierta a profundidades de 1.200 m, con un alto relativo en las estacas 11-12. Entre las estacas 16 y 42 se tiene otra cuenca cuya máxima profundidad es de alrededor de 800 m, la cual se alcanza en las estacas 31-32. Entre las estacas 42 y 64 se observa una gran depresión, que alcanza una profundidad del orden de 2.000 m bajo las estacas 54-56. Finalmente, desde la estaca 64 al este se tiene un relieve que desciende rápidamente hasta unos 700 m en la estaca 66-67 y luego asciende con algunos altibajos hasta el extremo en la estaca 75.

Perfil Geofísico Línea 3 (este-oeste)

Desde la estaca 1 a la 27 se aprecia una cuenca de unos 1.200 m de profundidad hasta la estaca 15. El TEM 16 muestra tres estratos poco favorables a la contención de capas acuíferas, dadas por la alta resistividad de la cubierta y la baja resistividad de los estratos subyacentes. Entre las estacas 27 y 46 se distingue una suave cuenca. Luego, desde la estaca 46 a la 67 se observa una depresión un poco mayor, con un paleocauce más profundo de alrededor de 900 m en las estacas 59-60. Finalmente, desde la estaca 67 al

este se tiene un relieve muy variable que en promedio va siendo cada vez más somero a medida que se acerca a los cerros, posible basamento. El TEM 1, cerca de la estaca 70, muestra una cubierta demasiado resistiva como para ser favorable a la contención de capas acuíferas.

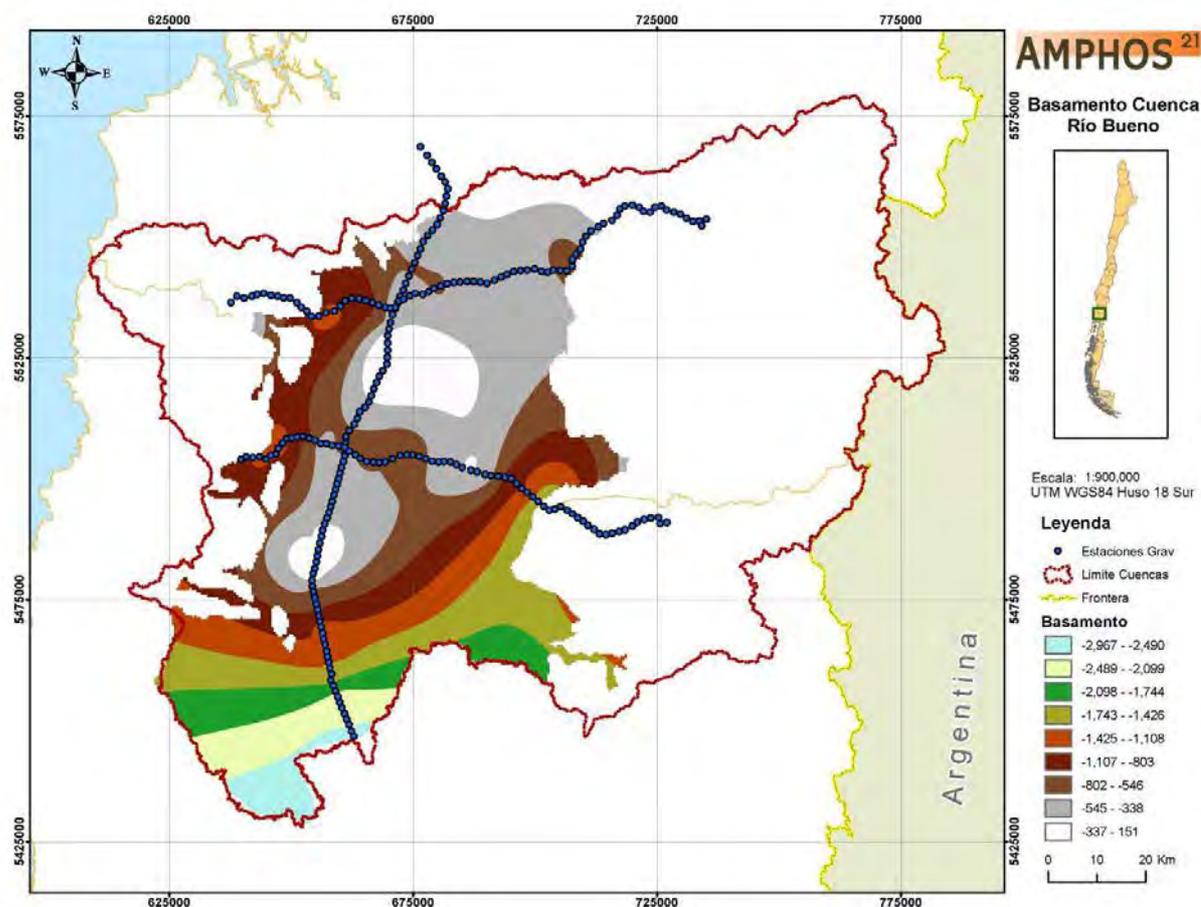


Figura 3-23. Morfología del basamento del acuífero. Elaboración: Amphos 21.

Del análisis e interpretación de la geofísica se observó una diferenciación general de 4 estratos para la cubierta y depósitos cuaternarios, y de dos estratos para los sedimentos terciarios. Se obtuvo las siguientes conclusiones generales:

- ✓ Se diferencian 4 estratos geoelectricos que se interpretan como materiales de cubierta y depósitos cuaternarios: 2 que pueden ser potenciales contenedores de capas acuíferas y otros 2 que serían desfavorables por su resistividad muy alta o muy baja.

- ✓ Se aprecian 2 estratos geoelectricos que se interpretan como rocas sedimentarias terciarias, uno de baja resistividad (posibles arcillolitas), otro de mayor resistividad (rocas más compactas y posibles materiales volcánicos). Estos 6 estratos definen la conformación del estrato superior del modelo gravimétrico, a la que se le atribuye una densidad uniforme.
- ✓ Se detectó un substrato denso y resistivo, detectado en 4 puntos TEM y definido en cuanto a morfología y profundidad en las 3 líneas gravimétricas como la interface sedimentos-basamento.

Los resultados del estudio geofísico anteriormente descrito indican que los rellenos sedimentarios poseen un espesor mínimo de unos 200 m, lo cual se confirma con los antecedentes estratigráficos disponibles. En efecto, de las columnas estratigráficas obtenidas para ese estudio, ninguna detectó el basamento rocoso (Anexo E – Mapa Geológico).

Del resultado de la prospección geofísica se concluyó que existen sedimentos no consolidados cuaternarios de gran potencia aptos para albergar agua en el valle de la depresión central asociada a la cuenca del río Bueno.

3.7.2 Caracterización de los acuíferos principales

La caracterización de los acuíferos consistió en la revisión de los antecedentes disponibles y una interpretación hidrogeológica en base a las columnas litológicas, geofísica, niveles de agua y ensayos de bombeo recopilados.

En base al material analizado se pueden distinguir varios sistemas acuíferos que se describen a continuación:

- ✓ **Acuíferos A2//A1**

Formado por un acuífero superior libre (A2) constituido por gravas y arena de los depósitos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y/o fluviales (PIHf, Hf), litorales (Hp), eólicos (Heo) y arenas y limos estuarinos (He), que se disponen sobre un acuífero confinado (//A1) en depósitos del mismo tipo, correspondientes a la Glaciación Santa María (Plgf2).

El acuífero //A1 es confinado por depósitos de cenizas, lapillis, gravas, arenas y arcillas piroclásticos-epiclásticos (Plsp), limos, arcillas y arenas finas glaciolacustres

(Plg12), o localmente por limos, arcillas, arenas finas, gravas y bloques morrénicos (Plm2).

El acuífero A1, a nivel regional, posee transmisividades bajas a media-alta ($T=50$ a $400 \text{ m}^2/\text{d}$), permeabilidades bajas a altas ($K=10^{-5}$ a 10^{-3} m/s), caudales de explotación variables entre 2 y 15 l/s y específicos inferiores a 1,98 (l/s)/m. El espesor de los depósitos saturados con agua es inferior a los 10 m y el nivel estático se encuentra entre 1 y 5 m bajo la superficie del terreno.

✓ **Acuíferos A2/A1**

Corresponde a los depósitos de gravas y arenas glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y Santa María (Plgf2), que en su conjunto constituyen un acuífero libre. Se presenta en los márgenes de valles profundos de los ríos principales, como el Pilmaiquén, Negro, Rahue y Blanco y en el sector localizado al noreste de Río Bueno hasta el Lago Raneo, donde los depósitos glaciofluviales (Plgf2) subyacen directamente a depósitos glaciofluviales (Plgfl) y fluviales (PIHf y Hf), los cuales en su conjunto constituyen un acuífero libre con conexión a la red fluvial local. En general, en el sector localizado al noreste de Río Bueno, el nivel freático se encuentra entre 10 y 20 m de profundidad y el espesor saturado supera los 20 m.

Este sistema a nivel regional posee transmisividades bajas a muy altas ($T=50$ a $3.000 \text{ m}^2/\text{d}$), permeabilidades bajas a altas ($K=10^{-5}$ a 10^{-3} m/s), caudales de explotación variables entre 1 y 80 l/s y específicos entre 0,11 y 18,75 (l/s)/m.

La zona acuífera de la cuenca del río Bueno forma un sistema de acuíferos libres y confinados (A2//A1, //A1 y A2/A1), con una extensión horizontal máxima de 80 km (entre Osorno y San Pablo) medido perpendicularmente al borde costero (Figura 3-24).

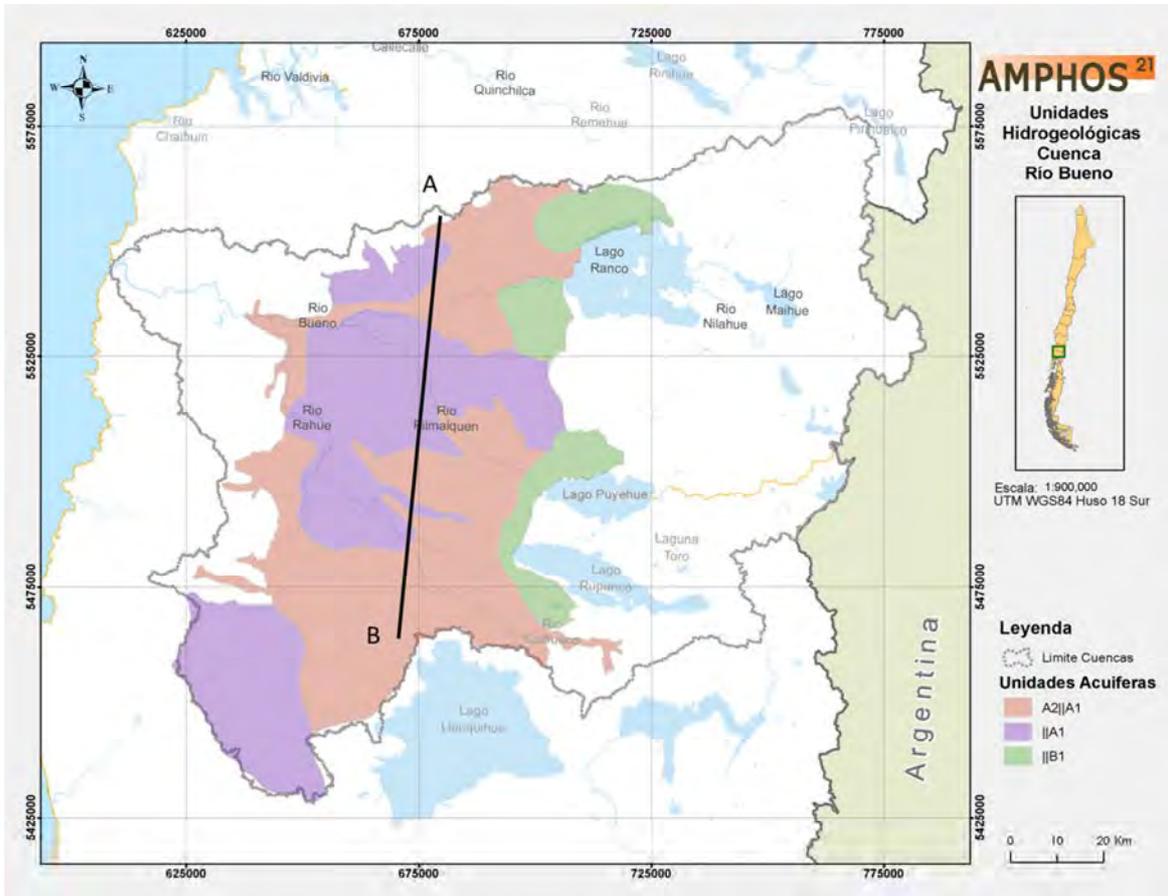


Figura 3-24. Ubicación de los acuíferos principales de la cuenca de río Bueno (Amphos 21).

3.7.3 Límites y geometría del sistema acuífero

De acuerdo con los antecedentes señalados con anterioridad en el sector de la cuenca del río Bueno que coincide con la Depresión Intermedia donde se ubican los rellenos del Cuaternario, se tiene una cierta homogeneidad estratigráfica, que se refleja en una serie de acuíferos, generalmente confinados, de 5 m a 50 m de espesor, intercalados por estratos de permeabilidad alta a media.

En consecuencia, exclusivamente desde el punto de vista de la estratigrafía, en la cuenca del río Bueno existen acuíferos de interés en todo el sector donde se ubican los rellenos sedimentarios del Cuaternario. Estos acuíferos se ubican, según los diversos sectores, desde prácticamente el nivel de terreno hasta más de 130 m de profundidad, siendo intercalados por estratos impermeables y semipermeables.

Los sectores confinados (//A1 y A2//A1) aparecen ocupando alrededor de un 50% del acuífero, dispuestos en su mayoría en los bordes E y W del acuífero, quedando libre el sector central y la unión del río Rahue con el río Bueno (Figura 3-25). Se componen principalmente de un acuífero superior libre (A2) constituido por gravas y arena de los depósitos glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y/o fluviales (PIHf, Hf), litorales (Hp), eólicos (Heo) y arenas y limos estuarinos (He), que se disponen sobre un acuífero confinado (//A1) en depósitos del mismo tipo, correspondientes a la Glaciación Santa María (Plgf2) y acuífero confinado (//A1) en depósitos del mismo tipo, correspondientes a la Glaciación Santa María (Plgf2).

En la zona costera encontramos potentes afloramientos de la Serie W, que compone el basamento del acuífero. Hacia el sur encontramos discordantemente los materiales acuíferos formando sistemas confinados y libres con potencias definidas por el modelado glacial y fluvioglacial, erosionados actualmente por la red de drenaje.

En la zona situada al sur encontramos acuíferos confinados (A2) dispuestos sobre los materiales del Pleistoceno que actúan como confinantes de la serie de depósitos glaciales.

3.7.4 Parámetros hidráulicos del modelo conceptual

3.7.4.1 Distribución de la conductividad hidráulica (K)

Para el análisis de la conductividad hidráulica se contó con un total de 33 pozos con información relevante (Figura 3-26).

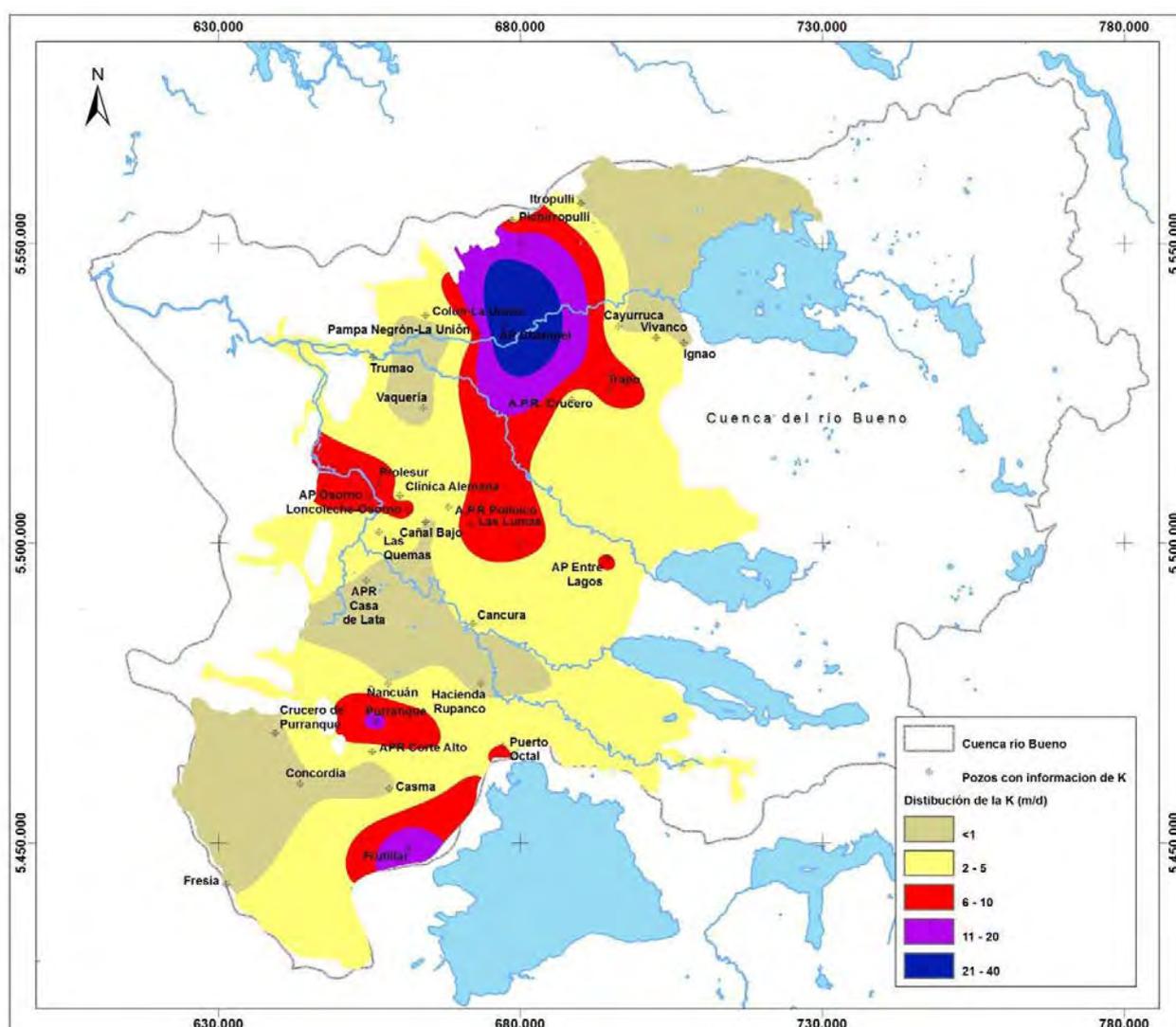


Figura 3-26 .Distribución de la permeabilidad (m/d) en el acuífero (Amphos 21).

De los 33 puntos analizados, 23 de ellos presentan valores de K inferiores a 5 m/d, y 7 pozos muestran rangos entre 5 y 10 m/d. Los 3 restantes (Purranque, Frutillas y AP

Champel) corresponden a valores de la conductividad hidráulica más elevados con un K entre 10 y 40 m/d distribuidos según la Figura 3-26 (Anexo G – Hidrogeología).

3.7.4.2 Coeficiente de almacenamiento (S)

A partir de los antecedentes existentes del análisis de las pruebas de gasto constante disponibles en 16 captaciones del área de interés se han determinado valores para el coeficiente de almacenamiento (S) en el sistema acuífero de la cuenca del río Bueno. Dichos resultados se muestran en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Coeficiente de almacenamiento en diferentes captaciones (Escalona 2004).

Nº	Propietario	S (Coef. Almacenamiento)	Observaciones
1	Parque Industrial Anticura	3.9×10^{-7}	En rango de acuífero confinado
2	Agropecuaria Sagalú (Rapanco)	0,06	En rango de acuífero libre
3	Comité de Vivienda Intropulli	0,04	En rango de acuífero libre
4	Fdo. La Masia (Puyehue)	-	No fue posible la determinación
5	Comité APR Felijecho	$5,3 \times 10^{-6}$	En rango de acuífero confinado
6	Fdo. Pufayo	0,16	Valor muy alto
7	Ruta 5 sur s/n	0,02	En rango de acuífero libre
8	Pesquera Mares Australes Ltda.	0,06	En rango de acuífero libre
9	Verónica Cáceres Guajardo	-	No fue posible la determinación
10	Hacienda Rupanco ChanChan	-	No fue posible la determinación
11	APR Casa de Lata	0,05	En rango de acuífero libre
12	Esc. Itropulli - Paillaco	$4,4 \times 10^{-5}$	En rango de acuífero confinado
13	AquaChile SA - Aguas Buenas	$5,5 \times 10^{-7}$	En rango de acuífero confinado
14	María Consuelo Cheyre E.	0,09	En rango de acuífero libre
15	Crístino Nannig Grothe	-	No fue posible la determinación
16	Pilauco s/n Osorno - Ernesto Aabel	0,05	En rango de acuífero libre

Según los resultados presentados en el cuadro anterior y considerando las características de los rellenos existentes en la cuenca del río Bueno, se puede afirmar que el coeficiente de almacenamiento, en general, varía entre 2% y 9%, con mayor tendencia a estar sobre

5%, por lo que se ha adoptado un valor representativo para la cuenca de 7% (Figura 3-27).

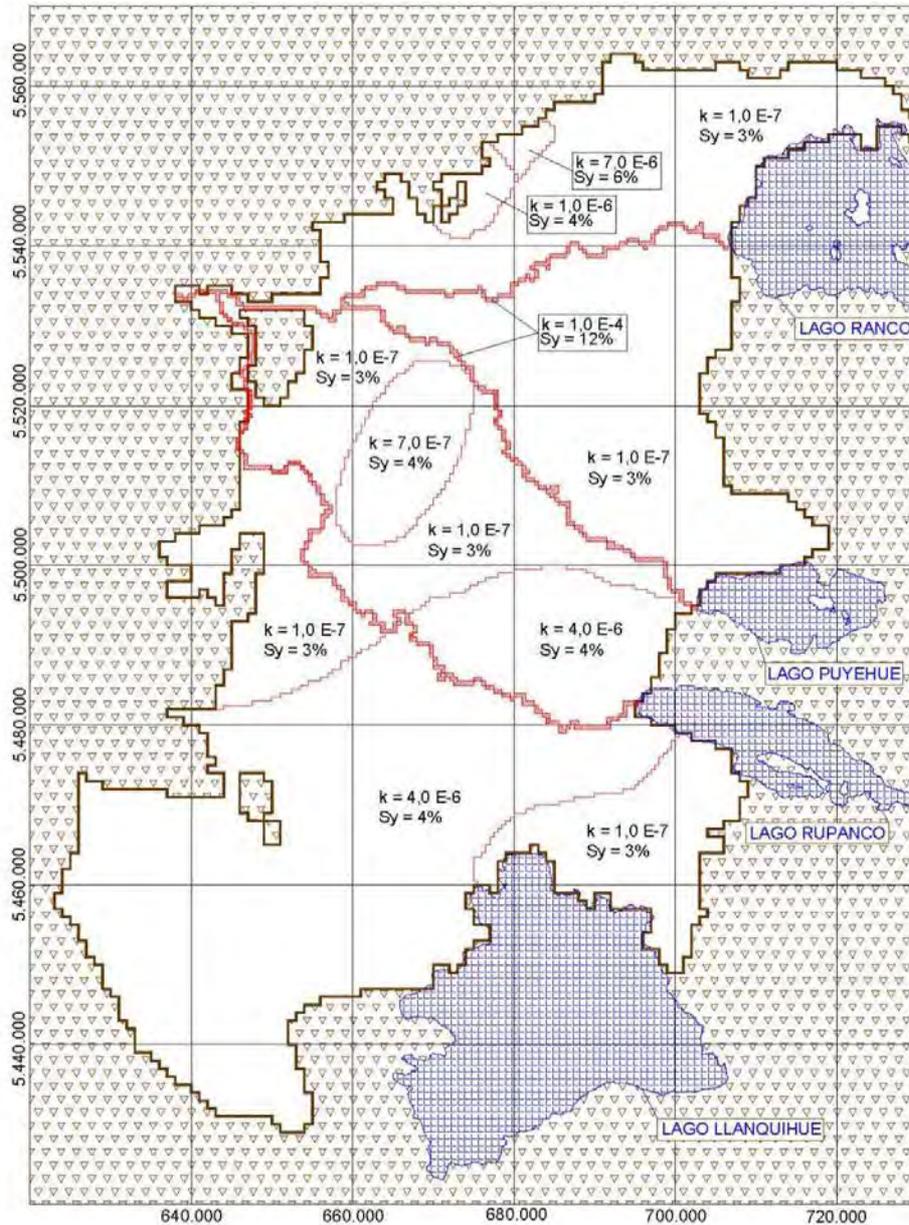


Figura 3-27 Mapa de distribución de la S (Escalona 2004).

3.7.5 Uso de agua y extracciones

Para cuantificar las extracciones del sistema acuífero se incluye un catastro de pozos y norias relevantes en la cuenca (Anexo C – Catastro Público de Aguas). Esta base de datos se ha obtenido del Catastro Público de Agua (CPA) en el que se han registrado 1.043 captaciones con sus principales características constructivas, caudales de operación y niveles de agua.

En dicha CPA se observa que en la generalidad de los casos, en otras regiones del país donde hay actividad agrícola, el uso en riego es el principal consumidor de las aguas subterráneas, seguido por la actividad industrial, incluyendo minería en algunos casos, y finalmente el uso para abastecimiento de agua potable. En la cuenca del río Bueno, el riego es más bien una actividad incipiente, lo que queda reflejado en el moderado uso de las aguas subterráneas para este fin, que corresponde a la mitad del recurso asociado al abastecimiento de agua potable.

Respecto a los datos obtenidos del caudal, se determina que los puntos inferiores a los 5 l/s (33,6%) son mayoritariamente de uso doméstico. En la práctica se extraen caudales despreciables respecto a los volúmenes utilizados en riego, agua potable y uso industrial, por lo que no han sido consideradas en el catastro desarrollado ni en su posterior análisis.

Con el fin de estimar los volúmenes de bombeo de las captaciones existentes, se empleó la información mostrada en el catastro de captaciones obteniéndose una extracción aproximada de 11,4 m³/s. Se ha determinado en terreno que solo entre un 25-30% de los derechos están siendo ocupados. Por este motivo se considera que el caudal de bombeo podría ser de 3,1 m³/s.

3.7.6 Estimación de la recarga en la zona de estudio

Uno de los principales mecanismos de recarga en la cuenca del río Bueno corresponde a la infiltración debido a las precipitaciones. Por ese motivo a partir de la ecuación obtenida en la relación precipitación-elevación se calculó la precipitación para los diferentes intervalos hipsométricos (Figura 3-28 y Tabla 3-10) donde se ha determinado que la precipitación anual total en el acuífero corresponde a 406 m³/s.

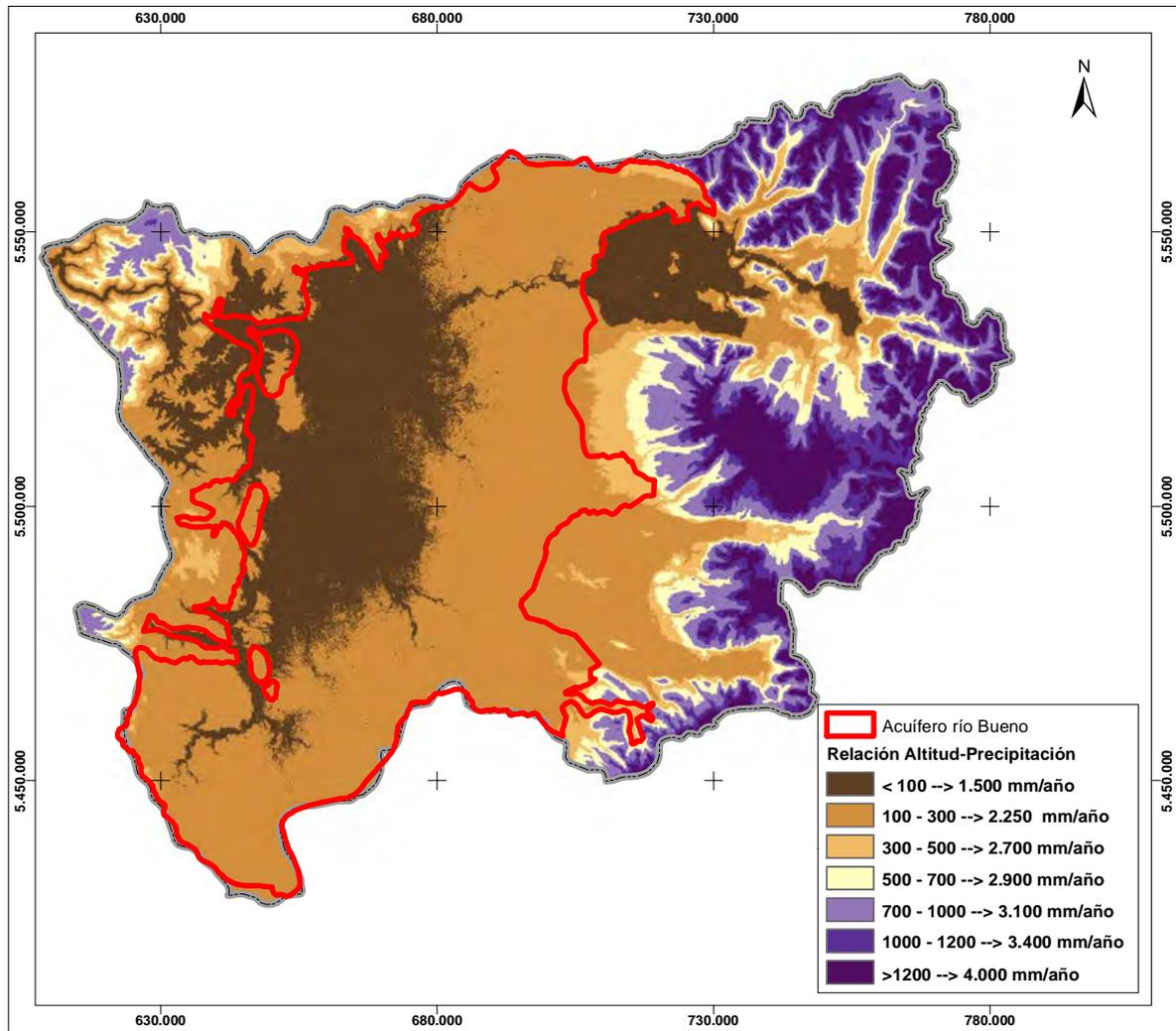


Figura 3-28 Distribución de precipitación (mm/año) en relación con la altitud en la cuenca.

Elaboración: Amphos 21.

Tabla 3-10. Estimación de la precipitación a partir de la ecuación altura-precipitación en el acuífero (Amphos 21).

Altura msnm	Área km ² Cuenca	Área km ² Acuífero	Precipitación		
			mm /año	m ³ /año	m ³ /s ACUIFERO
< 100	3365	3328	1.523	5.068.818.638	161
100-300	6538	3369	2.176	7.331.901.668	232
300-500	1113	138	2.642	364.733.881	12
500-700	925	8	2.875	24.238.794	1
700-1000	1376	2	3.108	5.172.666	0
1000-1200	840	0	3.341	0	0
>1200	1249	0	4.040	0	0
Total	15.406	6.846	19.705	12.794.865.648	406

La magnitud de la infiltración depende entre otros factores, de las características de los suelos. En particular, desde el paralelo 39° S, los depósitos eólicos piroclásticos no sólo quedan confinados a las zonas cordilleranas y precordilleranas, (como sucede en la zona central) sino que se extienden hacia la depresión intermedia.

En el valle central se encuentran importantes acumulaciones de ceniza. Esta franja se ensancha desde el sector de Loncoche al sur y se extiende por los suelos de las localidades de La Unión, Río Bueno, y Osorno.

Esta configuración del suelo, provoca que en gran parte de la cuenca del río Bueno, la capa superficial presente importantes cantidades de suelos finos lo que dificulta el proceso de infiltración de excesos de lluvias.

A lo anterior hay que agregar que en algunos sectores de la parte Este del valle central, se han detectado cantidades importantes de óxido de hierro (fierrillo) el que actúa como capa aún más impermeable. Estas zonas corresponden a los denominados suelos ñadis.

Además existen extensas áreas de mal drenaje en las cuales se dificulta la recarga de los acuíferos profundos, producto de la existencia de un estrato superficial de baja permeabilidad y de la baja pendiente del terreno.

Por todo lo anterior, es esperable que la magnitud de la infiltración sea más bien baja en comparación con la precipitación.

En AC Ingenieros Consultores Ltda. 1998, se determinó que el coeficiente de percolación para los suelos se encuentra en el rango de 18% a 27%. Para la zona de río Bueno se estima que el coeficiente debe ser sensiblemente menor debido a tres factores:

- ✓ Existencia de un estrato superficial de muy baja permeabilidad: Este estrato tiene características impermeables o poco permeables (en general formado por ceniza volcánica) y limita superiormente la percolación a los acuíferos.
- ✓ Menor pendiente del terreno: Ante un episodio de precipitación, ayuda a la saturación del estrato superior hasta la zona poco permeable, evitando la percolación al acuífero principal, dado que en esta situación predomina el flujo superficial a través de la red de cauces que drenan la cuenca.
- ✓ Mayor cantidad e intensidad de la lluvia. Esto trae como consecuencia una saturación más rápida del estrato superficial, lo que favorece el escurrimiento superficial y el subsuperficial presente sobre el estrato poco permeable, vale decir limita la incorporación del agua a los acuíferos principales presentes bajo este estrato.

Dado que no existen antecedentes teóricos que permitan determinar con certeza un valor para el coeficiente de percolación, se estima de manera preliminar que este coeficiente debiese variar entre un 5 y un 15% para distintos puntos de la cuenca. Por lo que la infiltración de la recarga en la Cuenca del río Bueno sería entre 20,3 y 60,9 m³/s.

En este punto es importante señalar que la recarga estimada como un 10% (40,6 m³/s) de la precipitación es un valor referencial y que se encuentra respaldado por el hecho que la napa se encuentra relativamente superficial en gran parte de la zona de estudio, impidiendo una percolación de mayor magnitud.

3.7.7 Áreas de recarga/descarga

Este modelo conceptual define que el mecanismo principal de recarga se produce por infiltración del agua de precipitación en el acuífero. Este mecanismo de recarga se produce principalmente de forma local en los depósitos anexos a la zona de los lagos Ranco, Puyehue y Rupanco. En estas zonas se han encontrado las explotaciones más productivas al perforar los materiales de mayor permeabilidad (K), presentando niveles piezométricos más elevados.

Sobre el acuífero, los ríos son de carácter efluentes, por lo que el acuífero es el que, en la mayoría de los casos, vierte sus aguas al cauce. En casos puntuales en los que los materiales sobre los que discurre los ríos presentan menores conductividades hidráulicas, es posible que el nivel freático no alcance a conectar con las aguas del cauce, siendo este de carácter influente y, por tanto, aportando agua al acuífero.

El agua precipitada de la lluvia produce una escorrentía superficial concentrada en los esteros afluentes del río Bueno cerca de su desembocadura. El agua que discurre por estos cauces es en su mayoría descargada al río principal, desembocando posteriormente en el mar.

La descarga del agua del acuífero a través de pozos y norias es secundaria debido al elevado volumen de las aguas que discurren de forma superficial, pero está aumentando en los últimos años. El aprovechamiento principal de aguas subterráneas se centra en torno a los centros urbanos, industrias, ganaderías y cultivos.

Existe una descarga despreciable que se produce de forma subterránea en la parte final de acuífero hacia zona costera.

La realización de aforos en los cauces principales de la cuenca del río Bueno se puede realizar una hipótesis de la relación río-acuífero en varios de sus sectores.

El río Chirre (sector norte) mantiene, en su mayoría, una relación efluente ("río ganador") como ya se pudo observar y medir en el aforo realizado en el sector aguas arriba de la población de San Pablo. Se ha podido inferir que esta relación con el acuífero se mantiene en el sector norte, por encima de este punto, siendo conscientes de que no en todos sus puntos se ha realizado la comprobación.

El río Rahué fue aforado en el sector de Quinchilca, mostrando una relación influente. En el sector aguas arriba de este punto analizado el río debiera mantener una relación también influente. En el sector sur de la cuenca los ríos debieran de mantener una relación influente o mixta, en función del mayor o menor confinamiento del acuífero y la conexión de éste con el río. Es necesario volver a aclarar que, al no poder haber obtenido datos de un mayor número de puntos en la hidrografía de la cuenca del río Bueno, no es posible realizar hipótesis de mayor envergadura sobre esta zona, por lo que no ha sido posible realizar un mapa detallado de las relaciones río-acuífero.

3.7.8 Condiciones de borde

La zona del modelo conceptual comprende todas las zonas acuíferas ubicadas en el valle central dentro de la cuenca del río Bueno, desde la ciudad de Paillaco por el norte, hasta aproximadamente la localidad de Fresia por el sur.

El límite este del acuífero comprende los bordes ponientes de los principales lagos de la zona. Hacia el E de este límite, los acuíferos ubicados en torno a los principales cauces son de menor importancia.

El límite oeste queda definido por los bordes impermeables que define el contacto roca – relleno en la vertiente Oriental de la Cordillera de la Costa.

En primer lugar hay que señalar que el sistema acuífero presenta una única salida de flujo subterráneo correspondiente al pequeño acuífero ubicado bajo el cauce del río Bueno en su paso a través de los cerros de la Cordillera de la Costa.

De igual forma, las únicas entradas de flujo subterráneo corresponden a los pequeños acuíferos que se encuentran en torno a los cauces precordilleranos. Bajo el supuesto que estos flujos son despreciables en relación con el flujo propio de la napa en el valle principal, se infiere que el sistema funciona como una cuenca cerrada.

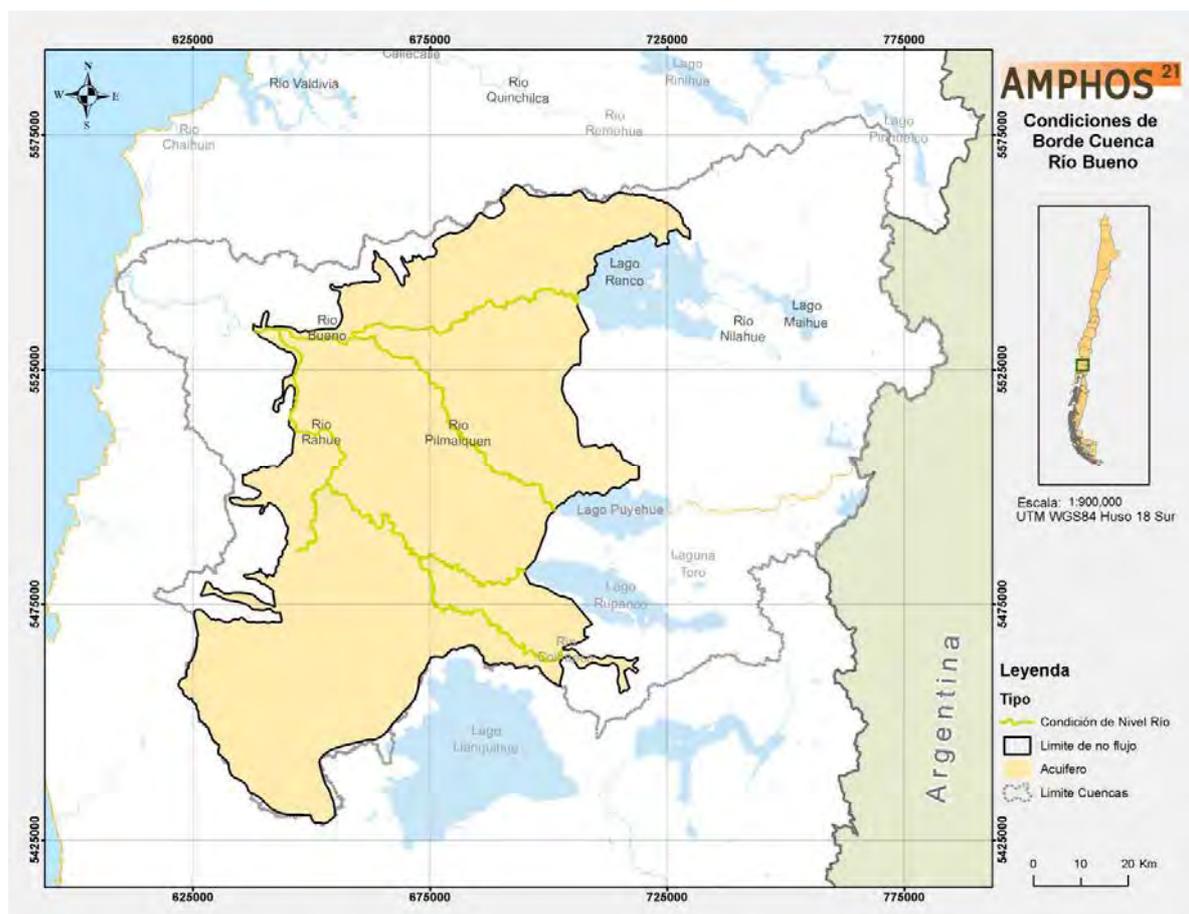


Figura 3-29. Condiciones de borde para el acuífero de Río Bueno (Amphos21).

3.7.9 Interacción Río – Acuífero

La red de drenaje natural de la cuenca está constituida por una serie de cauces de diferente magnitud siendo el río Bueno el eje central.

Los lechos de estos ríos se encuentran encauzados por terrazas compuestas generalmente de material fluvial y glaciofluvial cuyas alturas alcanzan hasta los 40 m. Este hecho origina que los lechos de estos ríos se encuentren a una cota sensiblemente menor con respecto al terreno circundante por lo que actúan como buenos sistemas de drenaje del acuífero, especialmente ante eventos de lluvia (Figura 3-30).

Para realizar un análisis de la interacción entre los cauces superficiales y el acuífero se deben distinguir los cauces que nacen desde los lagos, de aquellos que se forman de manera natural en las cuencas intermedias.

Los ríos Bueno, Pilmaiquén y Rahue nacen respectivamente de los lagos Ranco, Puyehue y Rupanco. Sus caudales dependen tanto del aporte del lago como de los aportes directos de las precipitaciones.

De acuerdo con la geomorfología de la zona y el análisis de la profundidad del nivel de la napa se concluye que tan sólo en el tramo inicial del río Pilmaiquén se produce una recarga al acuífero producto de la infiltración de agua en el lecho. La magnitud de esta infiltración es relativamente baja debido a lo fino de los materiales que componen el estrato superior del suelo y fundamentalmente, a lo corto del tramo.

En los tramos medios y bajos de estos ríos, la napa se encuentra a nivel superficial por lo que estos cauces actúan como drenaje del acuífero aflorando gran parte del agua que fluye por el subsuelo.

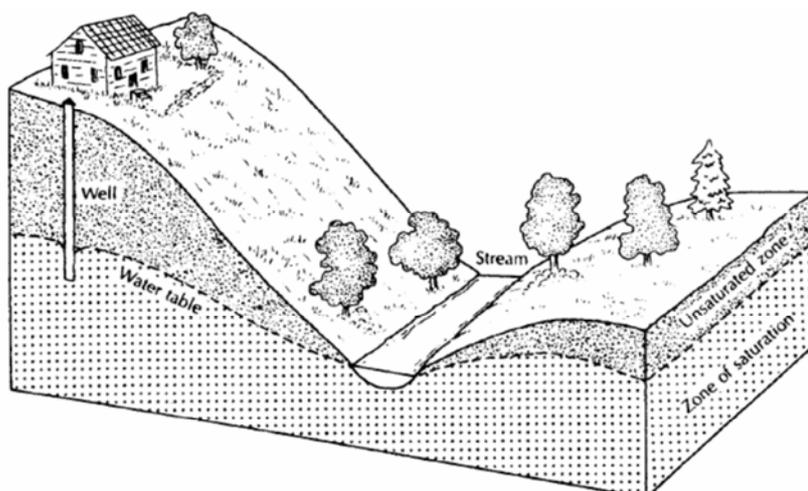


Figura 3-30. Ejemplo de la interacción río-acuífero que se produce (cauce efluente).

3.7.10 Piezometría y dirección de flujo

A partir de la información de niveles medidos durante la campaña de terreno para el catastro de captaciones del estudio realizado por AC Ingenieros Consultores Ltd., 2003, se trazaron curvas de igual nivel del agua subterránea (equipotenciales), es decir, curvas que representan la superficie piezométrica correspondiente al periodo enero - abril de 2003.

El flujo subterráneo presenta una dirección E-W en el sector norte de la cuenca de río Bueno y dirección SE-NW en el sector sur de ésta. Se observa además, que dichos flujos

subterráneos siguen la dirección principal de los escurrimientos superficiales de los ríos Bueno y Rahue (Figura 3-29).

El gradiente hidráulico de la zona acuífera en el sector central de la cuenca es del orden de un 0,4%. Hacia el sector nororiente el gradiente aumenta considerablemente debido a la mayor pendiente que presenta el terreno en este sector, alcanzando valores del orden de 1,3%.

Finalmente, a partir de las curvas equipotenciales trazadas, es posible mencionar que en el sector de la confluencia de los ríos Bueno y Rahue el agua subterránea se encuentra a escasa profundidad, hallándose incluso pozos con el nivel estático surgente, debido a que en este sector se observa un estrechamiento del valle que provoca el ascenso de la napa hasta el nivel de terreno.

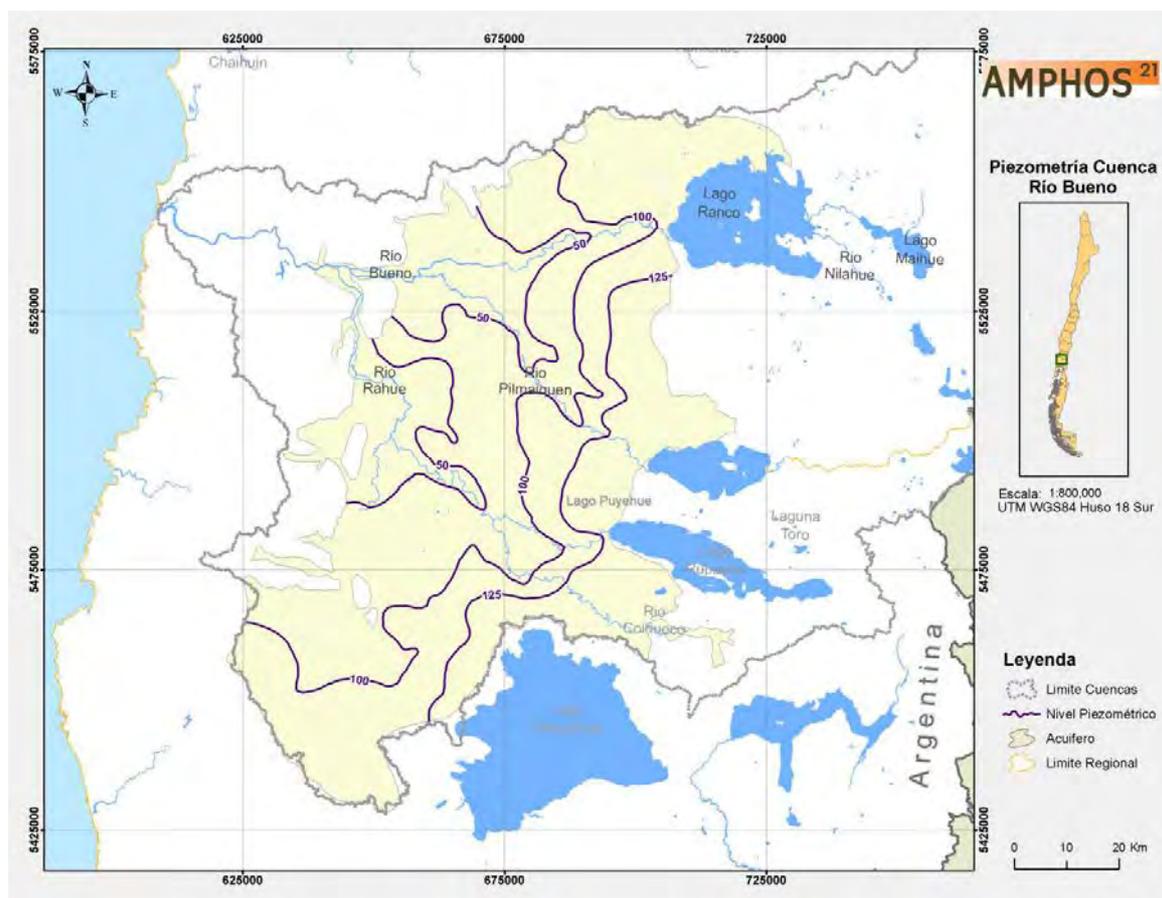


Figura 3-31. Mapa de isopiezas (msnm) en el acuífero de la cuenca de río Bueno (Amphos 21).

3.8 BALANCE HÍDRICO PRELIMINAR

3.8.1 Balance hídrico del sistema acuífero

Con el objetivo de establecer el balance hídrico en el acuífero se ha estimado la recarga y descarga del sistema subterráneo anual. Los parámetros utilizados en la realización del balance se han obtenido a partir de los antecedentes existentes, datos medidos periódicamente (precipitaciones y caudales) e información de la campaña de terreno realizada. Los términos del balance que se han tenido en cuenta se detallan a continuación y quedan esquematizados en la Figura 3-32.

✓ **Entradas al sistema:**

- Infiltración por recarga de precipitaciones.
- Retorno de riego.
- Infiltración de los ríos y lagos.

✓ **Salidas del sistema:**

- Drenaje hacia los ríos (sistema mayoritariamente efluente ,Figura 3-30)
- Bombeos y vertientes.
- Salidas por el oeste (parte final del acuífero).

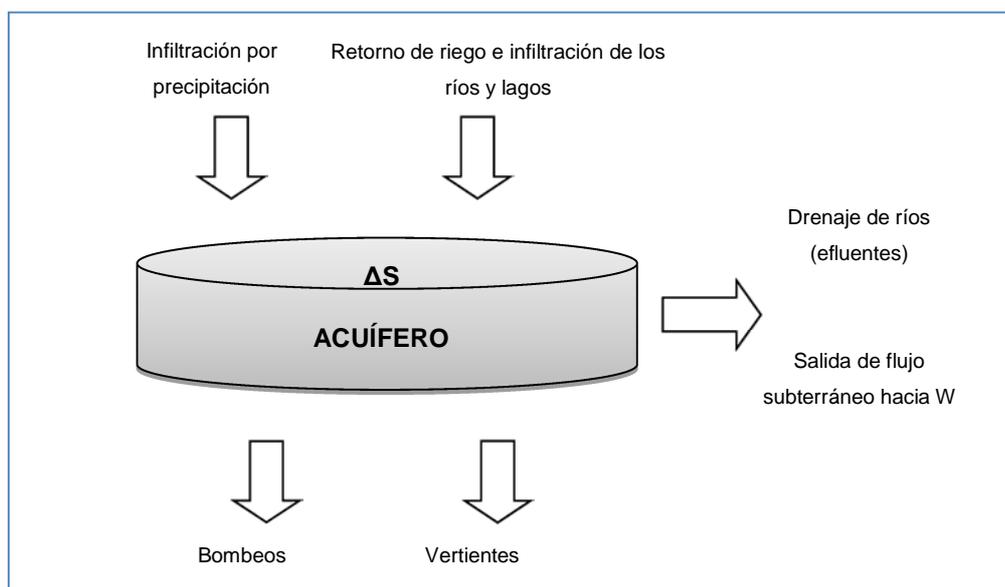


Figura 3-32. Esquema de funcionamiento del sistema hídrico. Elaboración: Amphos 21.

3.8.2 Cuantificación estimativa del Balance Hídrico

✓ Entradas:

- Infiltración: calculada a partir de un porcentaje (10%) de las precipitaciones. El área de recarga estimada en el acuífero es de unos 6.846 km², con lo que la infiltración es de = **40,6 m³/s**.
- Retorno de riego: estos han sido estimados considerando como el 7-10% de las extracciones subterráneas que se producen en la zona. Por tanto los retornos constituyen = **0,4-0,7 m³/s**.

Se considera que en la zona de estudio el riego a través de canales es poco significativo debido al uso del suelo y la actividad económica. En base a esto se estima un valor de **0,1-0,3 m³/s**.

✓ Salidas:

- Salida por drenaje de los ríos (efluentes): se ha calculado mediante la diferencia de caudal por unidad de superficie en diversas estaciones fluviométricas de la zona de estudio. Con lo cual, se ha estimado un coeficiente entre 0,026 a 0,03. Este factor se ha multiplicado por la extensión de la red de drenaje superficial (ríos=1.403,7 km) discurrientes por el acuífero obteniendo un caudal de salida de **37,9 m³/s**. Este valor se revisará y evaluará posteriormente en la implementación del modelo numérico.
- Extracción de los pozos: A partir de la información proporcionada por la CPA se obtuvo un caudal de 11,4 m³/s. Sin embargo se ha observado en terreno que solo están siendo ocupados entre un 25-30% de los derechos. Por este motivo se consideró como caudal de bombeo **3,1 m³/s** (dicho valor se irá actualizando conforme se analicen los datos de terreno).
- Descarga por el sector oeste: estimados mediante la expresión de la ley de Darcy $Q=AKi$, siendo la K de 1 m/d y el gradiente hidráulico (i) de 0,07 (obtenido a través de la piezometría) y siendo L= 6.000 m, y b= 30-50 m. Se obtiene una salida subterránea = **0,3-0,4 m³/s**. Lo cual se evaluará posteriormente con los resultados del modelo numérico.

Por lo que la expresión general del balance del sistema acuífero resulta de la siguiente forma:

$$\mathbf{RECARGA - DESCARGA = \Delta S \text{ (volumen almacenado)}}$$

$$\mathbf{41,3 \text{ m}^3/\text{s} - 41,3 \text{ m}^3/\text{s} = \Delta S}$$

$$\mathbf{\Delta S = 0 \text{ m}^3/\text{s}}$$

3.9 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO CONCEPTUAL

En base a la información analizada de hidrología, geología, hidrogeología, junto con las labores de catastro de puntos de agua y prospección geofísica, se determinó un modelo conceptual previo del funcionamiento de la cuenca del río Bueno (Figura 3-33).

Del resultado de la prospección geofísica (perfiles gravimétricos) se concluyó que existen sedimentos no consolidados cuaternarios de gran potencia aptos para albergar agua en el valle de la depresión central asociada a la cuenca del río Bueno.

En los sectores de Purranque y al oeste del Lago Ranco se encuentran espesores mínimos de 260 m y 280 m, respectivamente. La profundidad a la que se encuentra el basamento impermeable sería de más de 400 m en el resto de la cuenca sedimentaria asociada a la depresión central, incluso no se ha detectado éste desde la altura de Frutillar al sur.

Del estudio hidrogeológico realizado se desprenden las siguientes conclusiones relevantes.

- A pesar de la diversidad estratigráfica que muestran los perfiles disponibles de construcción de los pozos en la zona, fue posible identificar una serie de acuíferos con espesores variables entre 5 y 50 m. En la mayoría de las secuencias sedimentarias está presente el material fino menos permeable por lo que la productividad de las napas tiende a no ser muy alta.
- En general los acuíferos se ubican a profundidades variables entre la superficie y los 130 m de profundidad. Además, se detectó la presencia de un estrato superficial impermeable o poco permeable, que limita superiormente a los acuíferos.
- La dirección del flujo subterráneo presenta un predominio en la dirección E-W entre los ríos Pilmaiquén y Llolelhue; de SE-NW al sur del río Pilmaiquén. En general siguen la dirección de los cauces superficiales.
- Los gradientes del escurrimiento subterráneo van desde un 0,4 % promedio para el sector centro de la cuenca el que aumenta hasta alrededor de 1,3% hacia NE.
- La conductividad hidráulica, asociada a las formaciones acuíferas principales, resulta variable con rangos que oscilan entre 1 y 40 m/d, predominando

mayoritariamente las K inferiores a 5 m/d. El coeficiente de almacenamiento varía entre un 2% y 9%.

- La recarga potencial al acuífero se ha considerado como la precipitación y ha sido estimada en 40,6 m³/s, considerando la lluvia media (1.700-1.800 mm/año) sobre el relleno capaz de percolar en no más de un 10%.
- El agua precipitada de la lluvia produce una escorrentía superficial concentrada en los esteros afluentes del río Bueno cerca de su desembocadura. El agua que discurre por estos cauces es en su mayoría descargada al río principal, desembocando posteriormente en el mar.
- La principal salida de flujo subterráneo ocurre en los ríos y vertientes de la zona, debido a la forma encajonada de estos. En la mayoría de los casos los lechos se encuentra muy por debajo de la cota de terreno y del nivel piezométrico, lo anterior permite que el flujo subterráneo llegue con facilidad a los ríos debido a la existencia de un fuerte gradiente local en las zonas cercanas a los ríos.
- La descarga del agua del acuífero a través de pozos y norias es secundaria debido al elevado volumen de las aguas que discurren de forma superficial, pero ha aumentando en los últimos años. El aprovechamiento principal de aguas subterráneas se centra en torno a los centros urbanos, industrias, ganaderías y cultivos.

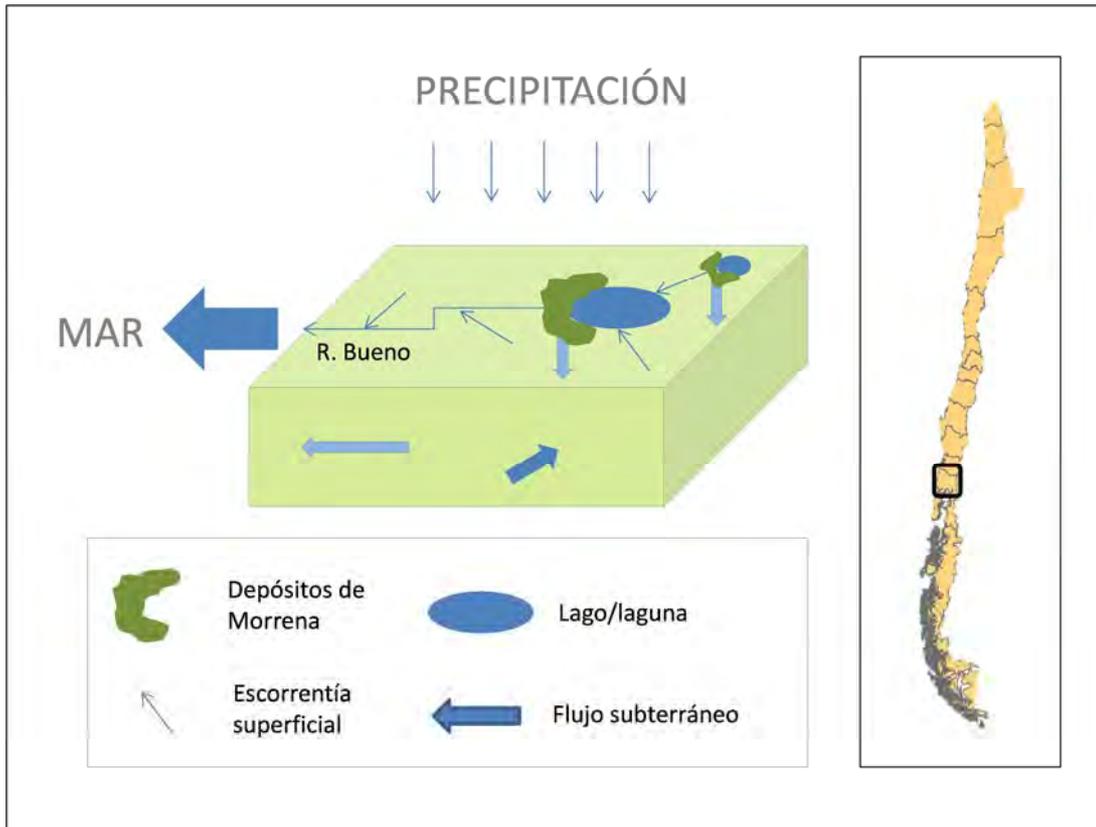


Figura 3-33. Esquema del modelo conceptual previo de la cuenca del río Bueno (Amphos 21).

3.10 MODELO NUMÉRICO

El modelo conceptual establecido para la cuenca del río Bueno en el capítulo anterior se ve reflejado en un modelo numérico que permite realizar simulaciones acerca de la gestión de las aguas subterráneas en la zona. De esta manera se realizó una primera aproximación al comportamiento de las aguas subterráneas y superficiales, que dan una visión cualitativa de gran utilidad para realizar una mejor gestión de las mismas.

3.10.1 Metodología

3.10.1.1 Selección del código computacional

Los cálculos del modelo numérico se han hecho con el código Modflow a través de la interfase Visual Modflow versión 2011.1. El método de resolución de las ecuaciones en derivadas parciales de flujo es el de diferencias finitas, lo que condiciona la estrategia de construcción del modelo.

El movimiento tridimensional del agua subterránea de densidad constante a través de un material de medio poroso puede describirse por la siguiente ecuación diferencial (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : Conductividad hidráulica.
- W : Entradas o salidas del sistema, como recarga y bombeo.
- S_s : Almacenamiento específico.
- h : Carga hidráulica o nivel de agua.

En general K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} pueden ser funciones del espacio y W puede ser función del tiempo y del espacio. La ecuación anterior describe el flujo de agua subterránea en condiciones de régimen transiente, en un medio heterogéneo y anisotrópico, siempre que los ejes de coordenadas estén alineados con los ejes principales de la conductividad hidráulica. Junto con las ecuaciones de borde de flujo, niveles de agua y las condiciones iniciales, constituyen la representación matemática del sistema de flujo de aguas subterráneas. Para resolver esta ecuación, MODFLOW utiliza el método de diferencias finitas, donde el sistema continuo descrito por la ecuación es reemplazado por

un set finito de puntos discretos en el espacio y en el tiempo. Las derivadas parciales son reemplazadas por términos calculados de la diferencia de carga hidráulica en esos puntos. De esta forma la ecuación diferencial original es transformada en un sistema de ecuaciones algebraicas lineales, cuya solución entrega valores de carga en puntos y tiempos específicos. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución continua de cargas hidráulicas variando en el tiempo que entregaría una solución analítica de la ecuación diferencial parcial de flujo (Anderson y Woessner, 2002).

3.10.1.2 Fuente de información: Modelo conceptual.

La información de base para implementar en el modelo numérico se tomó del establecimiento de un modelo conceptual del funcionamiento de la cuenca del río Bueno, detallado en los capítulos anteriores del presente trabajo. Para su construcción se han realizado una serie de simplificaciones geométricas y conceptuales que ayudan al buen funcionamiento del modelo y que se basan en los siguientes puntos:

- Geología e hidrogeología: la disposición en la vertical de las unidades hidrogeológicas se realizó de forma unificada, estableciendo un acuífero único equivalente, producto de una aproximación simplificada del funcionamiento real.
- Geometría del acuífero: para facilitar la simulación del comportamiento del acuífero fue necesario simplificar la geometría horizontal compleja del acuífero. Esto supuso la eliminación de los afloramientos del basamento rocoso que complicaban la geometría dentro del área modelada.
- Uso del agua en el sector: los caudales de aprovechamiento del agua subterránea establecidos en los Expedientes de Derechos de Agua se han unificado por sectores. Esta unificación supone el tratamiento conjunto de varios Derechos de Agua Subterránea, permitiendo tratar éstos de una manera más simple, sin que ello suponga una disminución de la calidad de los resultados obtenidos, ni de su tratamiento numérico.

3.10.2 Estructura del modelo

3.10.2.1 Tratamiento del acuífero

El sistema acuífero de la cuenca del Río Bueno se compone de acuíferos confinados y libres, como ya se explicó en el capítulo 2.5.2. Este sistema acuífero se ha modelizado como un acuífero único con parámetros hidrogeológicos “equivalentes”, debido a la complejidad y falta de más datos acerca de su estructura interna, lo que simplifica los cálculos y permite una mejor convergencia del código. El término equivalente define a una calibración de los parámetros para establecer un valor intermedio y lo más aproximado al de los valores reales de conductividad hidráulica de todas las unidades existentes (tanto en su heterogeneidad horizontal como vertical). Este procedimiento ha sido ampliamente utilizado en acuíferos de elevada complejidad y con un tratamiento a escala regional, como ha sido el aquí estudiado.

3.10.2.2 Dominio de la modelación

El dominio del modelo constituye la cuenca del río Bueno, basado en el modelo conceptual asumido y explicado en el capítulo anterior. Se han eliminado algunas zonas donde existen afloramientos rocosos para poder facilitar la convergencia numérica.

La zona comprende el dominio hidrográfico de los ríos Lollehue, Chirre, Pilmaiquén, Damas, Rahue, Coihueco, López y Negro con todos sus afluentes sesgados. En la parte este se encuentran los cuatro grandes lagos, Ranco, Puyehue, Rupanco y Llanquihue, los cuales han quedado fuera de la modelación debido al gran porcentaje de finos en sus lechos, que disminuye considerablemente el flujo entre ellos y el acuífero.

En todo momento se ha intentado respetar las divisorias de agua topográficas que conforman la cuenca de agua superficial. Sin embargo, el modelo del acuífero como tal se limita a la extensión de las formaciones permeables que presumiblemente están saturadas, lo que se ha deducido mediante observaciones directas e interpretación geológica.

3.10.2.3 Superficie topográfica y basamento

Los límites superior e inferior del modelo numérico son la topografía de la zona y una interpolación del basamento del acuífero (Figura 3-34, Figura 3-35 y Figura 3-36).

Para su posicionamiento y representación, ambas capas han sido interpoladas mediante el método "natural neighbours", que confiere una aproximación más suave a las superficies que se quieren representar.

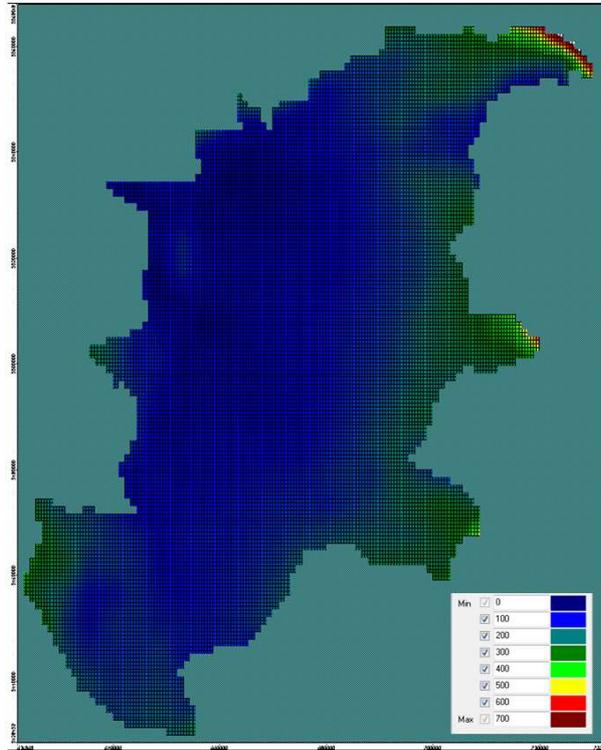


Figura 3-34. Superficie topográfica del área modelada (entre 0 y 1.400 msnm) (Amphos 21).

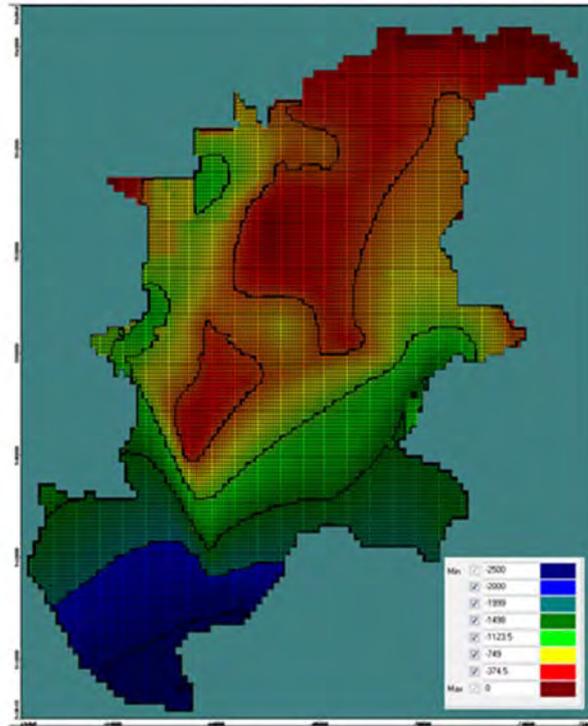


Figura 3-35. Basamento rocoso del área modelada (entre 0 y -2300 msnm) (Amphos 21).

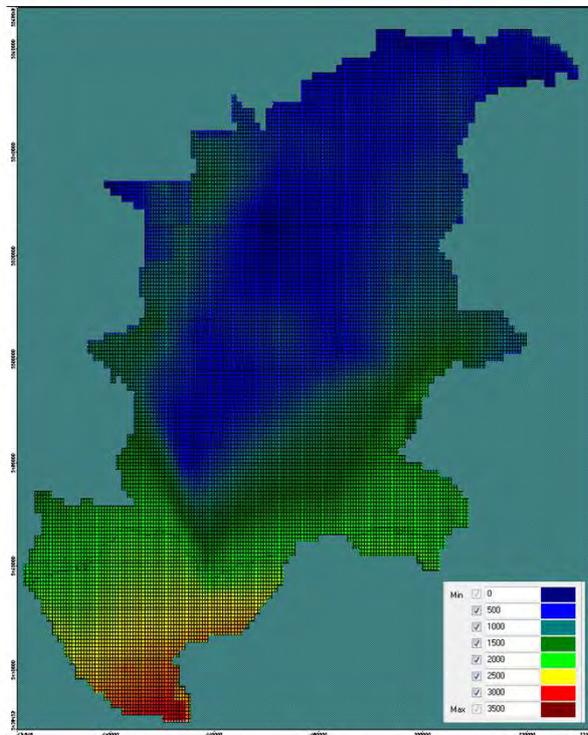


Figura 3-36. Espesor del acuífero modelado (entre 0 y 3.500 m) (Amphos 21).

3.10.2.4 Discretización espacial: Malla.

Dado que el método numérico de resolución es por diferencias finitas, el mallado obedece a las restricciones propias del método: celdas paralelepípedicas (prismas de base cuadrada, en 3D). La discretización vertical es de una celda o "layer", dado que no se esperan gradientes verticales ni confinamientos a escala regional (Figura 3-37). Arealmente, el tamaño de las celdas es de 590 x 730 m, suponiendo un nivel de detalle suficiente para representar el funcionamiento de las relaciones río-acuífero a gran escala. En total, el modelo tiene 40.000 celdas entre activas e inactivas, para cubrir una extensión total de 110 x 138 km (15,180 km²). La Figura 3-37 muestra la malla utilizada.

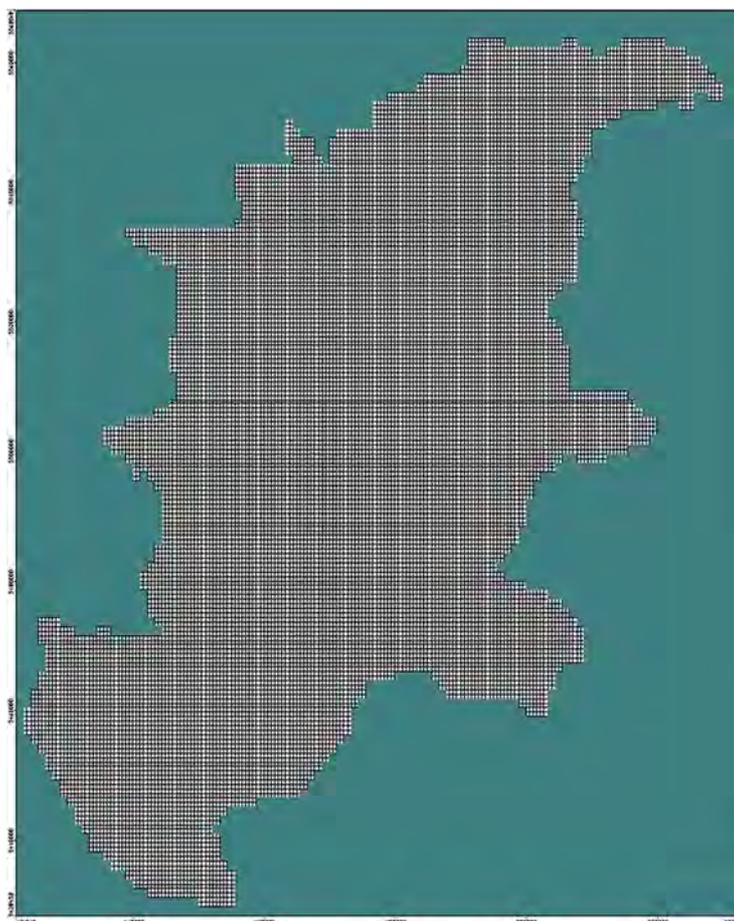


Figura 3-37. Malla regional del modelo numérico de la cuenca de Río Bueno (Amphos 21).

3.10.2.5 Régimen de simulación

Las simulaciones se realizaron en régimen estacionario, con un tiempo de cálculo de un día. El escaso conocimiento del área estudiada, así como la ausencia de monitoreo de los niveles del agua subterránea provocan que la representación del modelo en estado estacionario sea la más adecuada para mostrar su funcionamiento general y verificar el modelo conceptual asumido.

3.10.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno de un modelo numérico representan los parámetros (niveles, conductancias, valor de la recarga, caudales de extracción) que dominan el comportamiento del modelo conceptual en la zona (Figura 3-38).

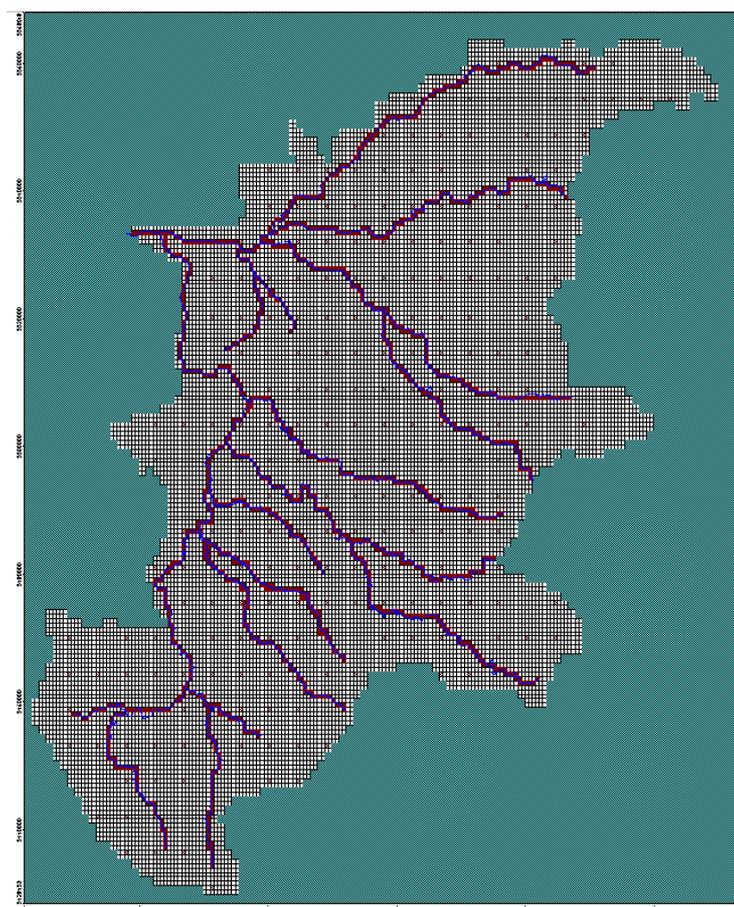


Figura 3-38. Condiciones de contorno del modelo (caudal nulo en los bordes, condición de río y principales puntos de bombeo del agua subterránea) (Amphos 21).

El modelo de la cuenca de Río Bueno presenta las siguientes condiciones de contorno:

- Internas:
 - Pozos de bombeo: los bombeos de las aguas subterráneas dentro del modelo corresponden a los expedientes de los Derechos de Agua concedidos a la fecha del presente estudio. Estos representan el aprovechamiento actual de las aguas subterráneas en la zona, considerando que dicho uso es aún menor en la realidad de lo que se representa en el modelo. Posteriormente al calibrado del modelo se realiza una simulación con los caudales reales estimados, realizando una descripción de la modificación del comportamiento respecto al caso inicial.

- Externas
 - Caudal nulo en la base y en los límites exteriores.
 - Condición de río (nivel fijo más coeficiente de goteo): la condición de contorno fijada en los cauces superficiales de la zona modelizada se han tratado con la "condición río", que supone un nivel constante y un valor de la conductancia (permeabilidad) del lecho del río, que simula la relación río-acuífero en cada celda de la malla.
 - Recarga: se realizó una zonación de la recarga para todo el dominio activo del modelo numérico, dando diferentes valores en función de la precipitación y los índices de infiltración del suelo.

3.10.3.1 Tratamiento de los Derechos de Agua en el modelo

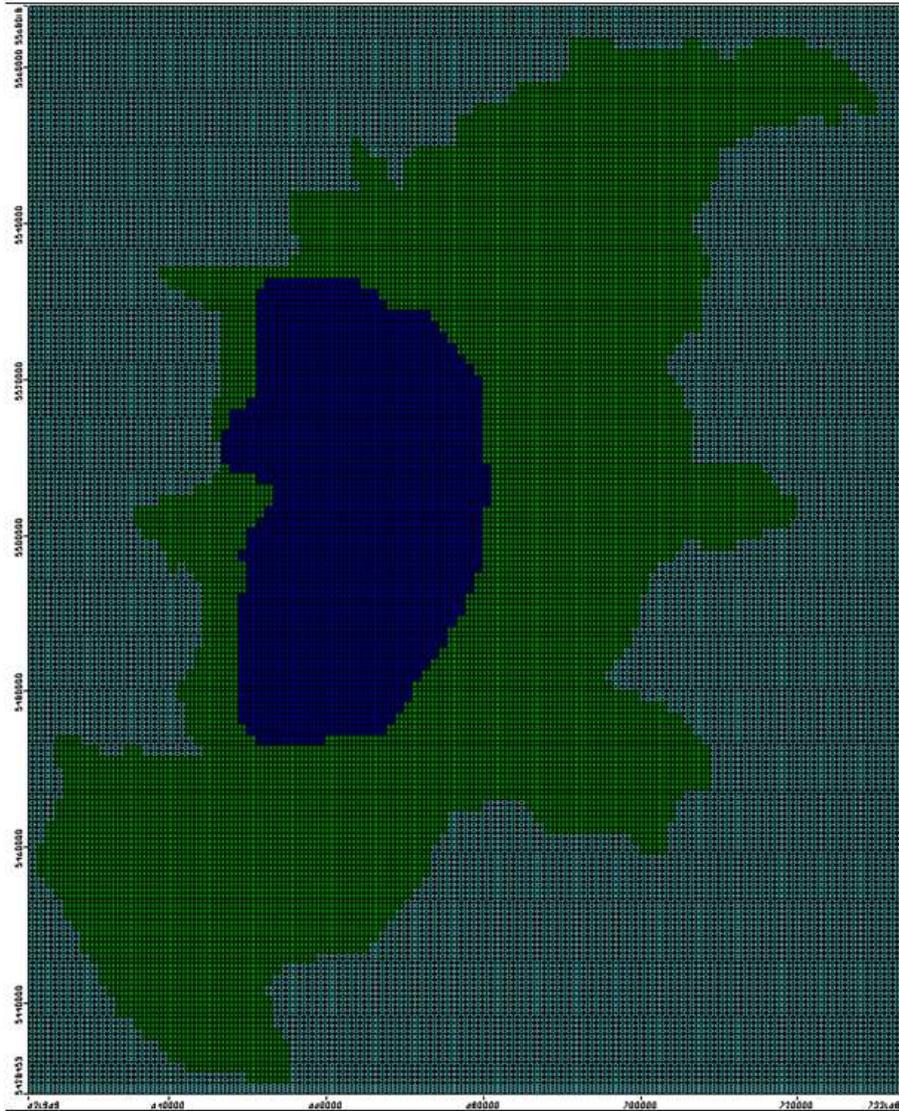
En la modelación numérica de la cuenca del río Bueno han sido aplicados un total de 1.188 Derechos de Agua Subterráneas Concedidos a la fecha de realización del presente estudio. Para realizar un manejo más eficiente de los puntos de extracción de agua se realizó la unificación de los derechos de agua en base a una malla de 25 por 25 celdas, con un ancho por largo de las misma de 4.4 por 5.5 km. De esta manera, descontando los puntos en las zonas inactivas del modelo (en color verde), se han obtenido un total de 244 puntos de extracción. Estos se encuentran distribuidos en toda el área del acuífero.

El caudal total de extracciones correspondiente a los Expedientes de Derechos de Agua Concedidos es de un total de 11.173 l/s.

Cabe destacar que, según lo observado en terreno y analizado en el modelo conceptual, del total de Derechos de Agua Concedidos, solo un pequeño porcentaje serían efectivamente utilizados (entorno al 10%). Se denota la existencia de numerosas concesiones de carácter estratégico (solicitudes que evitan la concesión del Derecho de Agua de parcelas contiguas) y la existencia de extracciones de agua no concesionadas en muchos puntos. Este hecho provoca que el error en la cuantificación de los volúmenes explotados sea muy grande, lo que, en el estado actual de conocimiento, no sería posible realizar.

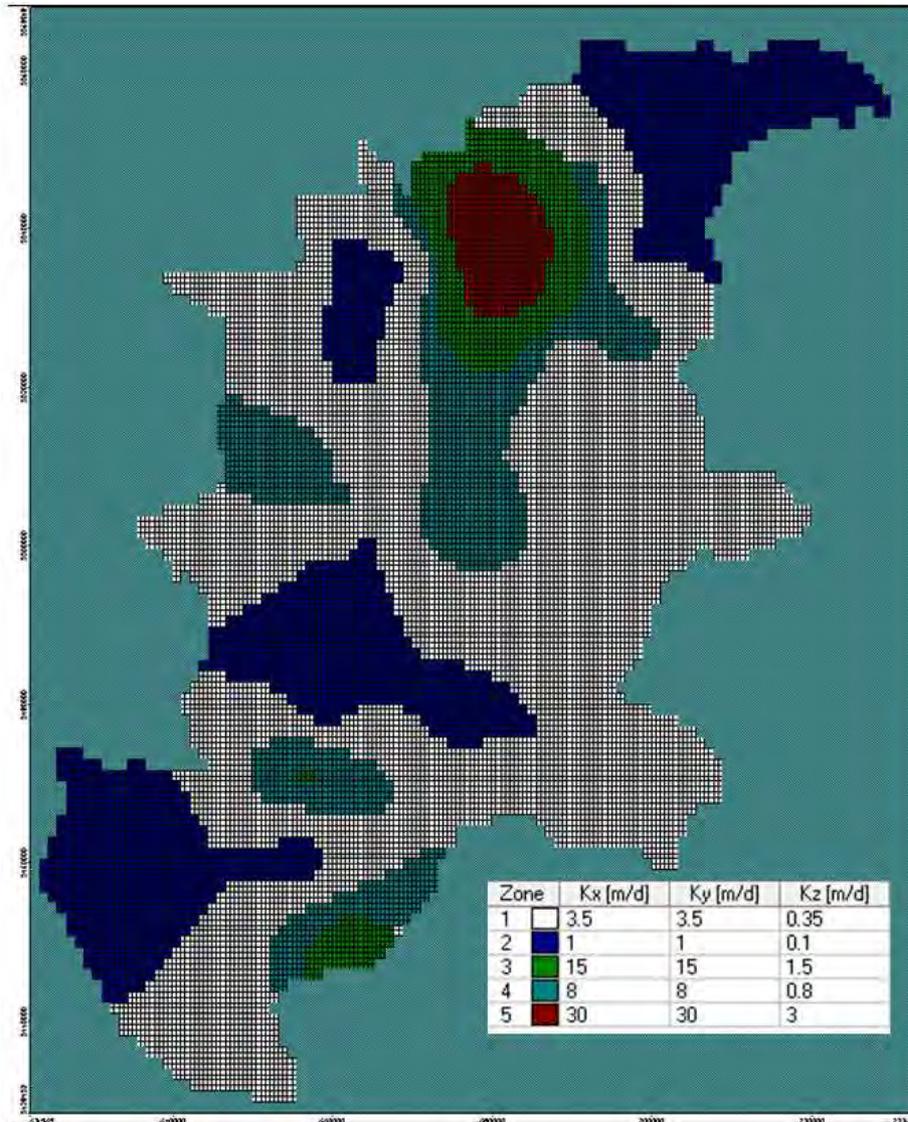
3.10.4 Distribución de los Parámetros

El modelo se ha zonificado de forma consistente al modelo conceptual para la función de recarga (Figura 3-39), la conductividad hidráulica de los acuíferos (Figura 3-40) y el coeficiente de almacenamiento específico (Figura 3-41).



Zona	Recarga (mm/año)
Zona 2 (color azul oscuro)	105
Zona 3 (color verde intenso)	158

Figura 3-39 Distribución y valores de la recarga en el dominio modelado (Amphos 21).



Zona	Conductividad hidráulica (m/día)		
	k_x	k_y	k_z
Zona 1 (color blanco)	3,5	3,5	0,3
Zona 2 (color azul oscuro)	1,00	1,00	0,1
Zona 3 (color verde claro)	15,00	15,00	1,5
Zona 4 (color verde)	8,00	8,00	0,8
Zona 5 (color rojo)	30,00	30,00	3,0

Figura 3-40. Distribución de la conductividad hidráulica en el acuífero (Amphos 21).

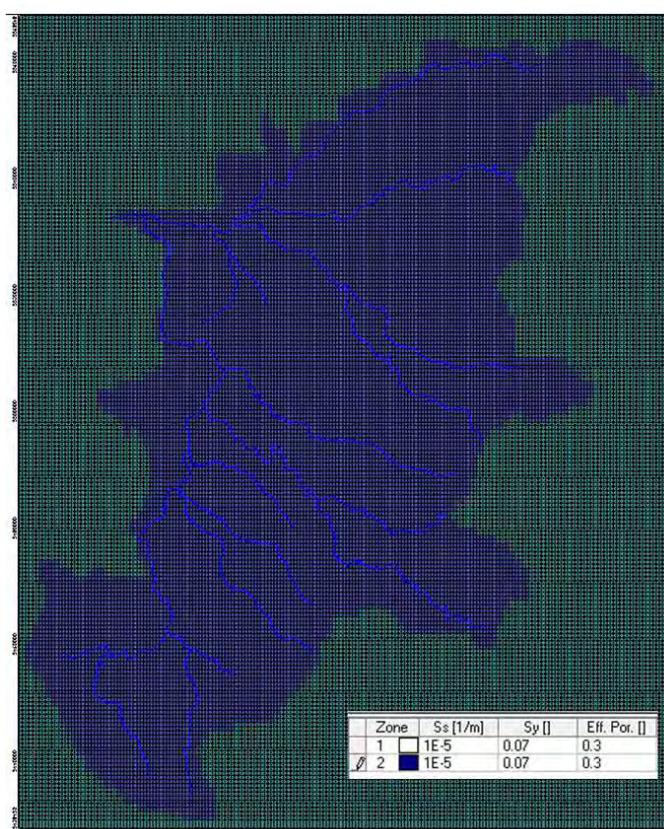
La ecuación que define el coeficiente de almacenamiento es la siguiente:

$$S = S_y + b * S_s$$

Donde:

- S: Coeficiente de almacenamiento
- S_y: Capacidad específica
- S_s: Coeficiente de almacenamiento específico
- b: Espesor saturado del acuífero

Los valores de estos parámetros para el modelo de río Bueno se pueden observar en la figura Figura 11 8.



Zona	Coeficiente de almacenamiento (adimensional)			
	Ss (1/m)	Sy	Eff.Por	Tot.Por
Zona 2 (color azul oscuro)	1*10 ⁻⁵	0.07	0,3	0,4

Figura 3-41. Distribución del coeficiente de almacenamiento específico y capacidad específica en el dominio modelado (Amphos 21).

3.10.5 Calibración del modelo

El criterio de calibración del modelo se fijó en la reproducción lo más fiel posible de los balances de agua, la reproducción de los niveles freáticos en los puntos de observación y la campaña de aforos realizada por la Universidad de Concepción para el presente proyecto. Para ello, se han modificado tanto los valores la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y la conductancia en los ríos. El mejor ajuste alcanzado se denominó Caso Base.

Para la calibración se usaron 26 pozos de observación cuyos niveles estáticos fueron obtenidos de la campaña de terreno realizada por Amphos 21 en los meses de septiembre y octubre del año 2012, en las Regiones de Los Ríos y de Los Lagos. Los valores de dichas mediciones se muestran en la tabla 3-11 y su ubicación dentro del modelo de Río Bueno en la figura 3-42.

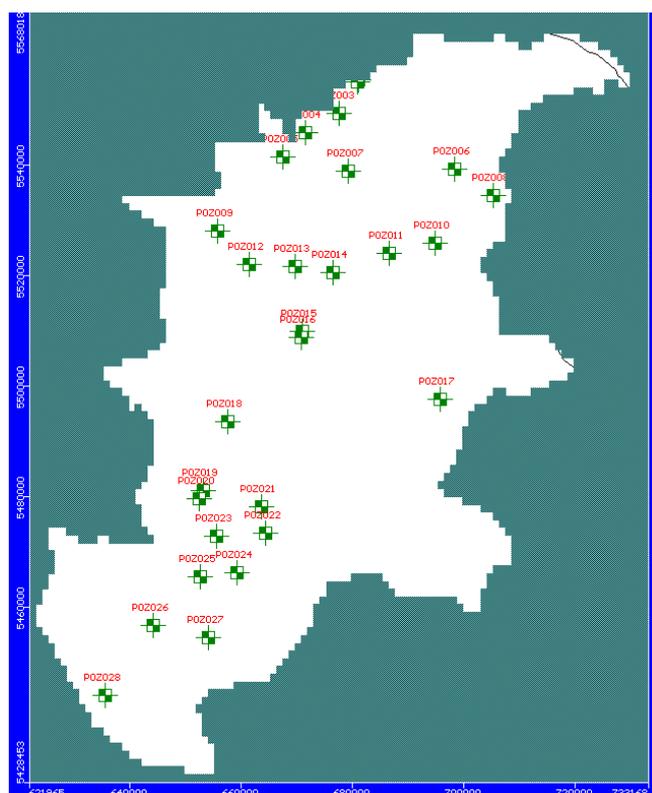


Figura 3-42. Ubicación de los puntos con información de niveles obtenidos en la campaña de terreno en las regiones de Los Ríos y Los lagos (Amphos 21).

Tabla 3-11. Ubicación de los puntos con información de niveles utilizados en la calibración del modelo numérico del Río Bueno.

Pozo	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Nivel [msnm]
POZO01	680839	5554806	111.8
POZO02	680693	5554448	112.2
POZO03	677237	5548788	102.1
POZO04	671257	5545340	40.1
POZO05	667142	5540967	23.8
POZO06	679018	5538231	52.1
POZO07	705052	5533974	149.6
POZO08	694576	5525218	143.4
POZO09	686321	5523405	111.5
POZO10	661160	5521502	40.6
POZO11	669435	5521040	28.0
POZO12	676119	5519917	49.4
POZO13	670797	5509397	86.6
POZO14	670545	5508238	85.5
POZO15	695449	5497118	166.7
POZO16	657281	5493092	53.1
POZO17	653004	5480498	69.9
POZO18	652130	5479106	57.9
POZO19	663348	5477641	97.9
POZO20	664078	5472830	111.1
POZO21	655340	5472378	88.2
POZO22	658928	5465719	107.6
POZO23	652423	5464944	85.6
POZO24	643891	5456073	102.8
POZO25	653924	5453935	103.1
POZO26	635266	5443501	134.5

Para las conductancias de los ríos, se asumió un valor inicial de 5000 m²/d. Luego, estos valores se han ido disminuyendo gradualmente para poder calibrar el modelo. Después de muchas iteraciones, los valores de la conductancia que entregan los mejores resultados son los que se muestran en la Figura 3-43.

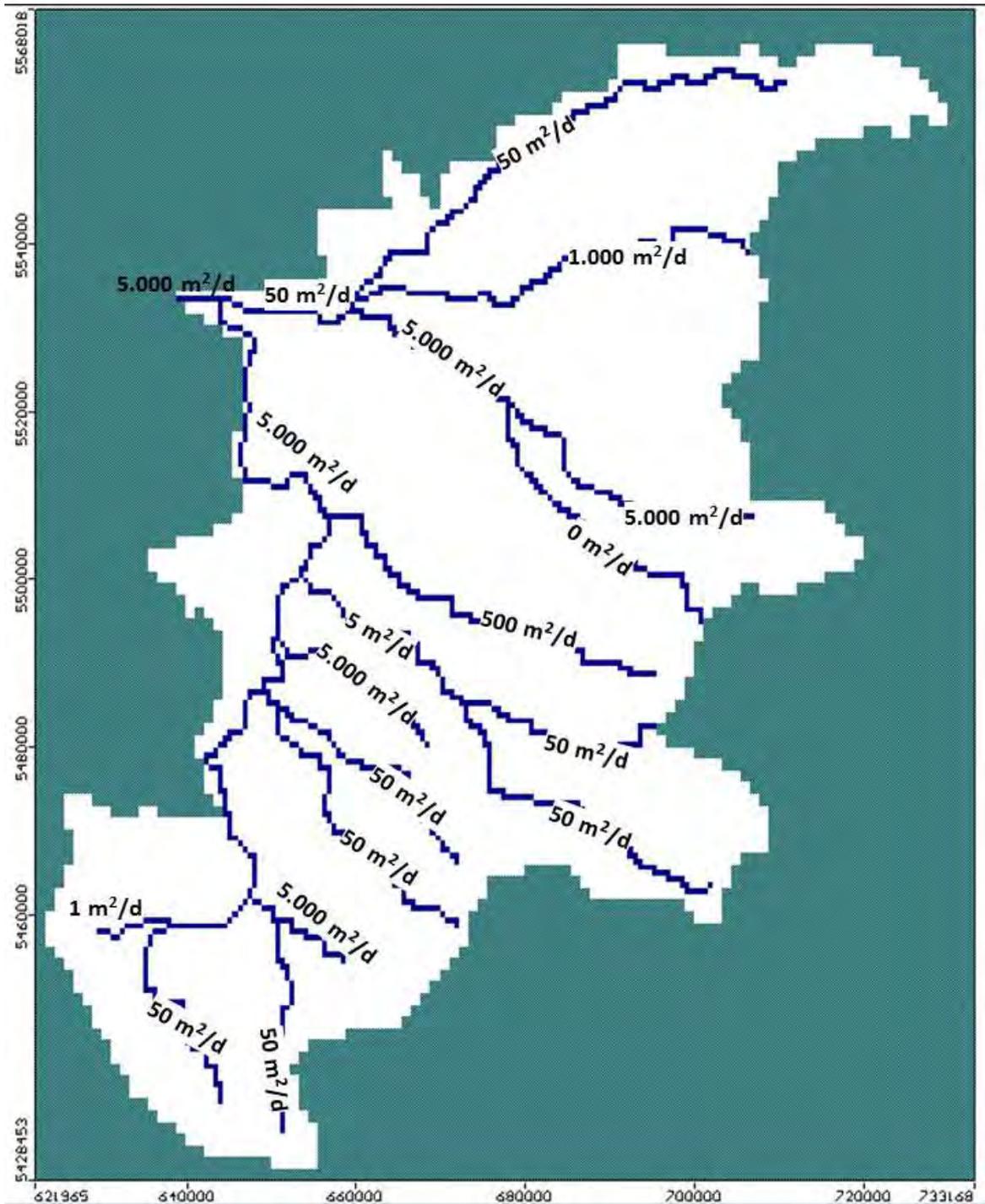


Figura 3-43. Distribución final de la conductancia de las celdas tipo río en el modelo numérico del Río Bueno para el Caso Base después de la calibración (Amphos 21).

Tabla 3-12. Conductividades hidráulicas del Caso Base después de calibración (Amphos 21)

Zona	Conductividad hidráulica (m/d)		
	Kx	Ky	Kz
Zona 1	3,5	3,5	0,3
Zona 2	1,00	1,00	0,1
Zona 3	1,00	1,00	0,1
Zona 4	1,00	1,00	0,1
Zona 5	30,00	30,00	3,0

Tabla 3-13. Valores de Ss para los acuíferos en el Caso Base después de calibración (Amphos 21).

Zona	Almacenamiento acuífero	
	Ss	Sy
Zona 2	$1 \cdot 10^{-5}$	0.07

3.10.5.1 Error del modelo

Para el Caso Base con 26 pozos de observación luego de calibrar de forma manual la conductancia de distintos tramos de los ríos y modificar los valores de la conductividad hidráulica, se obtuvo un valor del error cuadrático medio (RMS) igual a 9.047 %. Los detalles de los resultados de la calibración se pueden observar en la figura 3-44.

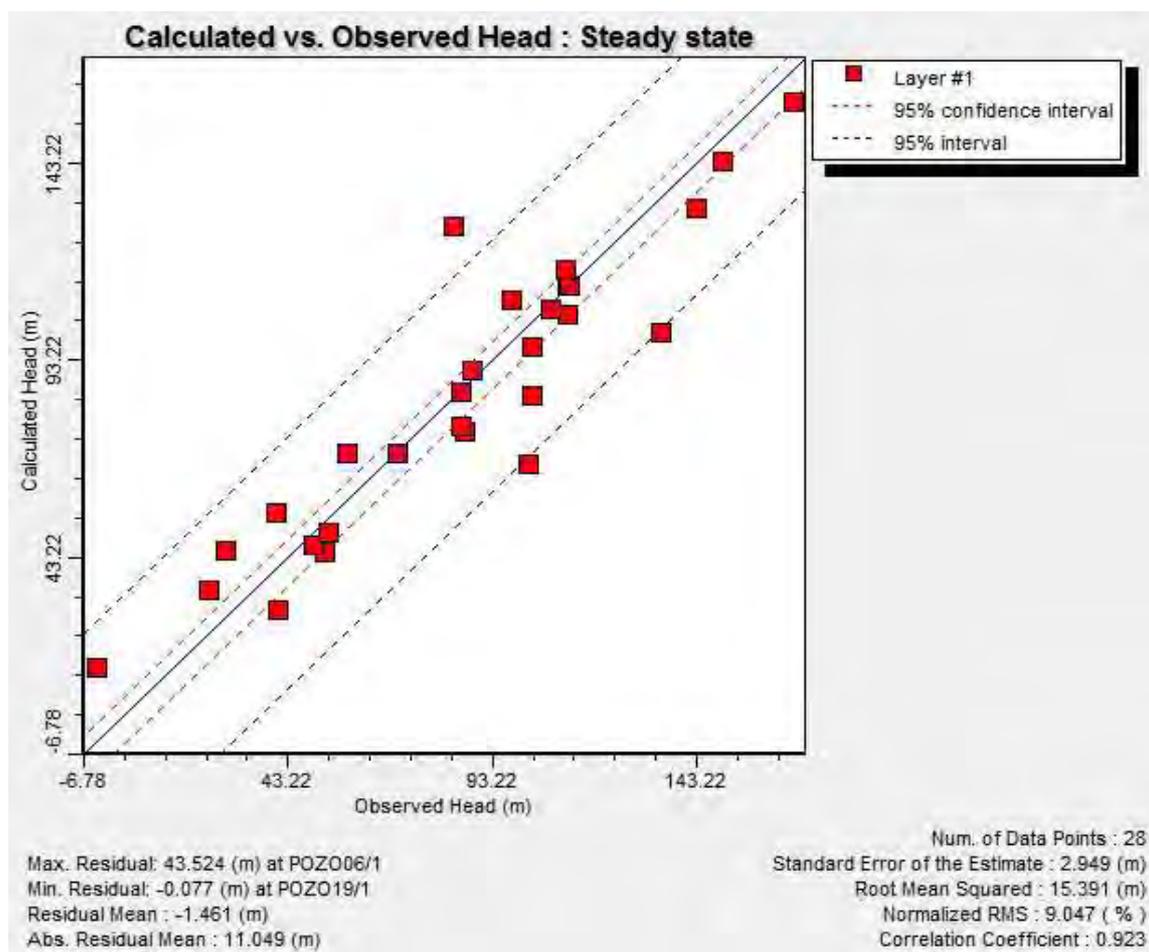


Figura 3-44. Valores de los niveles observados y calculados por el modelo del Río Bueno junto con los parámetros estadísticos obtenidos después de la calibración del Caso Base (Amphos 21).

3.10.6 Escenarios planteados

3.10.6.1 Caso Base

El Caso Base, como ya se mencionó, es aquel que en el proceso de calibración del modelo numérico ha conseguido un mayor ajuste de los niveles y caudales en la cuenca del Río Bueno, del cual se extraen un 10% del total de los derechos otorgados.

El análisis de los niveles y su comparación con el caso de la explotación de los Derechos de Agua Subterránea Concedidos, evidencia una escasa influencia de estos en la situación general de niveles en la zona en que se producen. De esta manera, se mantiene el funcionamiento general del acuífero en la cuenca seleccionada.

La relación río-acuífero es, casi en su totalidad, a favor de los ríos, manteniendo estos un régimen efluente, como ya se asumió en el modelo conceptual.

La recarga es igual a 2.797.640 m³/día, este valor es menor a los 3.456.000 m³/día estimado para el modelo conceptual debido a que se definieron dos nuevas zonas con valores de recarga de 148 y 131 mm/año para la implementación del modelo numérico.

El flujo subterráneo se dirige principalmente hacia los ríos, debido a que el nivel freático se encuentra por sobre el nivel del agua de los cauces en la mayor parte de la cuenca y el principal río drenante es el río Bueno en la totalidad de su extensión.

La extracción desde los pozos corresponde a un 3,3% de la recarga superficial, cuando se ocupan un 10% de los derechos subterráneos otorgados. En un escenario donde se ocupen un 100% de dichos derechos, el flujo hacia los ríos será menor y habrá una disminución de los niveles freáticos.

La figura 3-45 y la tabla 3.14 dan cuenta de la gran importancia de los ríos en el sistema modelado.

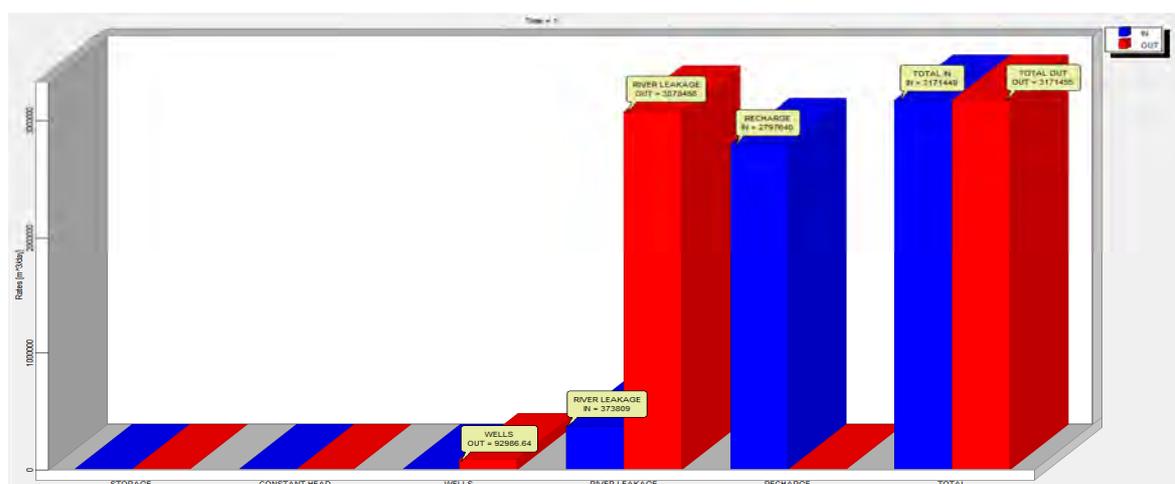


Figura 3-45. Balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de los Derechos Concedidos (Amphos 21).

Tabla 3-14. Resumen del balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con el 10% de Derechos Concedidos (Amphos 21).

FLUJOS DE ENTRADA	m³/d
Recarga de riego y precipitaciones	+2.797.640
Recarga desde cauces	+373.809
Total flujo de entrada	+3.171.449
FLUJOS DE SALIDA	m³/d
Pozos de bombeo	-92.986
Recuperaciones a los cauces	-3.078.468
Total flujo de salida	-3.171.455

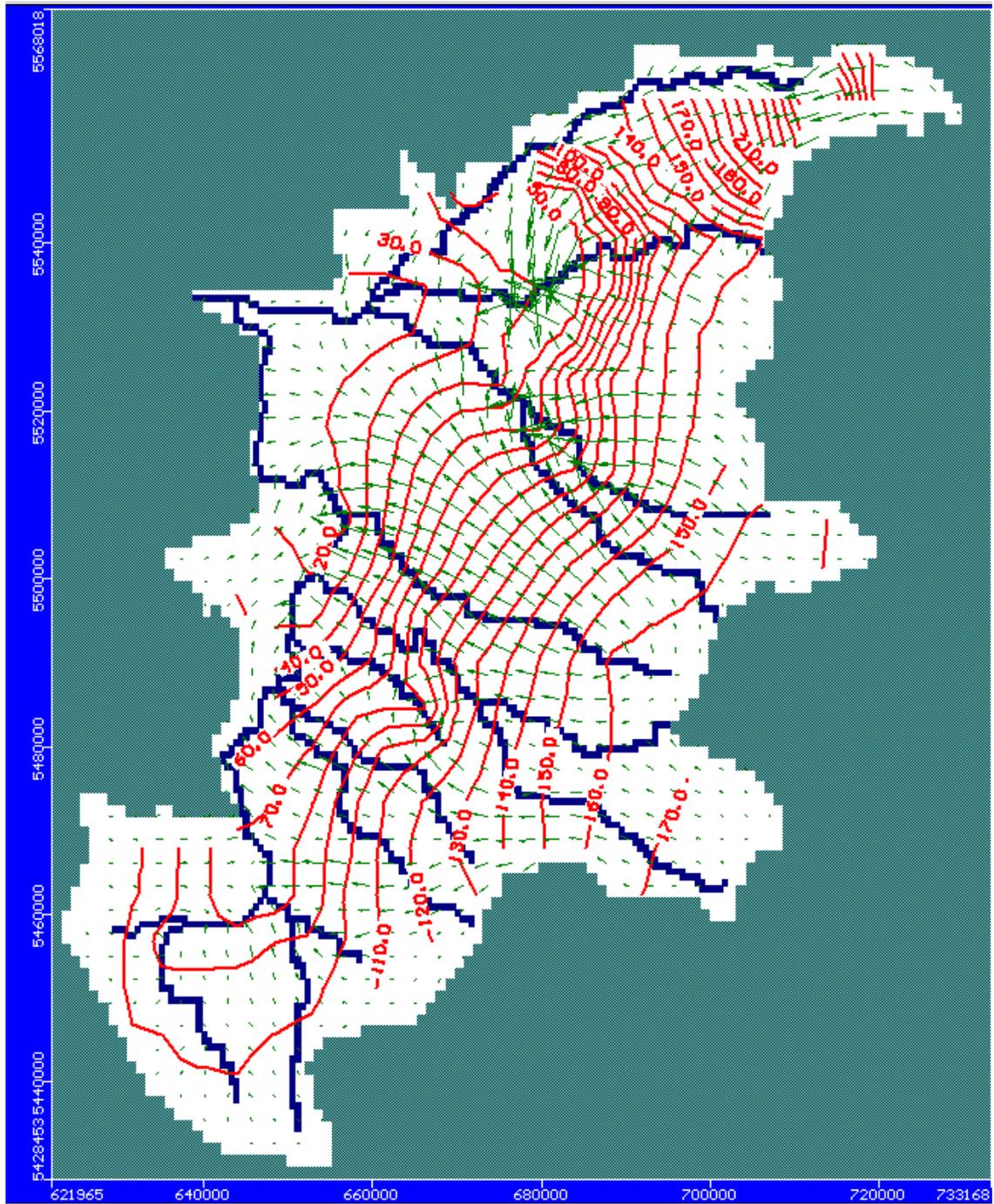


Figura 3-46. Caso Base con la explotación total de un 10% de los Derechos de Agua Concedidos (equidistancia de la piezometría igual a 10 m) (Amphos 21).

3.10.6.2 Explotación de los Derechos de Agua Concedidos

Este escenario plantea una explotación del 100% de los Derechos de Agua Concedidos en la cuenca del Río Bueno. Esto equivale a 929.866 m³/día de extracciones por bombeo, considerando un régimen de explotación continuo. El comportamiento de los niveles se puede observar en la Figura 3-47.

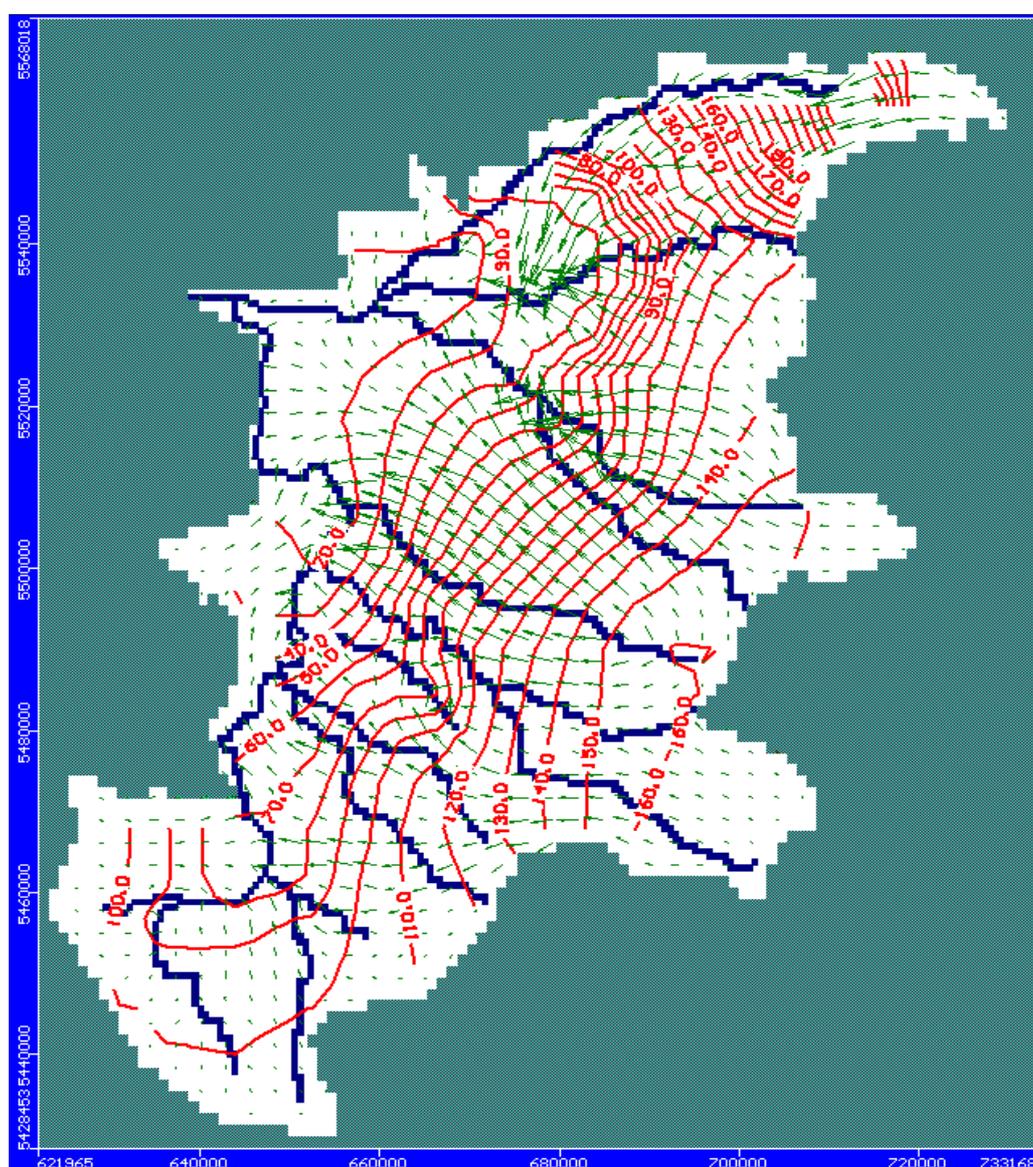


Figura 3-47. Situación de niveles en el área de Río Bueno en el caso de la explotación total de los Derechos de Agua Concedidos (equidistancia de la piezometría igual a 10 m) (Amphos 21).

Aunque las extracciones son altas no se observan descensos considerables (Figura 3-47) o zonas donde las celdas se sequen por lo cual el acuífero es capaz de satisfacer una demanda de agua de esa envergadura. El balance hídrico de este escenario junto con un resumen de los caudales del sistema se puede observar en la figura 3-48 y tabla 3-15.

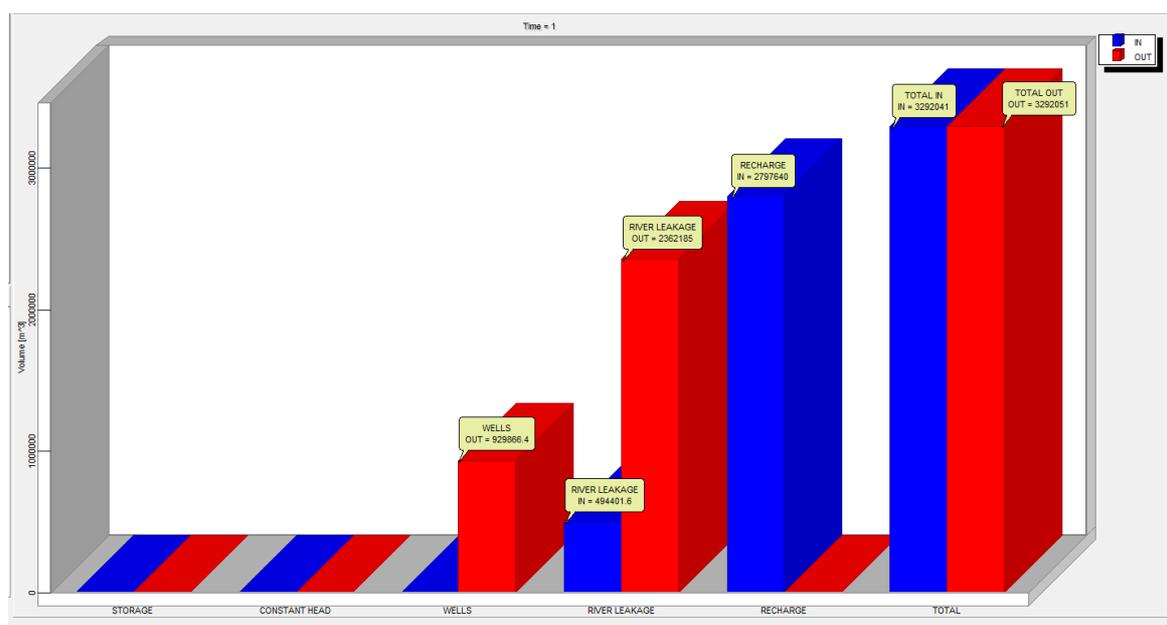


Figura 3-48. Balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 100% de los Derechos Concedidos (Amphos 21).

Tabla 3-15. Resumen del balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de Derechos Concedidos (Amphos 21).

FLUJOS DE ENTRADA	m³/d
Recarga de riego y precipitaciones	+2.797.640
Recarga desde cauces	+494.401
Total flujo de entrada	+3.292.041
FLUJOS DE SALIDA	m³/d
Pozos de bombeo	-929.866
Recuperaciones a los cauces	-2.362.185
Total flujo de salida	-3.292.051

3.10.6.3 Explotación de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite

En este caso, se planteó un escenario real (10%) de explotación de los Derechos de Agua Concedidos (hasta la fecha) en que se añade un estimativo de la explotación de los Derechos de Agua en Trámite (10%). Ello permite prever la respuesta general del funcionamiento del acuífero (figura 3-49) en las condiciones futuras, mejorando su gestión.

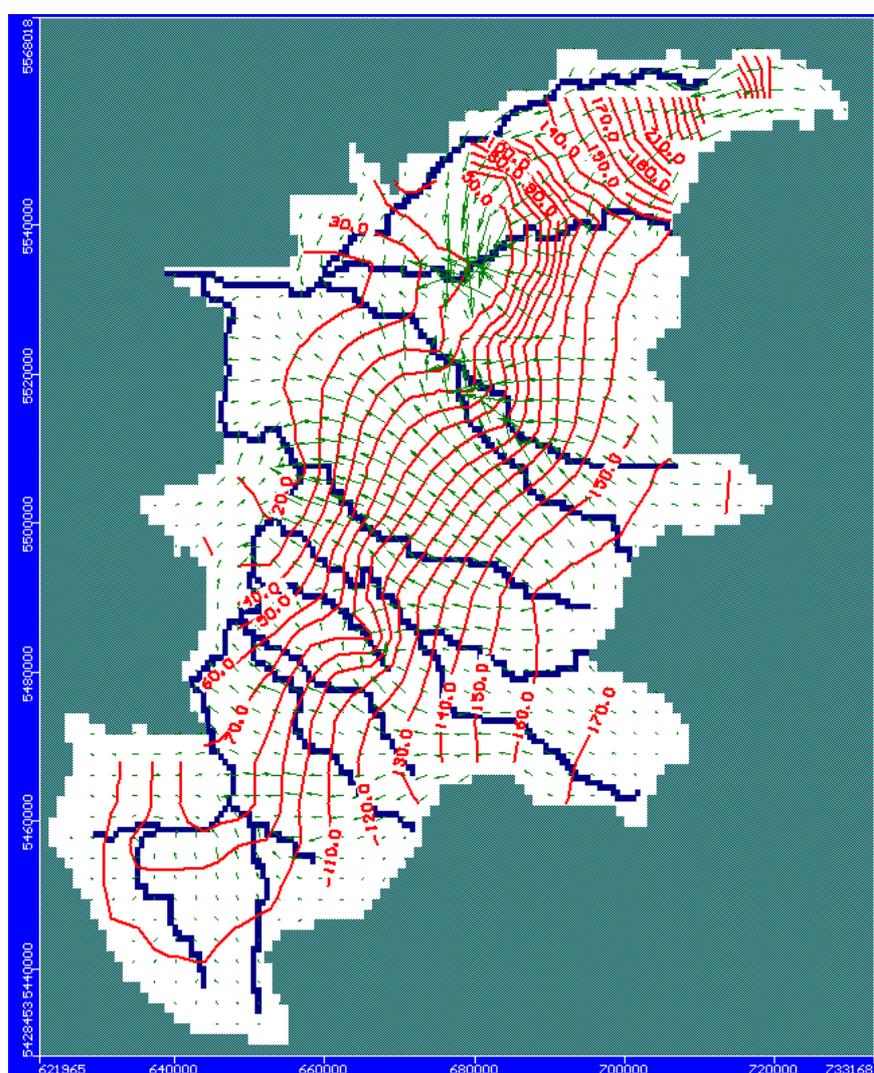


Figura 3-49. Escenario de explotación de un 10% de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite en el acuífero del Río Bueno (equidistancia de la piezometría igual a 10 m) (Amphos 21).

En este escenario los bombeos aumentaron un 11% en relación al caso base y el resultado del balance es muy parecido al caso original de modelación. Los resultados de este balance se encuentran en la figura 3-50 y tabla 3-16.

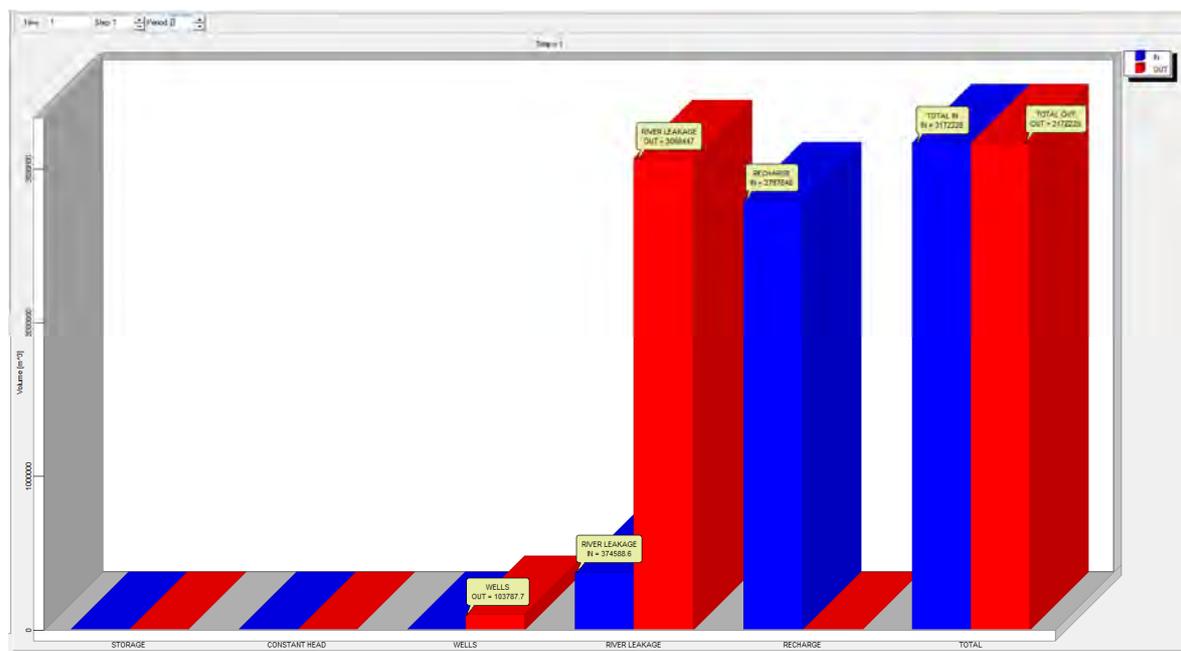


Figura 3-50. Balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de los Derechos Concedidos y en Trámite (Amphos 21).

Tabla 3-16. Resumen del balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de Derechos Concedidos y en Trámite (Amphos 21).

FLUJOS DE ENTRADA	m³/d
Recarga de riego y precipitaciones	+2.797.640
Recarga desde cauces	+374.588
Total flujo de entrada	+3.172.228
FLUJOS DE SALIDA	m³/d
Pozos de bombeo	-103.787
Recuperaciones a los cauces	-3.068.447
Total flujo de salida	-3.172.234

3.10.6.4 Explotación de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite al 100 %.

En este caso, se planteó un escenario real (100%) de explotación de los Derechos de Agua Concedidos (hasta la fecha) en que se añade un estimativo de la explotación de los Derechos de Agua en Trámite (100%). Ello permite prever la respuesta general del funcionamiento del acuífero (Figura 3-51) en las condiciones futuras, mejorando su gestión.

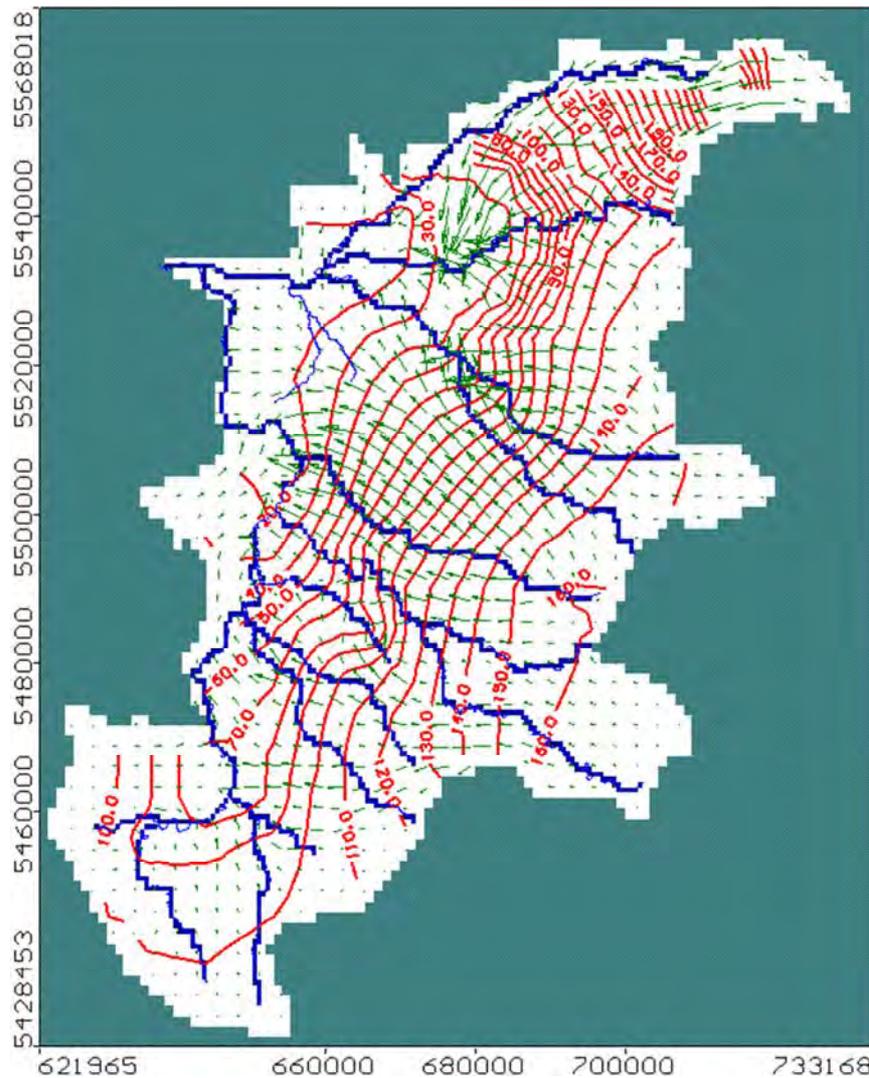


Figura 3-51. Escenario de explotación de un 100% de los Derechos de Agua Concedidos y en Trámite en el acuífero del Río Bueno (equidistancia de la piezometría igual a 10 m) (Amphos 21).

En este escenario los bombeos aumentaron de 92.986 a 908.764 en relación al caso base y el resultado del balance es muy parecido al caso original de modelación. Los resultados de este balance se encuentran en la figura 3-50 y tabla 3-16.

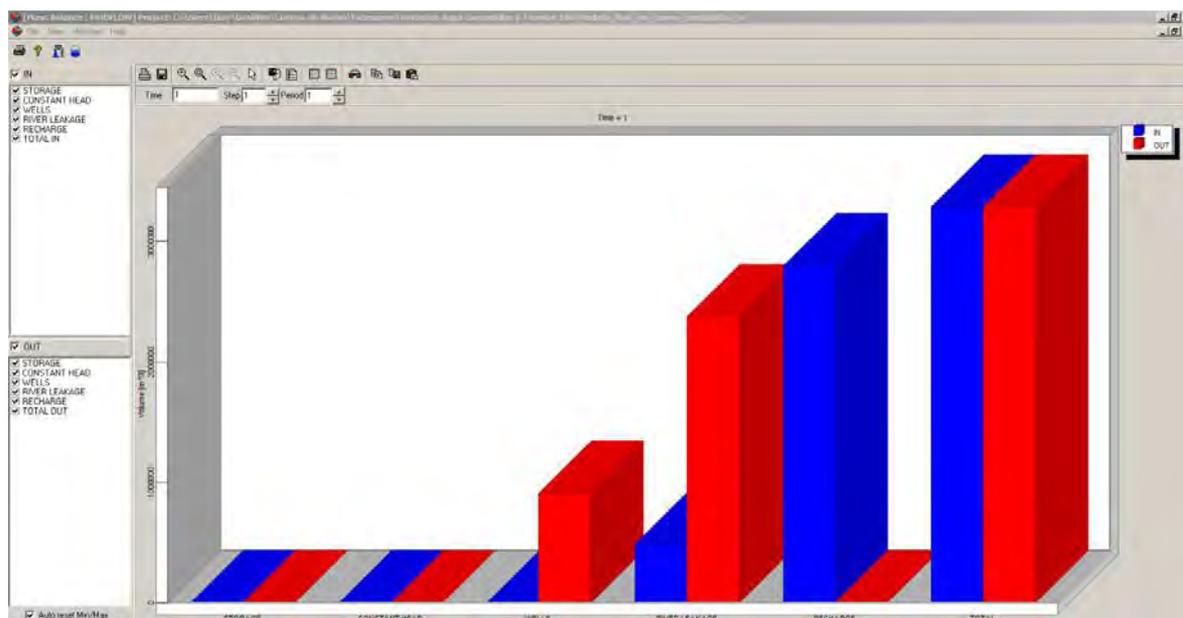


Figura 3-52. Balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 10% de los Derechos Concedidos y en Trámite (Amphos 21).

Tabla 3-17. Resumen del balance hídrico global para el modelo de Río Bueno calibrado con un bombeo del 100% de Derechos Concedidos y en Trámite (Amphos 21).

FLUJOS DE ENTRADA	m³/d
Recarga de riego y precipitaciones	+2.797.640
Recarga desde cauces	+488.540
Total flujo de entrada	+3.286.180
FLUJOS DE SALIDA	m³/d
Pozos de bombeo	-908.764,1
Recuperaciones a los cauces	-2.377.422
Total flujo de salida	-3.286.186

El escenario planteado es exagerado en cuanto a los volúmenes extraídos, que en ningún momento serán los que se explotan en la realidad. Las cantidades de explotación que aparecen en los expedientes de derechos de agua no son en ningún momento los que realmente se explotan, puesto que la gran mayoría corresponden a explotaciones discontinuas del recurso y, en muchos casos, a recursos no utilizados. La situación que refleja estaría muy alejada de la realidad del funcionamiento del acuífero y no ayuda demasiado al planteamiento de escenarios de gestión hídrica.

3.10.6.5 Comparación de los 4 escenarios de modelación

Las diferencias en el balance hídrico y los niveles obtenidos en la modelación entre el caso base y el escenario 4 son muy pequeñas, por lo que una aprobación de todos los derechos en trámite no tendría ninguna repercusión en el acuífero. Al aumentar los bombeos reales 10 veces, el flujo subterráneo que termina en los cauces de la región disminuye en un 23%. El resumen del balance hídrico para los 3 escenarios se muestra en la Tabla 3-18.

Tabla 3-18. Resumen del balance hídrico global para los 3 escenarios de modelación (Amphos 21).

	Caso Base Bombeos 10% de los derechos concedidos	Escenario 2 Bombeos 100% de los derechos concedidos	Escenario 3 Bombeos 10% de los derechos concedidos y en trámite	Escenario 4 Bombeos 100% de los derechos concedidos y en trámite
FLUJOS DE ENTRADA	m³/d	m³/d	m³/d	m³/d
Recarga de riego y precipitaciones	+2.797.640	+2.797.640	+2.797.640	+2.797.640
Recarga desde cauces	+373.809	+494.401	+374.588	+488.540
Total flujo de entrada	+3.171.449	+3.292.041	+3.172.228	+3.286.180
FLUJOS DE SALIDA	m³/d	m³/d	m³/d	m³/d
Pozos de bombeo	-92.986	-929.866	-103.787	-908.764,1
Recuperaciones a los cauces	-3.078.468	-2.362.185	-3.068.447	-2.377.422
Total flujo de salida	-3.171.455	-3.292.051	-3.172.234	-3.286.186

4. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda realizar geofísica de tipo TEM en la cuenca del río Valdivia que complete el conocimiento interno de las unidades acuíferas, utilizando para ellos la geofísica del presente estudio.
- ✓ A fin de poder contar con información útil, confiable y que permita resumir los datos presentes en las Solicitudes de Derecho de Agua, se recomienda la creación y uso de una BDD única a nivel Regional o Nacional centralizada.
- ✓ Con el objetivo de incrementar el alcance de este estudio, se sugiere implementar una red de monitoreo del nivel freático, con la finalidad de evaluar el comportamiento del acuífero mediante la variación de los niveles de agua del acuífero.
- ✓ Para poder profundizar en el conocimiento de los parámetros hidráulicos, se recomienda realizar pruebas de bombeo de mejor calidad que incluyan pozos de observación y duraciones adecuadas que permitan la estimación de la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.
- ✓ La cuantificación del balance hídrico ha sido aproximada y se han estimado algunos valores debido a la escasez de los datos (mayor incertidumbre en el estudio de la cuenca del río Valdivia). Para evaluar el balance hídrico de una manera más detallada se recomienda la revisión, análisis y posible modificación de la red de aforos en los cauces existentes.
- ✓ Los modelos numéricos elaborados en el presente estudio tienen un carácter cualitativo más que cuantitativo debido a la escasez de los datos existentes para la calibración y correcta validación del producto final. No obstante, los modelos ha obtenido buenas respuestas, reflejando en buena forma el modelo conceptual descrito.

Bibliografía

- Anderson, M.P. and W.W. Woessner. Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego, CA. 2002
- Depto. MM y Desarrollo Sostenible. Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos en Chile. Santiago, 2011
- DIRECCION GENERAL DE AGUAS. Mejoramiento y ampliación de la red de aguas subterráneas, regiones VII a X, 2010.
- DIRECCION GENERAL DE AGUAS. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Bueno. 2004.
- DIRECCION GENERAL DE AGUAS. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Valdivia. 2004
- Escalona, E. Modelación hidrogeológica de los acuíferos en la cuenca del Rio Bueno en la X Región, 2004.
- Escuela Superior Politécnica del Litoral. Caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Valdivia. 2010.
- Harbaugh, A.W. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p. 2005
- IHS Consultores. Estudio Hidrogeológico Localidad rural de Cabo Blanco, Comuna de Valdivia, Provincia de Valdivia, Región de los Ríos. 2011.
- IHS Ingenieros. Estudio Hidrogeológico Servicio APR Curriñe-Chabranco, comuna de Futrono, provincia del Ranco, Región de los Ríos. 2011.
- IHS Ingenieros. Estudio Hidrogeológico Servicio APR Las Pataguas de Pilmaiquén, comuna de La Unión, provincia Del Ranco, Región de Los Ríos. 2011.
- IHS Ingenieros. Estudio Hidrogeológico Servicio APR Ponhuipa, comuna de Río Bueno, provincia Del Ranco, Región de Los Ríos. 2011.
- IHS Ingenieros. Estudio Hidrogeológico Servicio APR Puerto Las Rosas, comuna de Futrono, provincia Del Ranco, Región de Los Ríos. 2011.
- IHS Ingenieros. Estudio Hidrogeológico Servicio APR Rofuco Alto, comuna de La Unión, provincia Del Ranco, Región de Los Ríos. 2011.

Jara, C. Usos actuales y potenciales de los depósitos sedimentarios del último interglacial en Valdivia, X Región, Chile. Sernageomin Puerto Varas, 2002.

Karzulovic, J. Informe sobre el agua subterránea en la ciudad de Valdivia, 1960.

Milovi, J.J. Flood analysis in the Valdivia basin, Chile: recurrence and causes. Sernageomin Puerto Varas, 2002.

MOP-DGA. Mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas, regiones VII a X. 2010.

MOP-DGA. Exploración de los recursos hídricos subterráneos VII Región. 1999.

Parada, M. Estudio geológico de los alrededores de los Lagos Calafquén, Panguipulli y Riñihue, provincia de Valdivia. Universidad de Chile, 1975.

Schlumberger Water Services. Visual Modflow 2010.1. User's Manual. Canadá, 2010.

SERNAGEOMIN. Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea del valle central de la región de Los Lagos. 2008.

SERNAGEOMIN. Caracterización de los acuíferos del área de Valdivia. 2002.

SERNAGEOMIN. Caracterización de los acuíferos del área de Valdivia. 2002, Santiago, 2002.

Vitezslav, Z; Conn, H; Tabak, M (). Estudio geoquímico de los productos de intemperismo de las rocas ultrabásicas (serpentinitas) en la provincia de Valdivia, Chile. Revista Geológica de Chile N°1, 1974.

Anexo A – Fichas de antecedentes

Anexo A.1 – Existentes Disponibles (ED)

Título Publicación	Fecha	Autor
Caracterización de los acuíferos del área de Valdivia	2008	SERNAGEOMIN

Tipo de Documento	Fuente
Artículo científico	SERNAGEOMIN

Resumen

Resumen de trabajo que entrega información preliminar sobre principales características de los acuíferos de las cuencas San José de la Mariquina y Valdivia: litología, parámetros hidráulicos, estimación de su funcionamiento hidrodinámico y composición química de las aguas.

Información relevante

Clima, precipitación media anual, espesor acuíferos, profundidades, transmisividad, permeabilidad, caudal, nivel estático.

Título Publicación	Fecha	Autor
Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos en Chile	2011	Banco Mundial, Depto. MM y Desarrollo Sostenible

Tipo de Documento	Fuente
Informe	DGA

Resumen

Contiene: antecedentes, situación de recursos hídricos (RH) con énfasis en disponibilidad, uso y calidad de agua. Incluye aspectos legales, institucionales e instrumentos de gestión de RH: antecedentes y desafíos. Factores incidentes en la calidad del agua por cada cuenca hidrográfica del país.

Información relevante

Recursos de agua disponibles, uso de aguas, indicadores agua potable

Título Publicación	Fecha	Autor
Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Bueno	2004	DGA (CADE-IDEPE Consultores en Ingeniería)

Tipo de Documento	Fuente
Informe	SINIA

Resumen

Contiene antecedentes de clima, geología, hidrogeología, suelos y usos e información fluviométrica. Describe descargas a cursos de agua y analiza calidad de aguas y factores incidentes. Incluye análisis de información fluviométrica. Caracteriza calidad de aguas a nivel del cuenca e incluye análisis químicos de metales y otros. Se presentan resultados de aplicación de ICAS para esta cuenca.

Información relevante

Caudal, parámetros de calidad de agua (conductividad eléctrica, DBO5, color aparente, oxígeno disuelto, pH, RAS, sólidos disueltos y suspendidos, inorgánicos, orgánicos, metales)

Título Publicación	Fecha	Autor
Exploración de los recursos hídricos subterráneos VII Región	1999	MOP-DGA (Ayala, Cabrera y Asociados Ltda)

Tipo de Documento	Fuente
Informe + mapas	DGA

Resumen

Estudia situación en 1999 de disponibilidad y demanda de recursos subterráneos. Se realiza estudio Hidrológico que incluye pluviometría y fluviometría en períodos 1961-1962 y 1997-1998. Hidrogeología en cuencas de río Maule, río Mataquito y cuenca río Cauquenes (este último con estudio geofísico) con medición de transmisividades, coeficiente de almacenamiento y niveles de agua subterránea entre otros. Se realiza Balance Hídrico en cuencas ríos Maule y Mataquito.

Información Relevante

Pluviometría, fluviometría, geofísica, parámetros elásticos, balance hídrico.

Título Publicación	Fecha	Autor
Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea del valle central de la región de Los Lagos	2008	SERNAGEOMIN

Tipo de Documento	Fuente
Informe	SERNAGEOMIN

Resumen

Estudio que investiga los recursos de aguas subterráneas: distribución, cantidad y calidad. Se realiza caracterización hidroquímica de aguas subterráneas. Incluye mapas de recursos y vulnerabilidad a contaminación de acuíferos de la Depresión Central de las hojas Valdivia, Osorno, Puerto Montt y Castro a escala 1:250000

Información Relevante

Aguas subterráneas

Título Publicación	Fecha	Autor
Mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas, regiones VII a X	2010	MOP-DGA (CONIC BF Ingenieros Civiles Constructores Ltda)

Tipo de Documento	Fuente
Informe + mapas	DGA

Resumen

Se realiza análisis y revisión crítica de antecedentes, estudios geológicos e hidrogeológicos hasta el 2010 que se localizan entre las regiones VII y X. Se desarrolla proposición de red de aguas subterráneas en base a los catastros de captaciones existente. Se Incluye resumen de numero de pozos por región.

Información Relevante

Catastro de captaciones, profundidad de niveles, dirección de escurrimiento, n° de pozos

Título Publicación	Fecha	Autor
Modelación hidrogeológica de los acuíferos en la cuenca del Río Bueno en la X Región	2004	Eduardo Andrés Escalona Muñoz

Tipo de Documento	Fuente
Informe + modelo	Universidad de Chile

Resumen

El trabajo establece un análisis global de acuíferos de la cuenca del río Bueno y cuantificación de características. Presenta balance hídrico y modelo 3D de flujo de aguas subterráneas implementado en sistema GIS. Se extiende el análisis a evaluar los efectos producidos en diferentes escenarios futuros de explotación de aguas subterráneas.

Información Relevante

Recargas, gasto específico, permeabilidad, percolación efectiva

Título Publicación	Fecha	Autor
Estudio Hidrogeológico Servicio APR Curriñe-Chabranco, comuna de Futrono, provincia del Ranco, Región de los Ríos.	2011	IHS Ingenieros Civiles Ltda.

Tipo de Documento	Fuente
Informe	DOH

Resumen

Estudio que define la alternativa de captación mas adecuada para la instalación del servicio de agua potable rural. Considera el tipo de fuente (superficial o subterránea), calidad, capacidad de suministro permanente, costo de implementación y operación.

Información Relevante

Costos, indicadores económicos, datos poblacionales, pluviometría, fluviometría, caudal, calidad aguas

Título Publicación	Fecha	Autor
Estudio Hidrogeológico Servicio APR Las Pataguas de Pilmaiquén, comuna de La Unión, provincia Del Ranco, Región de Los Ríos	2011	IHS Ingenieros Civiles Ltda.

Tipo de Documento	Fuente
Informe	DOH

Resumen

Estudio que define la alternativa de captación mas adecuada para la instalación del servicio de agua potable rural. Considera el tipo de fuente (superficial o subterránea), calidad, capacidad de suministro permanente, costo de implementación y operación.

Información

Relevante

Costos, indicadores económicos, datos poblacionales, pluviometría, fluviometría, caudal, calidad aguas, estratigrafía, pruebas de bombeo, catastro

Título Publicación	Fecha	Autor
Estudio Hidrogeológico Servicio APR Ponhuipa, comuna de Río Bueno, provincia Del Ranco, Región de Los Ríos	2011	IHS Ingenieros Civiles Ltda.

Tipo de Documento	Fuente
Informe	DOH

Resumen

Estudio que define la alternativa de captación mas adecuada para la instalación del servicio de agua potable rural. Considera el tipo de fuente (superficial o subterránea), calidad, capacidad de suministro permanente, costo de implementación y operación.

Información

Relevante

Costos, indicadores económicos, datos poblacionales, pluviometría, fluviometría, caudal, calidad aguas, estratigrafía, pruebas de bombeo, catastro

Título Publicación	Fecha	Autor
Estudio Hidrogeológico Servicio APR Puerto Las Rosas, comuna de Futrono, provincia Del Ranco, Región de Los Ríos	2011	IHS Ingenieros Civiles Ltda.

Tipo de Documento	Fuente
Informe	DOH

Resumen

Estudio que define la alternativa de captación mas adecuada para la instalación del servicio de agua potable rural. Considera el tipo de fuente (superficial o subterránea), calidad, capacidad de suministro permanente, costo de implementación y operación.

Información Relevante

Costos, indicadores económicos, datos poblacionales, pluviometría, fluviometría, caudal, calidad aguas, estratigrafía, pruebas de bombeo, catastro

Título Publicación	Fecha	Autor
Estudio Hidrogeológico Servicio APR Rofuco Alto, comuna de La Unión, provincia Del Ranco, Región de Los Ríos	2011	IHS Ingenieros Civiles Ltda.

Tipo de Documento	Fuente
Informe	DOH

Resumen

Estudio que define la alternativa de captación mas adecuada para la instalación del servicio de agua potable rural. Considera el tipo de fuente (superficial o subterránea), calidad, capacidad de suministro permanente, costo de implementación y operación.

Información Relevante

Costos, indicadores económicos, datos poblacionales, pluviometría, fluviometría, caudal, calidad aguas, estratigrafía, pruebas de bombeo, catastro

Anexo A.2 – Existentes No Disponibles (END)

Título Publicación	:	Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea de la depresión central de las regiones de Los Ríos y Los Lagos
Fecha	:	2008
Autor	:	SERNAGEOMIN
Tipo de documento	:	Informe + mapas
Fuente	:	SERNAGEOMIN

Título Publicación	:	Catastro de Propiedades Rurales 1.20.000
Fecha	:	?
Autor	:	CIREN
Tipo de documento	:	Catastro
Fuente	:	CIREN

Título Publicación	:	Catastro Frutícola
Fecha	:	2011
Autor	:	CIREN
Tipo de documento	:	Catastro
Fuente	:	CIREN

Título Publicación	:	Antecedentes estratigráficos y geocronológicos para una edad interglacial [MIO5E-5C]
Fecha	:	1999
Autor	:	Congreso Geológico Argentino
Tipo de documento	:	Artículo científico
Fuente	:	SERNAGEOMIN

Título Publicación	:	Diseño de un sistema de medición del estado de contaminación difusa de los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas
Fecha	:	?
Autor	:	Ministerio de Agricultura
Tipo de documento	:	Informe
Fuente	:	DGA

Título Publicación	:	Distritos Agroclimáticos
Fecha	:	?
Autor	:	CIREN
Tipo de documento	:	Informe
Fuente	:	CIREN

Título Publicación	:	Erosión Actual y Potencial
Fecha	:	?
Autor	:	CIREN
Tipo de documento	:	Informe
Fuente	:	CIREN

Título Publicación	:	Mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas, regiones VII a X
Fecha	:	2010
Autor	:	MOP-DGA (CONIC BF Ingenieros Civiles Constructores Ltda)
Tipo de documento	:	Informe + mapas
Fuente	:	DGA

Título Publicación	:	Estratigrafía y sedimentología de las cuencas terciarias de la región de Los Lagos [39-41°30'S]
Fecha	:	2000
Autor	:	SERNAGEOMIN
Tipo de documento	:	Informe
Fuente	:	SERNAGEOMIN

Título Publicación	:	Estudio Agrológicos (Suelos) + Imagen de Ortofoto. Esc. 1:20.000
Fecha	:	?
Autor	:	CIREN
Tipo de documento	:	Informe + ortofotos
Fuente	:	CIREN

Título Publicación	:	Estudio geológico-económico de la X. región norte, Chile
Fecha	:	1998
Autor	:	SERNAGEOMIN
Tipo de documento	:	Informe + mapas
Fuente	:	SERNAGEOMIN

Título Publicación	:	Exploración de recursos subterráneos Cuenca del Río Bueno, X región
Fecha	:	2003
Autor	:	AC Ingenieros Consultores Ltda
Tipo de documento	:	Informe
Fuente	:	DOH

Título Publicación	:	Esquema geológico de la Cordillera de Los Andes entre los paralelos 39 ^a 00' y 41 ^o 30'S
Fecha	:	1976
Autor	:	Congreso Geológico Chileno
Tipo de documento	:	Artículo científico
Fuente	:	SERNAGEOMIN

Título Publicación	:	Carta regular: sección H / IGM, cartografía 1975
Fecha	:	1975
Autor	:	IGM
Tipo de documento	:	Informe + mapas
Fuente	:	DGA

Título Publicación	:	Descripción geológica de las provincias de Osorno y Llanquihue
Fecha	:	1974
Autor	:	IREN, Universidad de Chile. Depto de Geología
Tipo de documento	:	Informe
Fuente	:	SERNAGEOMIN

Título Publicación	:	Información de catastros de pozos, aguas superficiales y obras hidráulicas existentes, junto con la estimación de la pérdida en las redes de abastecimiento.
Fecha	:	?
Autor	:	Empresas Sanitarias Territoriales Los Ríos
Tipo de documento	:	Datos
Fuente	:	?

Título Publicación	:	Geología de la Cordillera de Los Andes de las provincias de Cautín, Valdivia, Osorno y Llanquihue
Fecha	:	1964
Autor	:	IIG
Tipo de documento	:	Informe + mapas
Fuente	:	SERNAGEOMIN

Título Publicación	:	Noticias topográficas y geológicas sobre la región situada al oriente del Lago Ranco, en el sur de Chile y especialmente sobre la erupción volcánica más reciente "Los Azufres".Anales
Fecha	:	1923
Autor	:	Sociedad Científica Argentina
Tipo de documento	:	Informe
Fuente	:	SERNAGEOMIN

Título Publicación	:	SEIA - Instalación del Servicio de Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Servidas de la Localidad de Lago Ranco
Fecha	:	?
Autor	:	?
Tipo de documento	:	Informe
Fuente	:	SEIA

Título Publicación	:	SEIA - Ampliación planta de tratamientos de aguas servidas de rio bueno - La Unión
Fecha	:	?
Autor	:	?
Tipo de documento	:	informe
Fuente	:	SEIA

Título Publicación	:	SEIA - Tratamiento conjunto de las aguas servidas de La Unión y Río Bueno
Fecha	:	?
Autor	:	?
Tipo de documento	:	informe
Fuente	:	SEIA

Título Publicación	:	Recursos hídricos de la cuenca de los Ríos Bueno, Maullin, Chamiza, Petrohue y Puelo
Fecha	:	1995
Autor	:	Universidad de Chile (Alfredo Hernán Morales Venegas)
Tipo de documento	:	Tesis
Fuente	:	UCH

Anexo B – Fichas de catastro

(Formato digital estructurado por Cuenca)

Anexo C – Catastro Público de Aguas

Base de datos Catastro Público de Aguas

Dada la mala calidad de los datos (Excel) CPA, fue necesario un extenso proceso de depuración y validación, se revisaron un total de 3000 expedientes modificando datos ingresados erróneamente por mala digitación y/o mala sistematización de la información.

Tras la depuración de los expedientes de derechos concedidos, se desarrollaron dos base de datos Access, una para el área de Valdivia y otra para Osorno, permitiendo administrar de mejor manera el tipo y estructura de los datos.

La base de datos esta estructurada a partir de 2 tablas de datos, 10 consultas, 10 formularios y 10 informes (Figura Anexo 1). Los cuales permiten realizar análisis básicos y mostrar resultados a 10 consultas predeterminadas.

Entre las que se encuentran:

- Total Caudal Tipo Derecho/Comuna
- Total Caudal Naturaleza/Comuna
- Total Caudal Uso Agua/Comuna
- Total Caudal Naturaleza/Uso Agua
- Total Registros Tipo Derecho/Comuna
- Total Registros Naturaleza/Comuna
- Total Registros Uso Agua/Comuna

Estudio Hidrogeológico Cuencas Principales Región de los Ríos.

Tablas	Tablas
CPA_Osorno	CPA_Valdivia
Expedientes	EXPEDIENTES
Consultas	Consultas
Total Caudal Naturaleza Agua/Comuna	Expedientes por Comuna
Total Caudal Naturaleza Agua/Provincia	Número Registros por Naturaleza/Comuna
Total Caudal Naturaleza Agua/Usa Agua	Número Registros por Tipo Derecho/Comuna
Total Caudal Tipo Derecho/Comuna	Número Registros por Uso Agua/Comuna
Total Caudal Tipo Derecho/Provincia	Total Caudal Naturaleza/Comuna
Total Caudal Uso Agua/Comuna	Total Caudal Naturaleza/Usa Agua
Total Caudal Uso Agua/Provincia	Total Caudal Tipo de Derecho/Comuna
Total Registros Naturaleza Agua/Comuna	Total Caudal Uso de Agua/Comuna
Total Registros Tipo Derecho/Comuna	
Total Registros Uso Agua/Comuna	
Formularios	Formularios
Expedientes	EXPEDIENTES
Total Caudal Naturaleza Agua/Comuna	Expedientes por Comuna
Total Caudal Naturaleza Agua/Provincia	Número Registros por Naturaleza/Comuna
Total Caudal Naturaleza Agua/Usa Agua	Número Registros por Tipo Derecho/Comuna
Total Caudal Tipo Derecho/Comuna	Número Registros por Uso Agua/Comuna
Total Caudal Uso Agua/Comuna	Total Caudal Naturaleza/Comuna
Total Registros Naturaleza Agua/Comuna	Total Caudal Naturaleza/Usa Agua
Total Registros Tipo Derecho/Comuna	Total Caudal Tipo de Derecho/Comuna
Total Registros Uso Agua/Comuna	Total Caudal Uso de Agua/Comuna
Informes	Informes
Total Caudal Naturaleza Agua/Comuna	Número Registros por Naturaleza/Comuna
Total Caudal Naturaleza Agua/Provincia	Número Registros por Tipo Derecho/Comuna
Total Caudal Naturaleza Agua/Usa Agua	Número Registros por Uso Agua/Comuna
Total Caudal Tipo Derecho/Comuna	Total Caudal Naturaleza/Comuna
Total Caudal Tipo Derecho/Provincia	Total Caudal Naturaleza/Usa Agua
Total Caudal Uso Agua/Comuna	Total Caudal Tipo de Derecho/Comuna
Total Caudal Uso Agua/Provincia	Total Caudal Uso de Agua/Comuna
Total Registros Naturaleza Agua/Comuna	
Total Registros Tipo Derecho/Comuna	
Total Registros Uso Agua/Comuna	

Figura Anexo 1. Estructura Base de Datos Catastro Público de Aguas (Amphos 21).

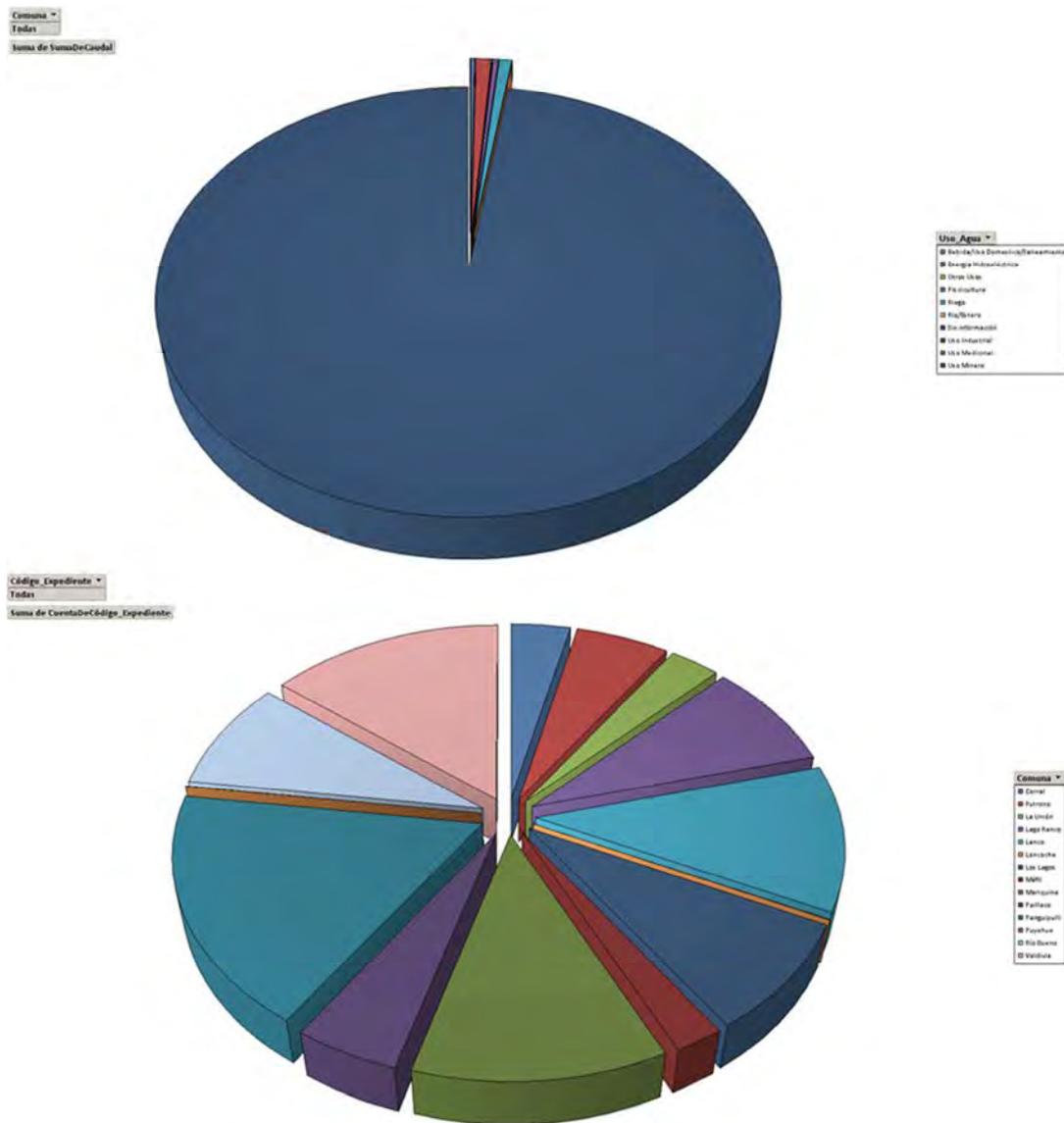


Figura Anexo 3. Formularios de reportes gráficos (Amphos 21).

Informes

Se incorporaron diez informes numéricos e imprimibles que describen a nivel comunal y provincial la distribución de derechos de aguas concedidos en términos de Tipo de Derecho, Uso del Agua, Naturaleza, Cantidad de Expedientes, etc., en la figura 4 muestra un ejemplo de los informes.

Total Caudal Tipo de derecho/comuna pasos		
Comuna	Tipo Derecho	Caudal [L/seg.]
Corral	Consuntivo	61,719.50
	No Consuntivo	126,045.00
		187,764.50
Futrono	Consuntivo	1,616,000.37
	No Consuntivo	173,353,282.03
		174,969,282.40
La Unión	Consuntivo	2,992,255.93
	No Consuntivo	171,288.25
		3,163,544.18
Lago Ranco	Consuntivo	65,404.61
	No Consuntivo	6,302,440.08
		6,367,844.69
Lanco	Consuntivo	1,341,226.15
	No Consuntivo	105,265.40
		1,446,491.55
Loncoche	Consuntivo	1,054.00
	No Consuntivo	1,054.00
		1,054.00
Los Lagos	Consuntivo	25,379,834.56
	No Consuntivo	43,674,025.50
		69,053,860.06
Máfil	Consuntivo	39,197.64
	No Consuntivo	33,519.00
		72,716.64

Figura Anexo 4. Informe de Caudal Total según Tipo de Derecho y Comuna.

Las bases de datos (CPA Valdivia y Osorno) quedan disponibles y editables en todos sus elementos tablas, formularios e informes de manera de generar e incorporar nuevos desarrollos y nuevos datos por parte de la DGA según estime conveniente.

Anexo D – Análisis hidrológico

(Formato digital estructurado por Cuenca)

Anexo E – Mapa Geológico

(Formato digital estructurado por Cuenca)

Anexo F – Geofísica

Anexo F.1 – Geofísica Cuenca Rio Bueno

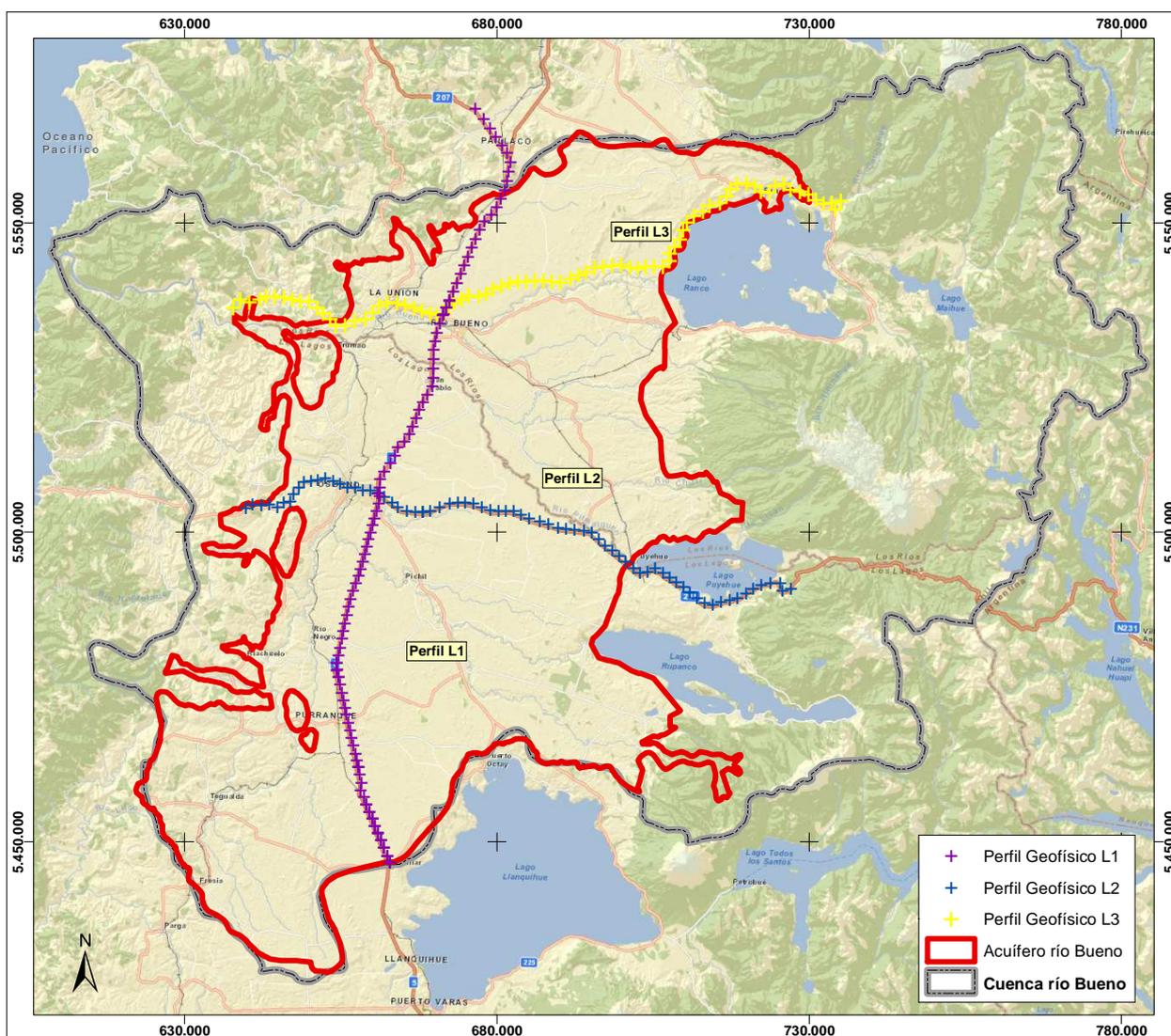


Figura E.1-1. Disposición de las líneas gravimétricas y TEM sobre el terreno.

Elaboración: Amphos 21.

Anexo F.2 – Líneas gravimetría Cuenca Rio Bueno

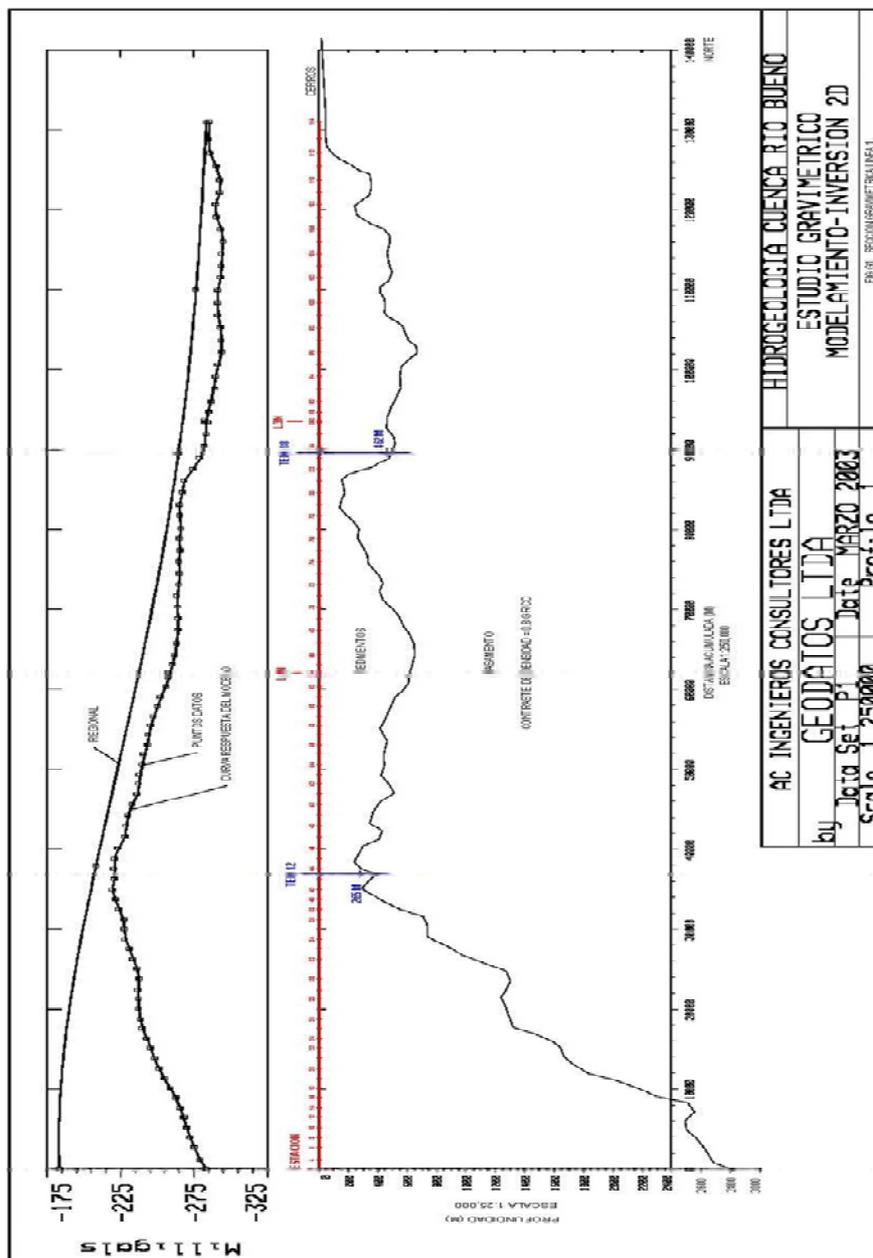
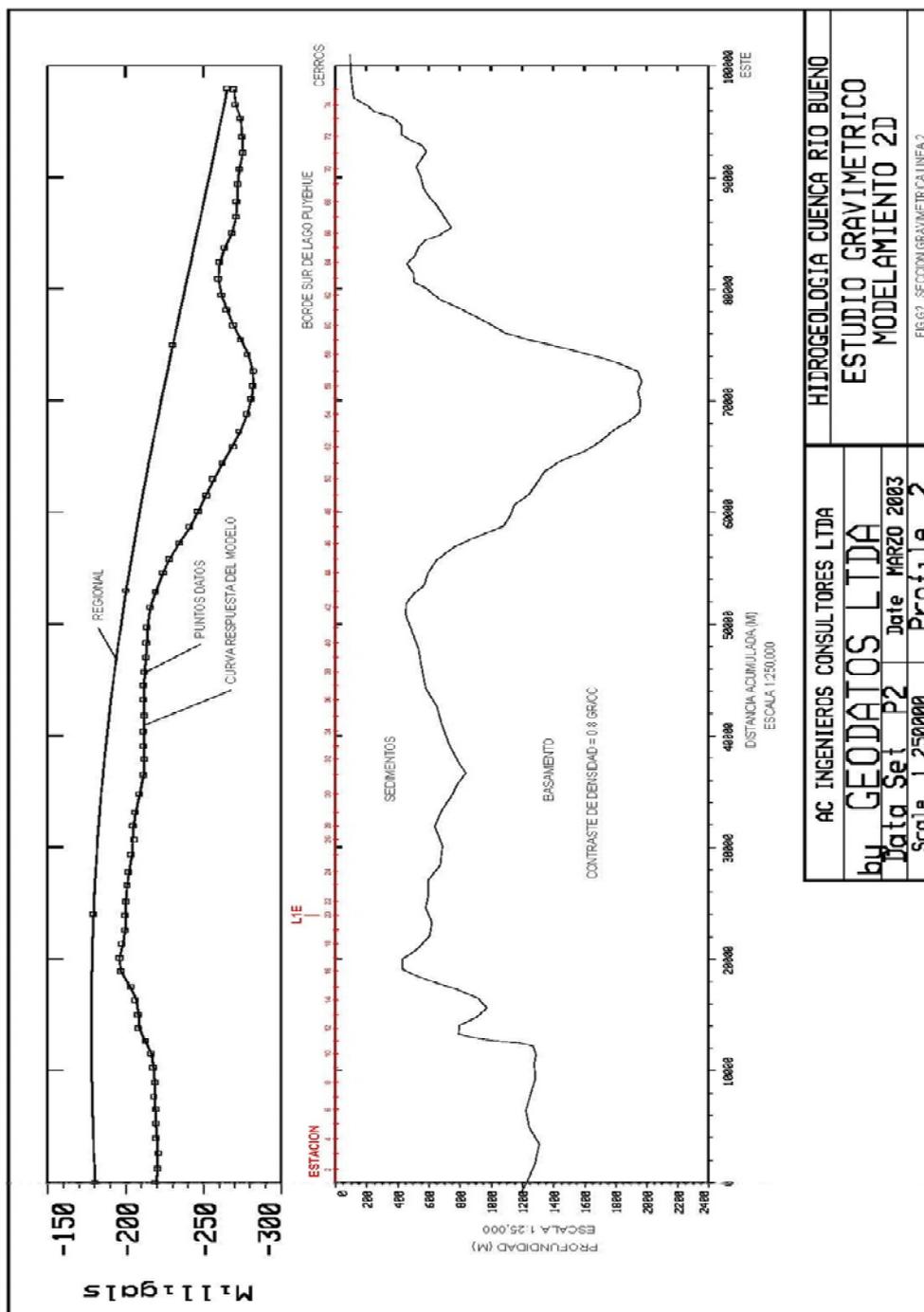


Figura E.2 – 1: Gravimetría Línea. Fuente: Geodatos, 2003.



AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA		HIDROGEOLOGIA CUENCA RIO BUENO	
by GEODATOS LTDA		ESTUDIO GRAVIMETRICO	
Date Set P2	Date	MARZO 2003	MODELAMIENTO 2D
Scale 1:250000	Profile	2	FIG.03. SECCION GRAVIMETRICA LINEA 2

Figura E.2 - 2. Gravimetría Línea 2. Fuente: Geodatos, 2003.

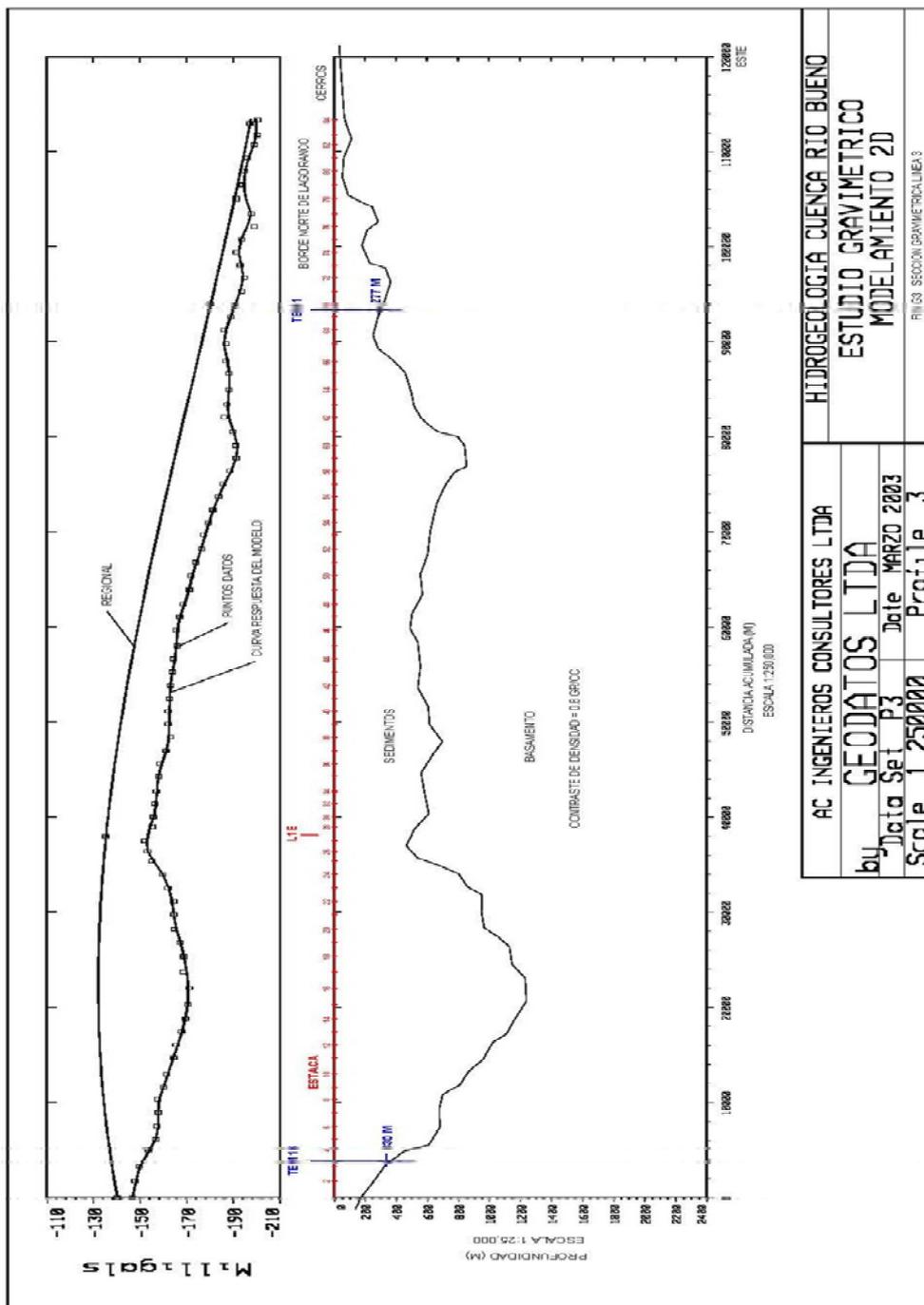


Figura E.2 – 3: Gravimetría Línea 3. Fuente: Geodatos, 2003.

LINEA 1							
Este	Norte	Stn	Elev	Prof_Bas	Elev_Bas	Dist_Acu	Grav_Bou
662872.70	5446647.00	1	145.54	2800.23	-2654.69	00.46	-283.46
662868.10	5446648.00	2	148.74	2799.52	-2650.78	4.67	-282.82
662447.70	5447755.00	3	137.44	2670.19	-2532.75	1188.36	-278.83
662446.20	5447759.00	4	137.14	2670.04	-2532.90	1192.63	-278.91
661894.40	5449134.00	5	131.34	2615.87	-2484.53	2674.69	-275.27
661886.20	5449142.00	6	132.04	2615.41	-2483.37	2685.79	-275.15
661434.80	5450304.00	7	127.84	2561.49	-2433.65	3932.38	-272.36
661424.40	5450330.00	8	129.34	2559.80	-2430.46	3960.86	-271.92
660975.50	5451450.00	9	124.04	2499.01	-2374.97	5167.00	-270.22
660965.20	5451476.00	10	125.54	2498.64	-2373.10	5195.43	-269.86
660493.30	5452656.00	11	118.14	2516.38	-2398.24	6466.29	-268.11
660491.00	5452663.00	12	119.84	2516.83	-2396.99	6473.19	-267.75
660052.40	5453761.00	13	115.54	2536.79	-2421.25	7656.02	-265.40
660036.80	5453801.00	14	114.84	2534.87	-2420.03	7698.47	-265.46
659593.50	5454902.00	15	115.44	2345.67	-2230.23	8885.83	-262.44
659591.50	5454909.00	16	114.74	2343.67	-2228.93	8893.12	-262.66
659132.20	5456049.00	17	109.84	2169.64	-2059.80	10121.70	-258.91
659123.70	5456067.00	18	110.44	2166.62	-2056.18	10142.06	-258.61
658679.00	5457182.00	19	111.24	1967.25	-1856.01	11342.00	-254.90
658169.90	5458282.00	20	119.94	1778.86	-1658.92	12554.11	-251.15
658295.90	5459624.00	21	119.14	1678.64	-1559.50	13902.01	-248.01
658038.30	5460807.00	22	109.44	1644.25	-1534.81	15113.22	-245.18
657805.50	5462008.00	23	103.84	1544.51	-1440.67	16336.08	-242.69
657780.80	5462008.00	24	105.14	1541.43	-1436.29	16360.78	-242.31
657523.00	5463201.00	25	105.54	1347.87	-1242.33	17581.31	-239.42
657319.10	5464317.00	26	127.24	1300.55	-1173.31	18715.29	-238.47
656992.20	5465660.00	27	124.84	1274.70	-1149.86	20097.52	-237.16
656741.90	5466818.00	28	125.34	1243.39	-1118.05	21282.75	-237.20
656497.50	5467945.00	29	116.94	1268.21	-1151.27	22435.94	-236.74
656218.30	5469244.00	30	112.14	1296.35	-1184.21	23764.11	-237.42
655943.50	5470518.00	31	105.94	1224.89	-1118.95	25067.90	-235.98
655696.40	5471658.00	32	92.94	1055.70	-962.76	26233.89	-233.09
655423.30	5472913.00	33	90.74	903.32	-812.58	27518.75	-230.83
655164.30	5474137.00	34	93.44	772.98	-679.54	28769.36	-227.65
654901.30	5475354.00	35	87.84	737.87	-650.03	30014.45	-227.31
654643.70	5476556.00	36	82.74	718.26	-635.53	31243.75	-227.11

LINEA 1							
Este	Norte	Stn	Elev	Prof_Bas	Elev_Bas	Dist_Acu	Grav_Bou
654662.40	5476579.00	37	81.14	717.58	-636.44	31273.39	-227.41
654386.10	5477743.00	38	82.14	551.18	-469.04	32470.21	-223.64
654410.70	5477828.00	39	83.44	541.22	-457.78	32558.68	-223.45
654383.80	5478972.00	40	69.54	418.56	-349.02	33702.50	-221.52
654355.20	5478972.00	41	72.24	415.76	-343.52	33731.13	-221.36
654617.10	5480221.00	42	79.74	302.16	-222.43	35007.30	-219.12
654886.70	5481412.00	43	77.74	349.85	-272.11	36228.91	-220.85
655162.70	5482772.00	44	61.54	287.90	-226.37	37616.14	-220.20
655407.00	5483974.00	45	72.14	250.92	-178.78	38843.21	-220.44
655670.00	5485256.00	46	76.04	293.17	-217.13	40151.91	-223.25
655964.40	5486682.00	47	70.84	413.88	-343.05	41607.98	-227.71
656232.60	5487992.00	48	72.74	373.42	-300.69	42944.67	-228.53
656509.20	5489323.00	49	73.54	361.98	-288.44	44304.59	-229.91
656949.10	5490568.00	50	67.84	404.61	-336.77	45625.03	-232.48
657426.70	5491845.00	51	74.14	502.70	-428.56	46987.93	-236.27
657857.20	5492988.00	52	75.44	474.28	-398.84	48209.32	-237.14
658182.20	5494135.00	53	76.04	425.24	-349.20	49401.47	-237.57
658489.30	5495261.00	54	69.24	443.24	-374.00	50569.09	-239.64
658846.90	5496565.00	55	40.84	442.88	-402.04	51921.22	-240.49
659153.90	5497700.00	56	74.84	457.24	-382.40	53096.53	-243.07
659473.90	5498881.00	57	69.34	436.61	-367.27	54320.11	-243.52
659788.40	5500019.00	58	67.74	427.02	-359.28	55500.77	-245.26
660089.60	5501131.00	59	55.14	458.78	-403.64	56652.86	-247.01
660410.80	5502305.00	60	64.84	488.08	-423.25	57870.48	-249.84
660739.80	5503513.00	61	63.34	515.64	-452.31	59122.48	-251.86
661068.80	5504715.00	62	54.44	591.47	-537.03	60368.69	-255.79
661233.30	5505868.00	63	21.04	611.68	-590.64	61532.87	-257.26
660964.30	5506373.00	64	21.04	617.42	-596.38	62105.05	-257.67
661247.70	5507310.00	65	48.14	633.58	-585.44	63083.96	-259.96
661276.60	5508573.00	66	53.24	650.47	-597.23	64347.29	-261.64
661986.50	5509856.00	67	71.14	643.45	-572.31	65814.02	-263.13
662960.40	5511160.00	68	68.64	594.19	-525.55	67441.15	-263.77
663662.80	5512428.00	69	44.04	547.81	-503.77	68890.71	-263.88
664150.30	5513761.00	70	40.24	486.55	-446.31	70310.05	-263.74
665192.30	5514681.00	71	44.94	424.82	-379.88	71700.08	-262.90
666004.90	5515826.00	72	77.04	430.94	-353.90	73104.10	-264.24

LINEA 1							
Este	Norte	Stn	Elev	Prof_Bas	Elev_Bas	Dist_Acu	Grav_Bou
666512.50	5517133.00	73	80.14	397.12	-316.99	74506.22	-265.00
667041.40	5518494.00	74	80.74	332.72	-251.98	75966.83	-264.39
667554.40	5519810.00	75	83.84	314.37	-230.53	77379.28	-265.29
668178.70	5521116.00	76	78.14	265.58	-187.45	78826.83	-264.90
668853.50	5522267.00	77	75.04	268.56	-193.52	80161.06	-265.92
669640.30	5523609.00	78	71.24	190.59	-119.35	81716.28	-265.15
669785.90	5524993.00	79	70.34	144.20	-73.86	83108.41	-264.84
669805.80	5526498.00	80	46.14	172.61	-126.48	84613.55	-266.92
669829.70	5528027.00	81	21.24	155.38	-134.14	86142.23	-268.05
669858.10	5529443.00	82	69.84	317.97	-248.13	87559.02	-274.27
670141.30	5530857.00	83	68.44	476.69	-408.26	89000.61	-278.39
670418.20	5532207.00	84	61.84	511.10	-449.27	90378.71	-281.90
670847.90	5533791.00	85	37.94	490.68	-452.75	92019.95	-283.27
671366.40	5535089.00	86	34.24	461.02	-426.78	93418.15	-284.05
671403.10	5535117.00	87	33.84	461.07	-427.23	93464.35	-282.06
671461.80	5535322.00	88	34.04	461.31	-427.27	93677.11	-281.79
671869.80	5536288.00	89	42.84	474.67	-431.83	94726.20	-284.64
671901.30	5536302.00	90	42.44	475.39	-432.95	94760.47	-285.09
672368.40	5537456.00	91	82.14	510.76	-428.63	96005.87	-286.38
672385.80	5537516.00	92	62.84	512.89	-450.05	96068.35	-286.59
673004.60	5538931.00	93	61.14	553.59	-492.46	97612.74	-288.87
673597.50	5540342.00	94	72.74	551.60	-478.87	99143.24	-289.29
674203.40	5541786.00	95	78.14	575.76	-497.62	100708.70	-291.11
674786.40	5543173.00	96	78.24	664.71	-586.47	102213.70	-293.94
675365.40	5544551.00	97	81.54	612.15	-530.61	103708.40	-293.38
675969.90	5545993.00	98	78.24	570.90	-492.66	105272.00	-292.85
676559.80	5547393.00	99	83.94	459.75	-375.81	106791.20	-291.02
677181.90	5548875.00	100	77.24	446.57	-369.33	108398.00	-290.95
678045.30	5550195.00	101	79.74	415.39	-335.65	109975.30	-290.90
679075.00	5551337.00	102	79.14	483.64	-404.50	111513.00	-292.97
679992.90	5552513.00	103	82.94	480.66	-397.73	113005.20	-293.54
680616.60	5553860.00	104	89.74	466.09	-376.35	114489.60	-293.27
681279.60	5555291.00	105	95.14	482.35	-387.21	116066.70	-294.65
681606.60	5556787.00	106	97.44	439.26	-341.82	117597.60	-293.01
681887.10	5558280.00	107	101.04	278.79	-177.75	119117.20	-289.90
682172.40	5559791.00	108	93.24	253.60	-160.36	120654.90	-289.52

LINEA 1							
Este	Norte	Stn	Elev	Prof_Bas	Elev_Bas	Dist_Acu	Grav_Bou
681615.90	5561275.00	109	90.24	347.55	-257.31	122239.80	-292.29
680779.90	5562505.00	110	81.74	350.44	-268.70	123727.00	-292.53
679786.60	5563968.00	111	75.44	228.90	-153.46	125495.30	-289.79
678890.40	5565287.00	112	70.74	86.21	-15.48	127089.60	-285.68
677879.00	5566775.00	113	70.64	45.96	24.67	128888.70	-284.35
676554.60	5568511.00	114	80.44	45.52	34.92	131072.20	-285.30

LINEA 2							
Este	Norte	Stn	Elev	Prof_Bas	Elev_Bas	Dist_Acu	Grav_Bou
639790.20	5503976.00	1	240.14	1227.17	-987.03	.00	-218.91
640900.20	5504514.00	2	212.64	1266.37	-1053.73	1233.51	-220.31
642244.20	5504328.00	3	146.74	1294.93	-1148.19	2590.32	-220.81
643578.60	5504473.00	4	53.24	1286.28	-1233.04	3932.61	-219.32
644841.30	5504024.00	5	100.14	1237.99	-1137.86	5272.59	-219.27
645873.80	5504781.00	6	96.04	1223.06	-1127.02	6552.86	-219.17
646976.90	5505033.00	7	81.74	1247.91	-1166.17	7684.23	-218.01
647459.40	5506255.00	8	86.94	1275.38	-1188.44	8998.50	-218.81
648293.70	5507214.00	9	82.14	1277.07	-1194.94	10269.25	-217.37
649068.60	5508209.00	10	77.54	1285.23	-1207.70	11530.42	-216.12
650194.30	5508336.00	11	60.14	1034.62	-974.49	12663.25	-212.57
651326.30	5508483.00	12	25.34	793.27	-767.93	13804.82	-207.98
652518.80	5508709.00	13	64.14	919.90	-855.76	15018.46	-207.80
653763.80	5508284.00	14	72.24	925.18	-852.94	16334.00	-205.88
654872.10	5507902.00	15	71.64	726.06	-654.42	17506.29	-203.19
656093.20	5507194.00	16	20.64	451.06	-430.42	18917.77	-196.58
657270.10	5507204.00	17	13.24	440.75	-427.51	20094.75	-195.88
658494.70	5506822.00	18	25.24	555.81	-530.57	21377.36	-197.44
659745.60	5506783.00	19	30.24	609.99	-579.75	22628.92	-199.52
660963.00	5506375.00	20	22.34	599.03	-576.69	23912.85	-199.30
660964.30	5506373.00	21	21.04	598.96	-577.92	23915.24	-199.52
662006.40	5505713.00	22	36.64	586.37	-549.74	25148.46	-199.92
663217.30	5504833.00	23	41.44	596.39	-554.95	26645.38	-200.75
664164.80	5504142.00	24	53.24	636.07	-582.83	27818.38	-201.75
665587.00	5503498.00	25	67.54	678.34	-610.80	29379.58	-203.22
666908.50	5503365.00	26	73.84	670.33	-596.49	30707.71	-205.31
668107.80	5503246.00	27	80.04	639.20	-559.16	31912.96	-204.62

LINEA 2							
Este	Norte	Stn	Elev	Prof_Bas	Elev_Bas	Dist_Acu	Grav_Bou
668132.30	5503252.00	28	80.54	639.97	-559.43	31938.31	-204.45
669337.20	5503440.00	29	81.54	676.80	-595.26	33157.76	-205.95
670842.40	5504087.00	30	84.34	752.38	-668.04	34795.92	-208.43
672436.30	5504762.00	31	87.74	828.67	-740.93	36526.89	-211.28
673819.10	5504872.00	32	87.74	779.01	-691.27	37914.07	-211.84
674976.90	5504850.00	33	93.44	735.74	-642.30	39072.03	-211.23
676273.90	5504565.00	34	94.24	698.33	-604.10	40399.87	-211.23
677585.10	5504129.00	35	100.54	666.17	-565.63	41781.70	-211.60
678951.50	5503595.00	36	106.04	623.26	-517.22	43248.72	-211.35
680235.30	5503424.00	37	107.14	575.33	-468.19	44543.94	-211.27
681392.90	5503525.00	38	114.64	556.85	-442.22	45705.94	-211.77
682711.30	5503414.00	39	119.94	540.79	-420.86	47029.09	-212.70
683889.40	5502869.00	40	122.54	518.19	-395.65	48326.89	-213.15
685178.60	5502310.00	41	123.54	479.17	-355.63	49732.32	-213.47
686880.20	5501728.00	42	131.34	453.37	-322.04	51530.66	-215.47
688190.20	5501320.00	43	137.34	518.74	-381.41	52902.73	-219.01
689829.50	5500813.00	44	145.74	594.79	-449.05	54618.65	-223.76
691039.60	5500592.00	45	152.64	659.48	-506.84	55848.70	-227.84
692452.10	5500421.00	46	162.24	811.83	-649.59	57271.57	-234.37
693896.80	5500246.00	47	170.34	1065.80	-895.46	58726.82	-240.86
695230.80	5499957.00	48	179.14	1131.24	-952.10	60091.77	-246.41
696284.30	5498962.00	49	189.04	1233.55	-1044.51	61540.52	-251.74
697352.80	5497955.00	50	210.74	1311.04	-1100.31	63008.77	-255.82
698487.10	5497072.00	51	212.84	1424.58	-1211.74	64446.56	-261.93
699618.90	5496153.00	52	201.64	1644.31	-1442.67	65904.44	-269.01
700670.50	5495266.00	53	191.04	1780.95	-1589.92	67280.19	-272.74
701860.10	5494271.00	54	207.84	1941.35	-1733.51	68831.07	-277.75
702955.10	5493463.00	55	202.54	1953.88	-1751.35	70191.91	-280.61
704103.40	5493677.00	56	199.54	1955.35	-1755.81	71360.02	-281.40
705343.60	5494162.00	57	188.44	1940.16	-1751.72	72691.55	-281.94
706660.10	5493469.00	58	189.84	1620.11	-1430.28	74179.07	-278.10
707669.20	5492699.00	59	188.24	1249.01	-1060.77	75448.66	-273.73
708743.40	5491937.00	60	187.14	1008.59	-821.45	76765.68	-268.94
709905.20	5491132.00	61	189.24	813.64	-624.41	78178.84	-264.68
710940.30	5490303.00	62	190.54	633.41	-442.87	79505.02	-261.37
712092.70	5489440.00	63	192.14	501.32	-309.18	80944.72	-259.33

LINEA 2							
Este	Norte	Stn	Elev	Prof_Bas	Elev_Bas	Dist_Acu	Grav_Bou
713271.20	5488558.00	64	203.84	467.57	-263.73	82416.72	-260.05
714563.70	5488371.00	65	207.84	529.59	-321.75	83722.68	-263.32
715862.10	5488693.00	66	203.64	691.19	-487.55	85060.45	-268.12
717283.50	5489013.00	67	210.44	697.25	-486.81	86517.40	-270.65
718534.20	5489432.00	68	221.44	627.68	-406.24	87836.25	-271.17
719955.60	5490162.00	69	213.34	557.12	-343.78	89434.41	-271.68
721027.80	5490957.00	70	207.34	524.21	-316.88	90769.18	-272.78
722376.70	5491521.00	71	266.04	578.66	-312.62	92231.22	-275.15
723806.80	5491834.00	72	258.34	442.71	-184.37	93695.09	-274.42
725399.30	5491896.00	73	227.54	376.58	-149.05	95288.81	-273.62
725712.80	5490688.00	74	280.54	192.32	88.22	96537.31	-270.40
727070.60	5490891.00	75	320.44	107.34	213.10	97910.22	-269.36

LINEA 3							
Este	Norte	Stn	Elev	Prof_Bas	Elev_Bas	Dist_Acu	Grav_Bou
637752.50	5536349.00	1	456.74	169.63	287.10	.00	-146.40
638959.10	5537655.00	2	403.24	254.55	148.69	1777.72	-147.58
640388.20	5537220.00	3	60.44	322.70	-262.26	3271.52	-149.68
642043.10	5537613.00	4	63.44	485.28	-421.84	4972.48	-153.50
643085.10	5538023.00	5	131.54	631.62	-500.08	6092.42	-156.59
644447.10	5538210.00	6	67.84	681.40	-613.56	7467.20	-157.19
645876.00	5537895.00	7	2.34	676.28	-673.94	8930.49	-157.65
647265.20	5537647.00	8	4.14	689.20	-685.06	10341.55	-157.36
648481.70	5537307.00	9	18.94	777.94	-759.00	11604.67	-159.86
649895.00	5537269.00	10	79.44	854.03	-774.59	13018.50	-161.30
651254.10	5536317.00	11	117.74	963.31	-845.57	14677.87	-164.46
652175.40	5535322.00	12	112.44	1012.52	-900.08	16033.87	-165.22
653311.50	5534468.00	13	63.04	1117.19	-1054.15	17455.47	-167.57
654189.00	5533446.00	14	69.14	1164.36	-1095.23	18802.50	-169.31
655694.30	5533498.00	15	73.04	1222.93	-1149.89	20308.71	-170.37
657204.10	5534242.00	16	112.54	1232.81	-1120.27	21991.88	-171.01
658926.30	5534515.00	17	7.54	1189.25	-1181.71	23735.65	-168.36
660135.80	5535595.00	18	77.64	1135.52	-1057.88	25357.16	-168.69
661175.10	5536632.00	19	44.84	1096.15	-1051.31	26824.98	-167.16
662482.60	5537138.00	20	14.04	982.08	-968.04	28226.98	-164.66
663983.20	5537104.00	21	27.64	952.65	-925.01	29727.93	-164.42

665335.30	5536714.00	22	63.24	951.86	-888.62	31135.17	-164.32
666701.00	5536301.00	23	22.54	872.55	-850.01	32561.94	-161.70
668024.60	5535782.00	24	26.84	802.01	-775.17	33983.68	-159.63
669355.40	5535330.00	25	31.54	595.75	-564.21	35388.94	-154.96
670389.80	5535158.00	26	31.04	496.99	-465.95	36437.66	-153.05
671461.80	5535322.00	27	34.04	478.00	-443.96	37522.13	-151.71
672145.60	5536609.00	28	45.54	526.58	-481.04	38979.52	-155.13
673103.80	5537011.00	29	47.14	587.88	-540.74	40018.61	-155.59
673124.10	5537015.00	30	47.64	589.10	-541.47	40039.32	-155.51
674344.40	5537669.00	31	61.54	593.70	-532.16	41424.01	-156.25
674346.70	5537680.00	32	61.84	593.56	-531.73	41434.76	-156.24
675487.80	5538265.00	33	64.74	577.81	-513.07	42717.33	-156.93
675505.90	5538266.00	34	63.94	577.61	-513.67	42735.42	-157.05
677056.70	5538023.00	35	70.04	560.56	-490.52	44305.23	-157.81
678263.00	5538597.00	36	75.84	594.55	-518.72	45641.36	-158.26
679391.20	5539295.00	37	80.54	651.17	-570.63	46968.01	-161.04
680728.40	5539821.00	38	87.74	675.97	-588.23	48404.93	-162.93
682044.40	5540266.00	39	92.74	613.67	-520.94	49793.98	-161.90
683381.20	5540512.00	40	98.74	605.77	-507.03	51153.23	-161.90
684706.70	5540637.00	41	105.84	575.93	-470.09	52484.62	-162.33
686105.60	5540731.00	42	113.54	540.55	-427.01	53886.71	-162.86
687460.10	5540788.00	43	122.54	550.78	-428.25	55242.41	-163.71
688818.80	5540618.00	44	139.24	549.52	-410.29	56611.63	-164.14
690197.20	5540407.00	45	157.94	539.67	-381.74	58006.06	-165.62
691808.60	5540948.00	46	149.64	494.45	-344.81	59705.73	-165.45
693084.00	5541562.00	47	158.44	497.83	-339.39	61121.42	-166.96
694287.40	5542114.00	48	163.14	533.23	-370.09	62445.36	-168.38
695639.50	5542714.00	49	159.64	562.40	-402.76	63924.63	-171.16
697080.20	5542977.00	50	119.84	555.09	-435.26	65389.13	-171.65
698505.90	5543077.00	51	154.34	582.13	-427.79	66818.28	-173.90
699903.50	5543262.00	52	169.64	604.76	-435.13	68228.09	-176.44
701339.90	5542767.00	53	98.44	616.27	-517.83	69747.20	-177.15
702588.10	5542571.00	54	100.94	632.36	-531.42	71010.75	-179.24
703835.80	5543033.00	55	106.24	651.71	-545.48	72341.05	-181.19
705232.80	5542948.00	56	113.74	681.69	-567.95	73740.61	-183.47
706541.40	5542911.00	57	119.14	719.38	-600.24	75049.70	-185.53
707607.30	5543785.00	58	121.44	789.56	-668.13	76427.82	-188.45
707688.40	5545144.00	59	130.64	845.15	-714.51	77789.73	-191.19

708471.30	5546227.00	60	137.24	835.43	-698.19	79126.10	-190.76
709278.50	5547408.00	61	125.54	668.54	-543.00	80556.59	-189.87
709823.70	5548817.00	62	67.54	555.49	-487.95	82066.92	-185.95
710418.70	5550035.00	63	74.24	509.06	-434.82	83422.93	-187.34
711506.00	5551171.00	64	70.24	489.27	-419.03	84995.06	-187.98
713041.00	5551998.00	65	110.14	454.38	-344.25	86738.91	-188.20
714067.40	5552703.00	66	91.74	381.53	-289.79	87984.09	-186.73
715742.20	5553353.00	67	69.44	269.93	-200.49	89780.43	-186.60
716833.70	5554374.00	68	104.94	259.34	-154.40	91275.02	-185.93
717453.90	5555603.00	69	170.24	283.71	-113.48	92651.64	-189.02
718474.10	5556227.00	70	172.34	312.84	-140.50	93847.59	-190.61
719954.80	5556415.00	71	178.74	343.03	-164.29	95340.16	-193.27
721304.30	5556004.00	72	121.94	350.04	-228.10	96750.72	-194.78
722248.20	5555131.00	73	130.94	273.12	-142.18	98036.76	-192.81
723622.70	5554982.00	74	139.54	195.56	-56.02	99419.31	-191.08
724586.90	5555959.00	75	94.34	190.14	-95.81	100792.30	-193.31
725928.40	5556246.00	76	100.34	242.60	-142.26	102164.20	-198.85
727018.40	5555469.00	77	92.04	260.35	-168.31	103502.80	-197.51
728508.90	5555040.00	78	90.24	136.03	-45.79	105053.90	-191.01
729882.80	5554537.00	79	134.74	68.59	66.14	106516.90	-193.75
731124.20	5553766.00	80	148.54	55.01	93.53	107978.50	-194.66
732353.30	5553092.00	81	161.54	58.97	102.57	109380.30	-195.80
733721.90	5553186.00	82	160.94	94.99	65.95	110752.00	-199.07
734214.20	5552264.00	83	101.84	101.45	.39	111797.30	-200.10
735115.40	5553520.00	84	159.74	67.39	92.35	113343.10	-200.35

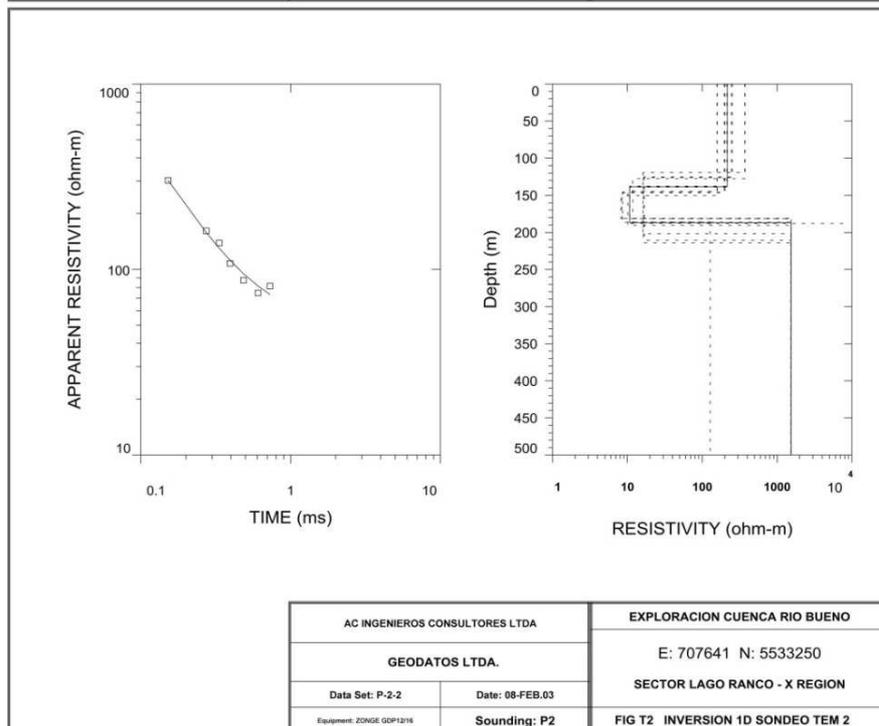
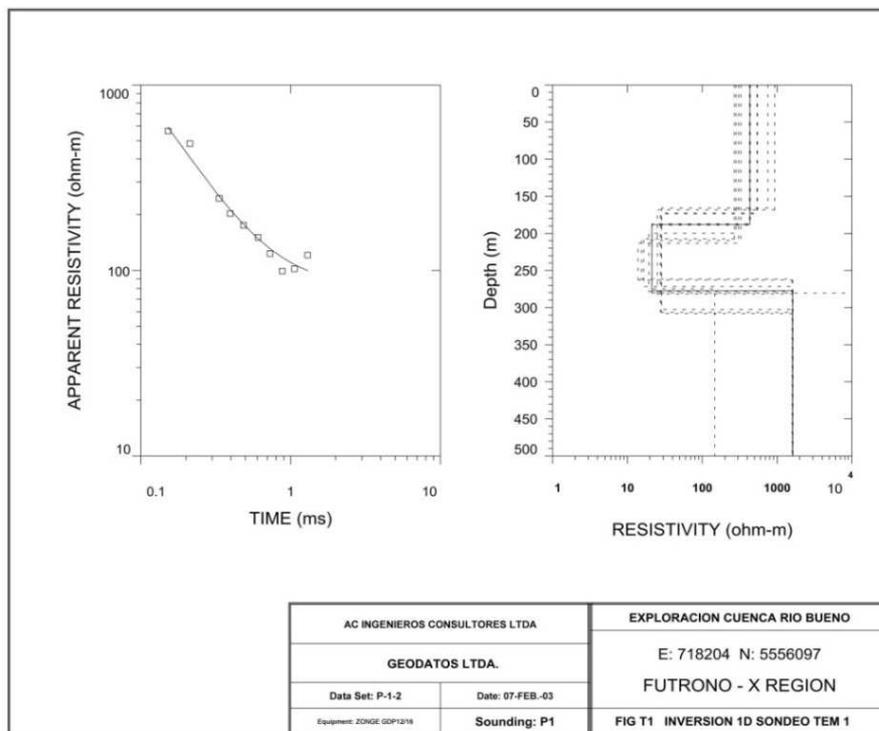
Anexo F.3 – TEM Cuenca de río Bueno

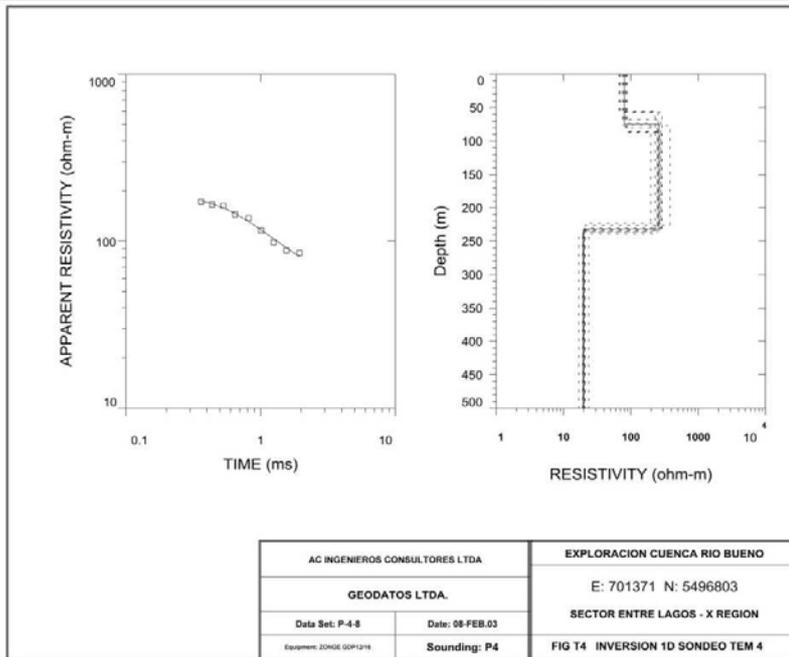
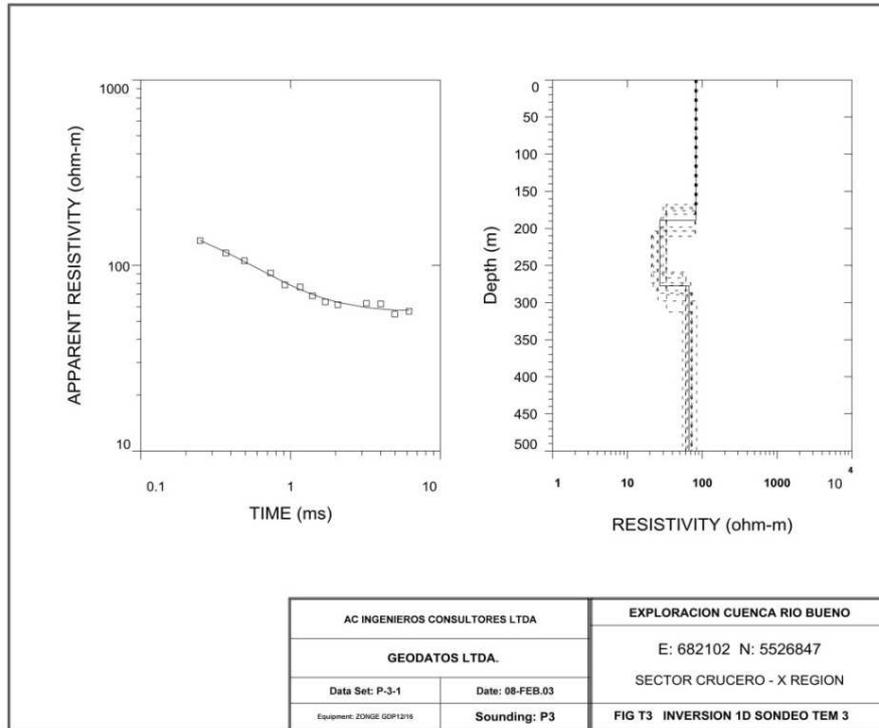
Tabla F.3 – 1: Estratigrafía geoelectrica de sondeos TEM

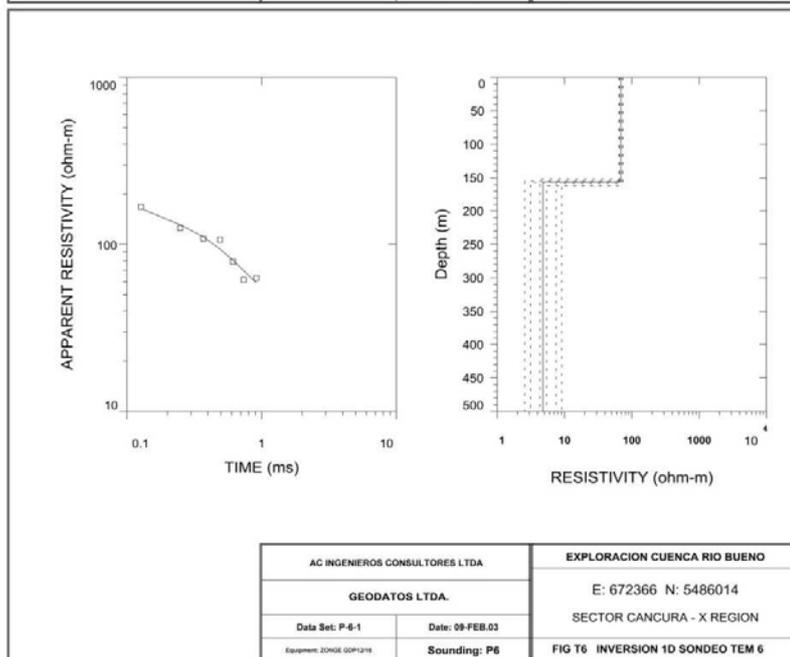
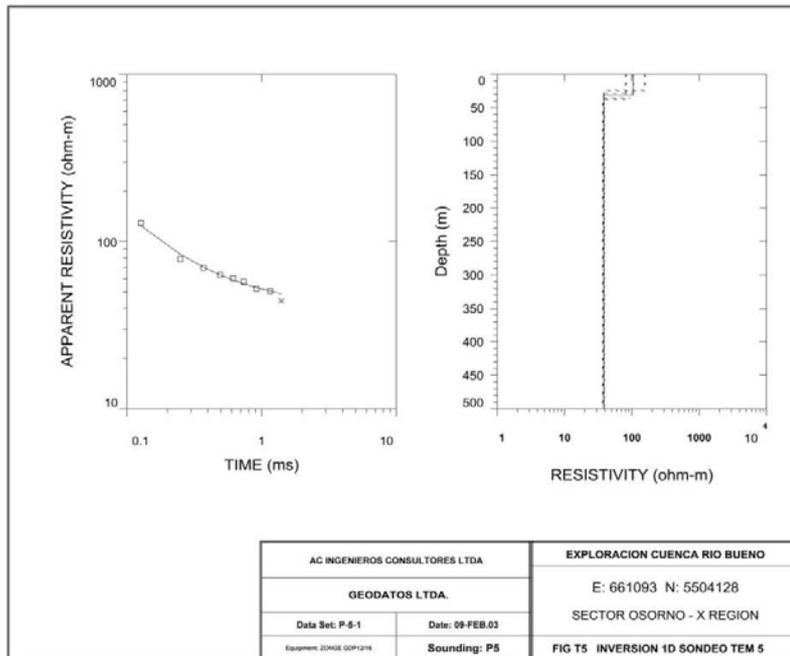
TE M	Estrat o	Resistividad Ohm-m	Profundida d m	Descripción
1	1	432	0-188	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	22	188 - 277	Sedimentos terciarios finos
	3	1615	277	Basamento metamórfico
2	1	215	0-138	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	11	138-187	Sedimentos terciarios finos
	3	1536	187	Basamento metamórfico
3	1	82	0 - 189	Cubierta cuaternaria (grano medio)
	2	27	189 - 277	Depósitos cuaternarios (grano fino)
	3	67	277	Sedimentos terciarios compactos
4	1	80	0 - 74	Cubierta cuaternaria (grano medio)
	2	262	74-231	Depósitos cuaternarios (grano grueso)
	3	20	231 ->	Depósitos cuaternarios (grano fino)
5	1	105	0 - 32	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	38	32	Depósitos cuaternarios (grano fino)
6	1	69	0 - 156	Cubierta cuaternaria (grano medio)
	2	5	156	Depósitos cuaternarios (arcillosos)
7	1	483	0 - 59	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	91	59 - 293	Depósitos cuaternarios (grano medio)
	3	20	293	Depósitos cuaternarios (grano fino)
8	1	211	0 - 87	Cubierta cuaternaria (grano

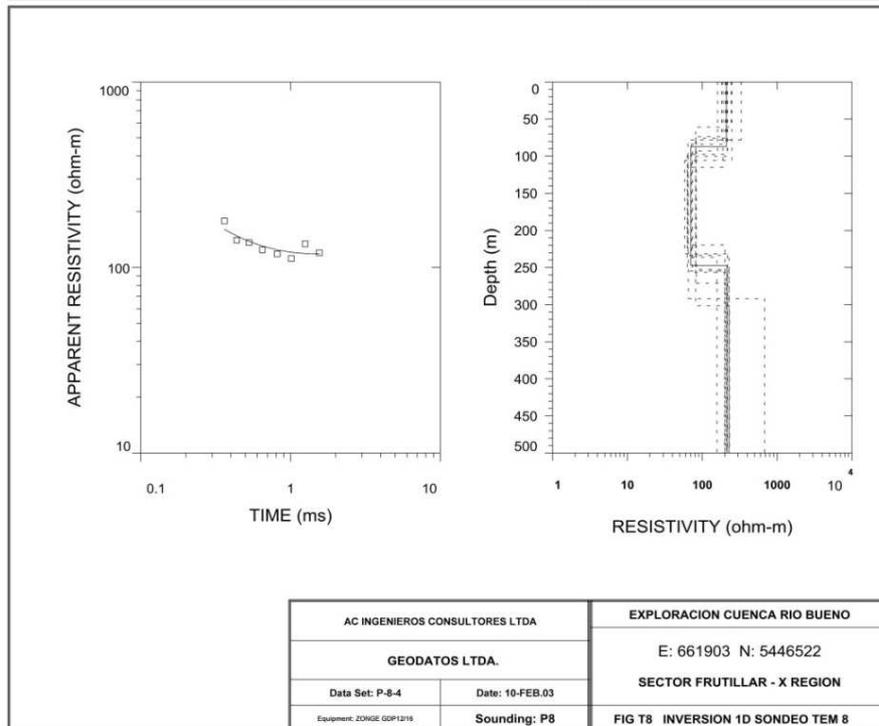
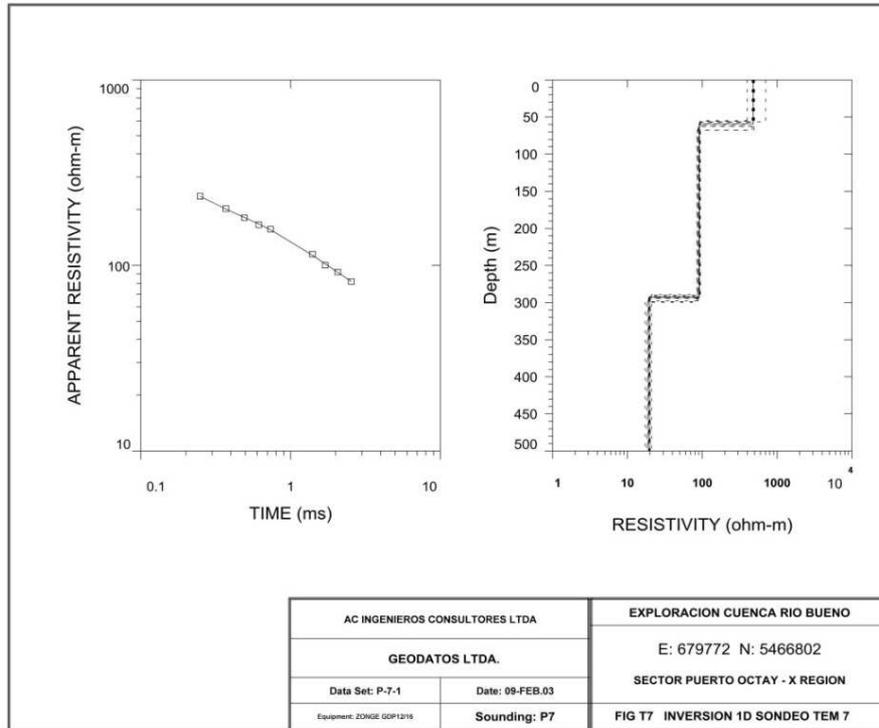
				grueso)
	2	71	87 - 247	Depósitos cuaternarios (grano medio)
	3	215	247	Sedimentos terciarios compactos
9	1	29	0 - 30	Cubierta cuaternaria (grano fino)
	2	220	30 - 178	Depósitos cuaternarios (grano grueso)
	3	5	178	Depósitos cuaternarios (arcillosos)
10	1	152	0 - 33	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	87	33-310	Depósitos cuaternarios (grano medio)
	3	203	310	Sedimentos terciarios compactos
11	1	548	0 - 134	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	27	134	Depósitos cuaternarios (grano fino)
12	1	56	0 - 221	Cubierta cuaternaria
	2	11	221 - 265	Sedimentos terciarios finos
	3	1485	265	Basamento metamórfico
13	1	214	0 - 76	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	20	76 - 108	Depósitos cuaternarios (grano fino)
	3	285	108	Sedimentos terciarios compactos
14	1	732	0 - 59	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	2	59 - 110	Depósitos cuaternarios (arcillosos)
	3	10	110	Depósitos cuaternarios (grano fino)
15	1	7	0 - 8	Cubierta cuaternaria (grano fino)
	2	41	8 - 123	Depósitos cuaternarios (grano medio)
	3	4	123 - 325	Depósitos cuaternarios (arcillosos)
	4	17	325	Sedimentos terciarios finos
16	1	115	0 - 82	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	11	82 - 196	Depósitos cuaternarios (grano fino)

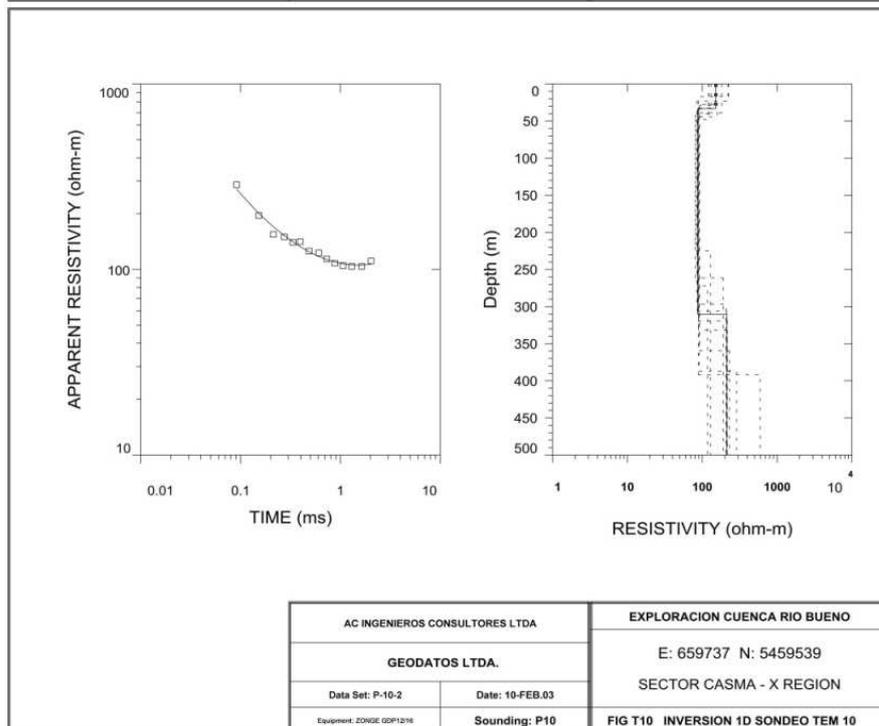
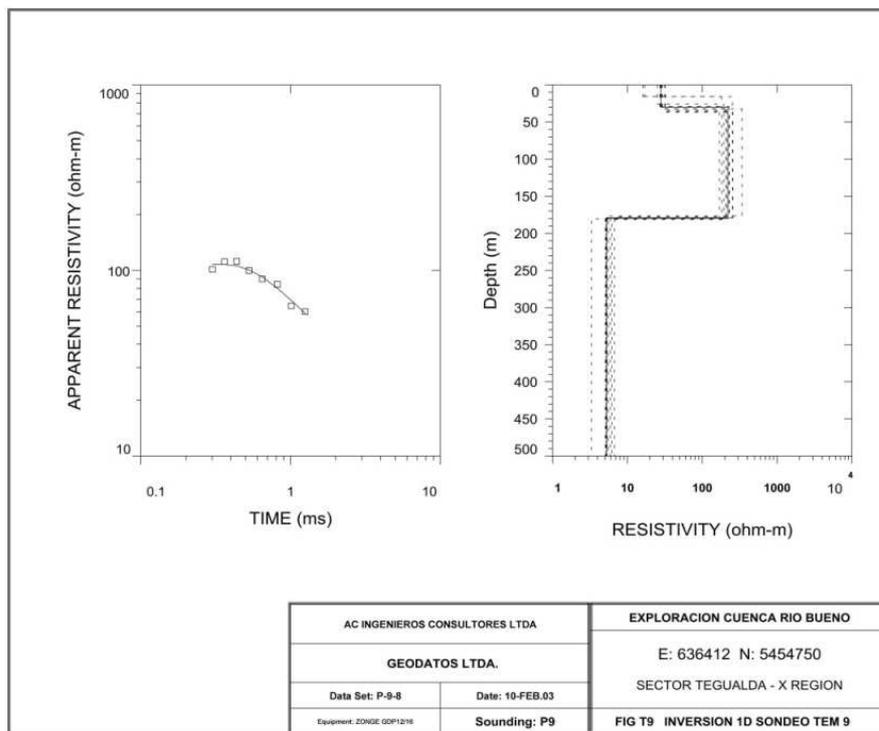
	3	5	196 - 327	Depósitos cuaternarios (arcillosos)
	4	97	327	Basamento metamórfico alterado
17	1	50	0 - 105	Cubierta cuaternaria (grano medio)
	2	37	105 - 234	Depósitos cuaternarios (grano fino)
	3	6	234	Depósitos cuaternarios (arcillosos)
18	1	55	0 - 36	Cubierta cuaternaria (grano medio)
	2	61	36 - 180	Depósitos cuaternarios (grano medio)
	3	14	180 - 462	Sedimentos terciarios finos
	4	758	462	Basamento metamórfico
19	1	87	0 - 49	Cubierta cuaternaria (grano medio)
	2	27	49 - 131	Depósitos cuaternarios (grano fino)
	3	4	131	Depósitos cuaternarios (arcillosos)
20	1	143	0 - 55	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
	2	32	55	Depósitos cuaternarios (grano fino)

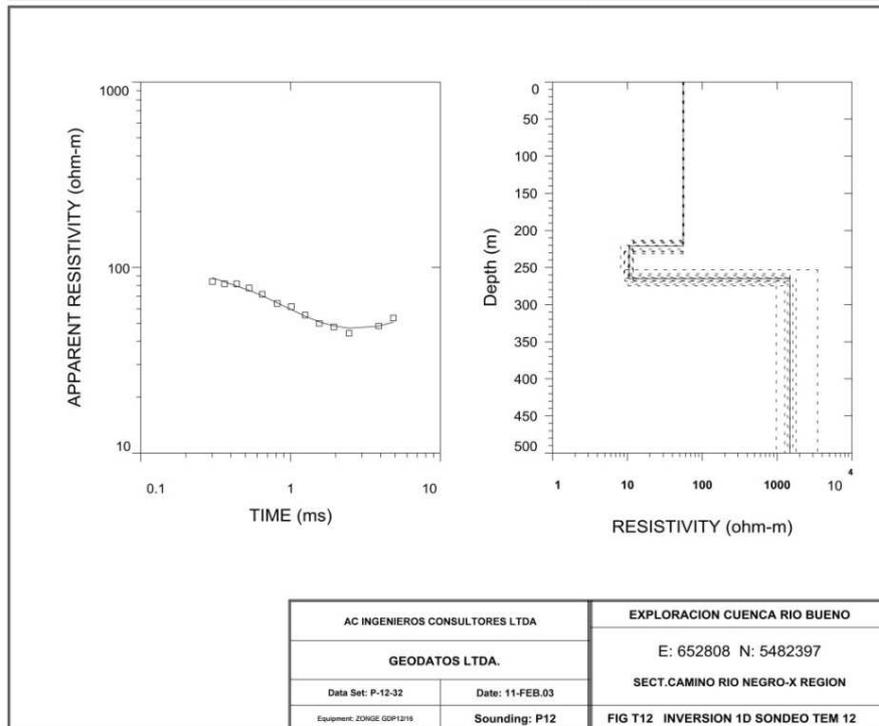
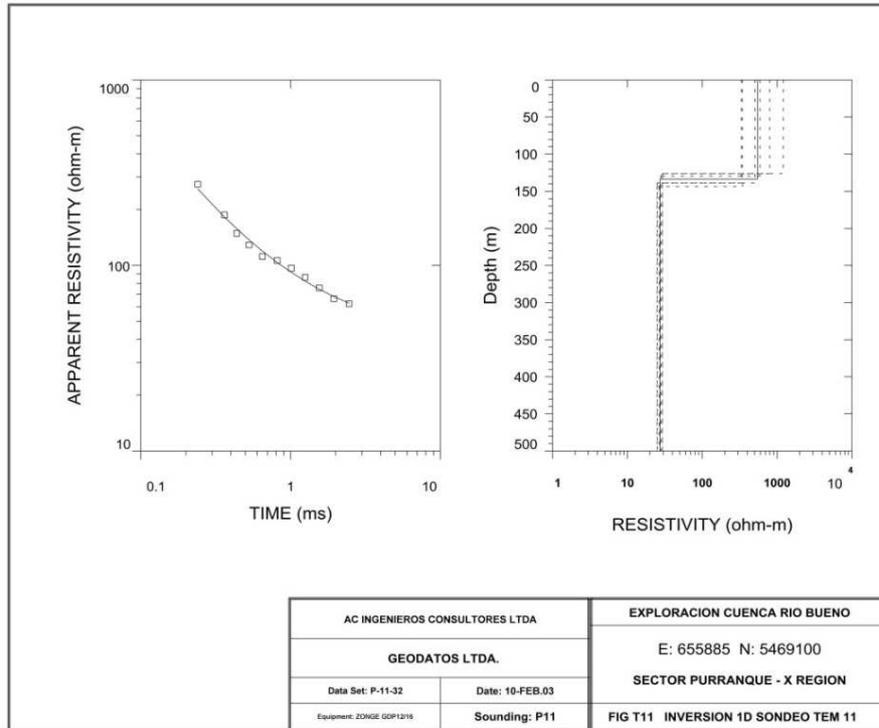


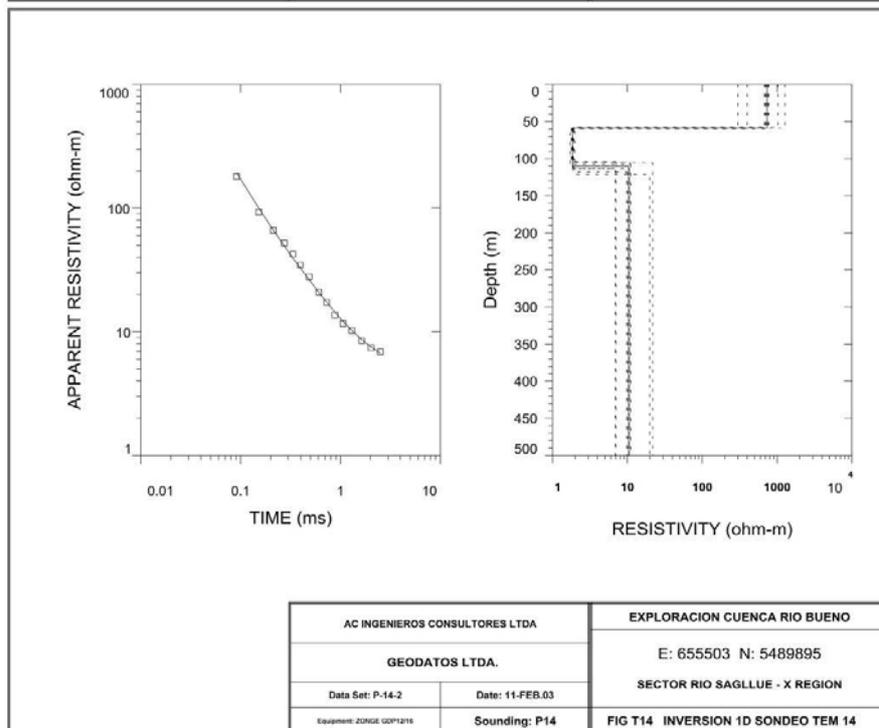
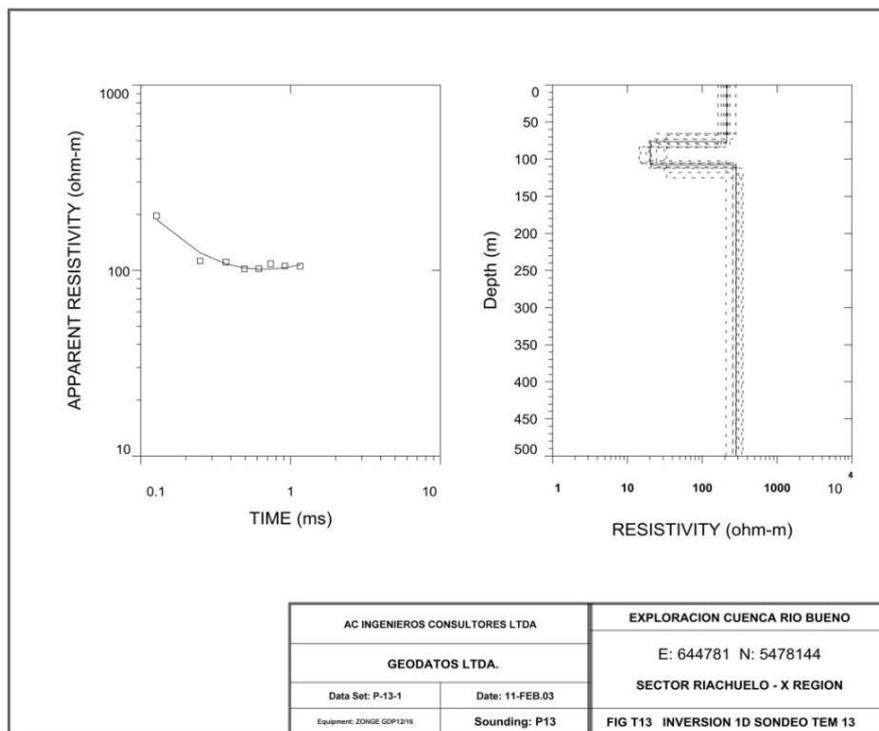


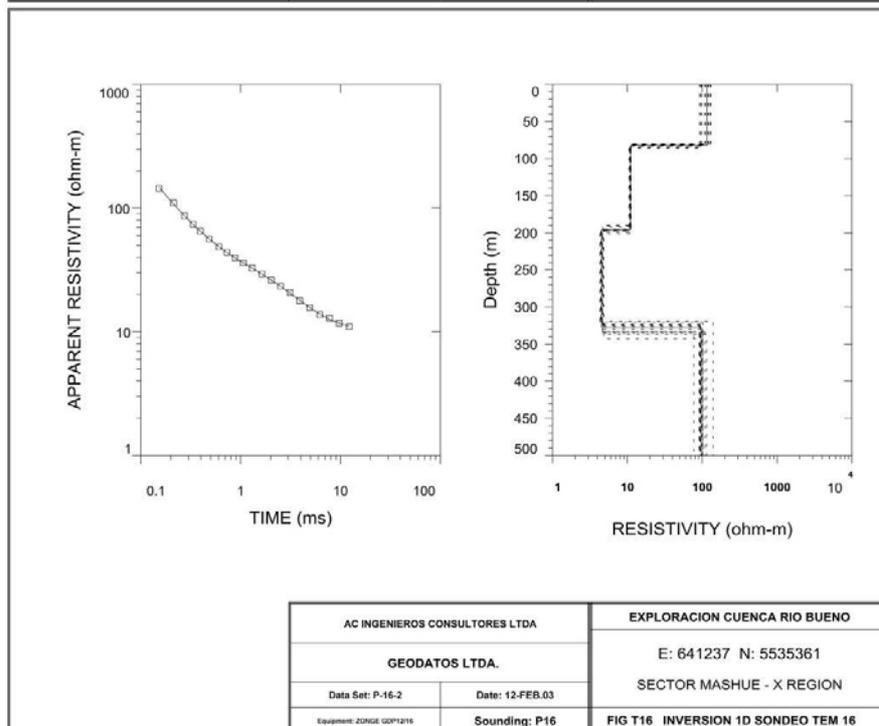
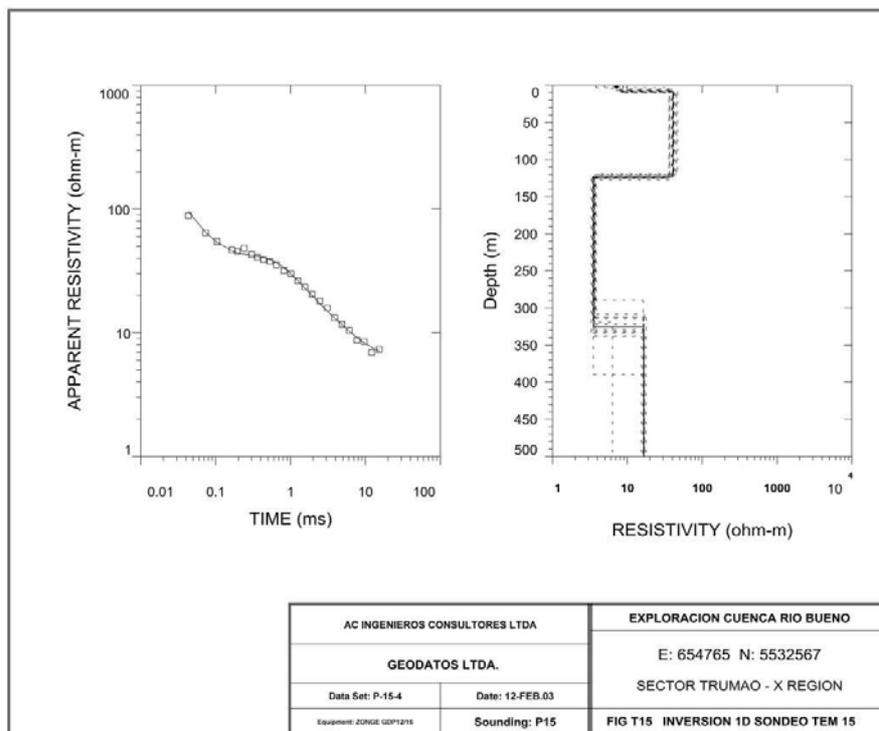


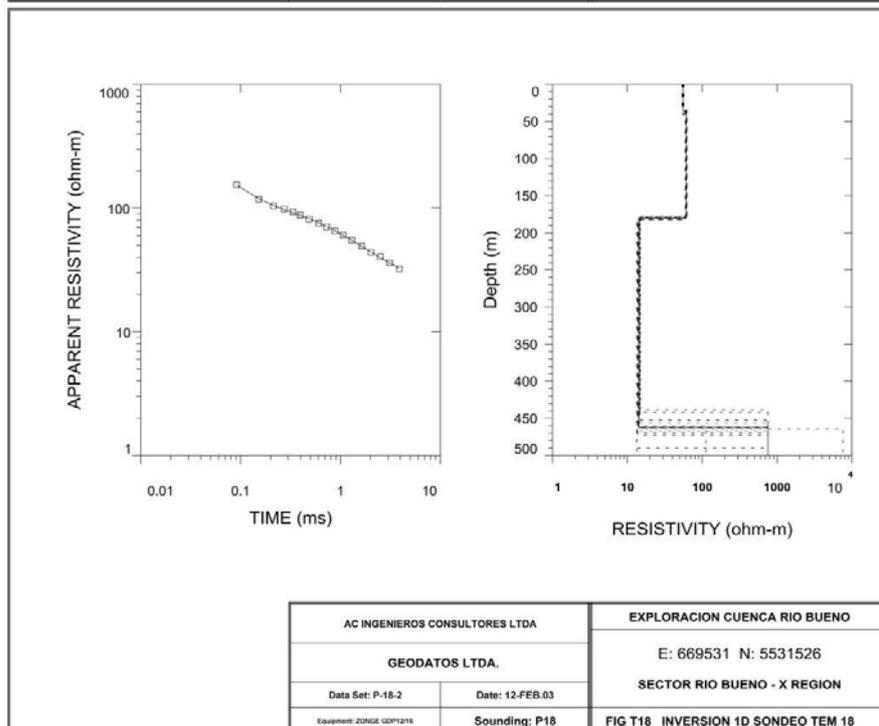
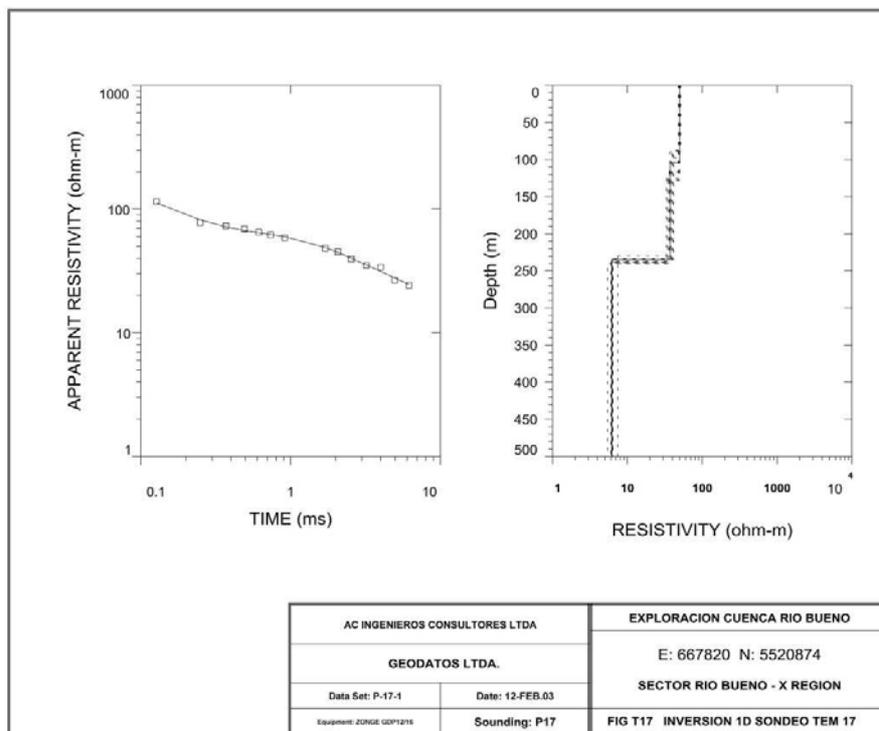












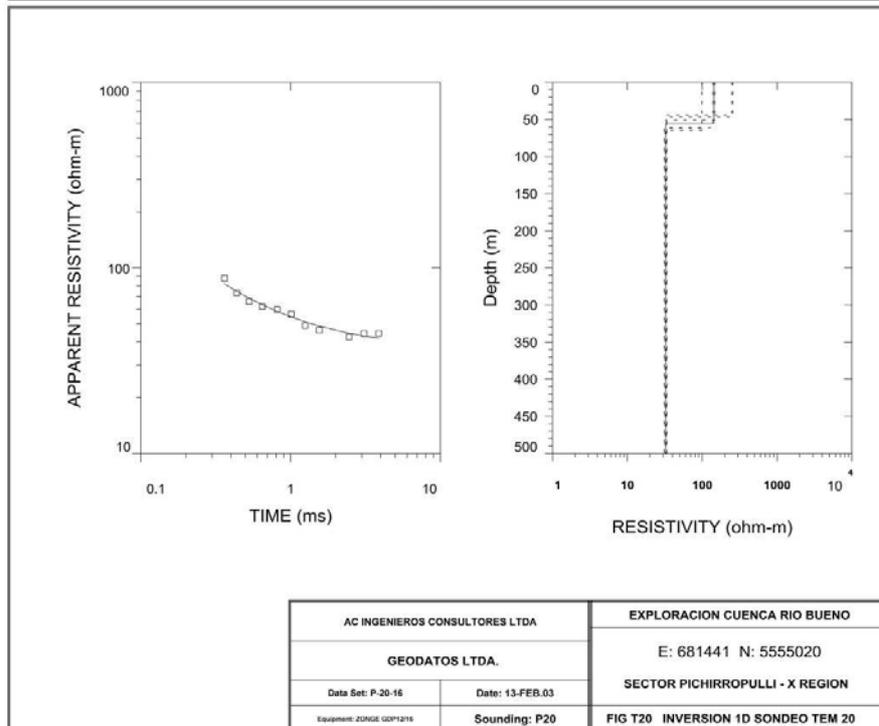
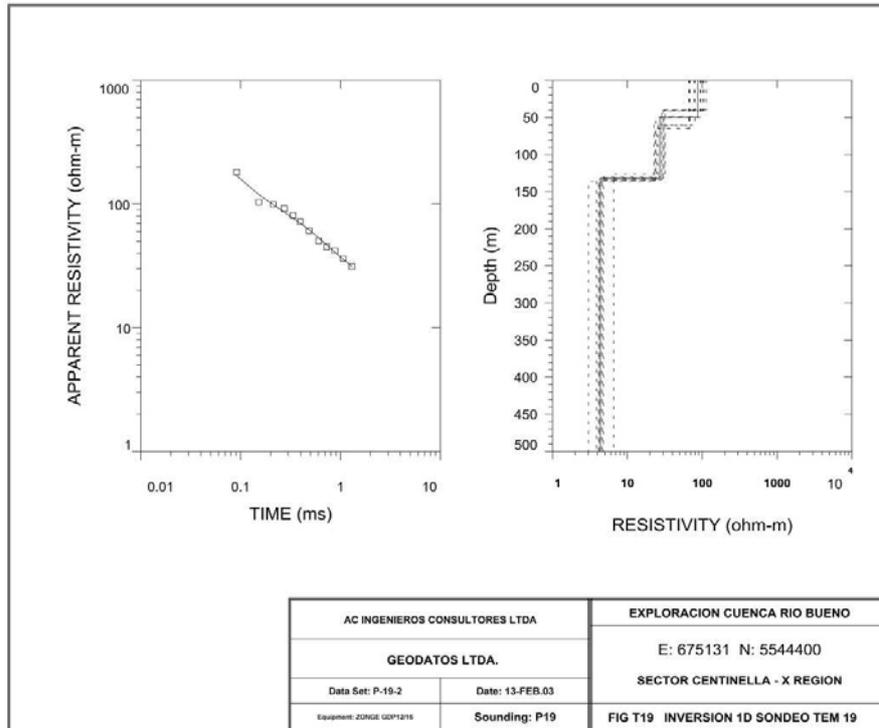


Tabla F.3 – 2. Coordenadas y cotas TEM. Fuente: Geodatos, 2003.

Este	Norte	Stn	Cota	
718204.	5556097.	1	156.	7
707641.	5533250.	2	203.	0
682102.	5526847.	3	101.	4
701371.	5496803.	4	200.	0
661093.	5504128.	5	50.	0
672366.	5486014.	6	49.	1
679772.	5466802.	7	174.	4
661903.	5446522.	8	156.	3
636412.	5454750.	9	109.	6
659737.	5459539.	10	100.	3
655885.	5469100.	11	108.	8
652808.	5482397.	12	65.	5
644781.	5478144.	13	100.	7
655503.	5489895.	14	50.	0
654765.	5532567.	15	45.	0
641237.	5535361.	16	50.	0
667820.	5520874.	17	71.	7
669531.	5531526.	18	61.	4
675131.	5544400.	19	75.	0
681441.	5555020.	20	96.	3

Anexo G – Hidrogeología

(Formato digital estructurado por Cuenca)

Anexo H – Modelo numérico

(Formato digital estructurado por Cuenca)

Anexo I – Ensayos de aforo

AFOROS DE PRECISIÓN PARA EFECTUAR BALANCES EN CUATRO RÍOS DE LAS REGIONES DE LOS LAGOS Y DE LOS RÍOS

Anexo I.1 – INTRODUCCIÓN

Este informe describe la realización de una serie de aforos de precisión en cuatro ríos de las regiones de Los Lagos (Ríos Cruces y Quinchilca) y de Los Ríos (Ríos Chirre y Rahue). El cliente requiere de estos aforos para poder efectuar balances sobre tramos largos de estos ríos, de modo de estimar lo mejor posible el aporte neto de aguas subterráneas. El servicio consistió no sólo en efectuar los aforos, sino que involucró también la elección de los tramos óptimos para efectuar los balances, de las secciones más idóneas para medir los caudales, y de las mejores metodologías que le permitieran al cliente lograr sus objetivos.

Anexo I.2 – METODOLOGÍA

Para lograr de la mejor manera los objetivos declarados por el cliente, se buscaron tramos lo más largos posibles, y que a la vez tuvieran la menor cantidad posible de tributarios, y que además éstos fueran pequeños. Los cauces seleccionados también debían cumplir con no tener regulación de tipo alguno, de modo de reflejar un régimen hidrológico natural. Los cinco ríos identificados inicialmente por el cliente fueron el Cruces, el San Pedro, el Bueno, el Pilmaiquén, y el Rahue. El Pilmaiquén se descartó, por tener una estructura de regulación en su nacimiento, en el lago Puyehue, además de una central hidroeléctrica con capacidad de regulación y otra pronta a entrar en servicio. El San Pedro y el Bueno se descartaron por tener caudales muy grandes en sus orígenes (en los lagos Riñihue y Ranco, respectivamente), que dificultarían notoriamente la determinación de los aportes netos subterráneos por diferencias.

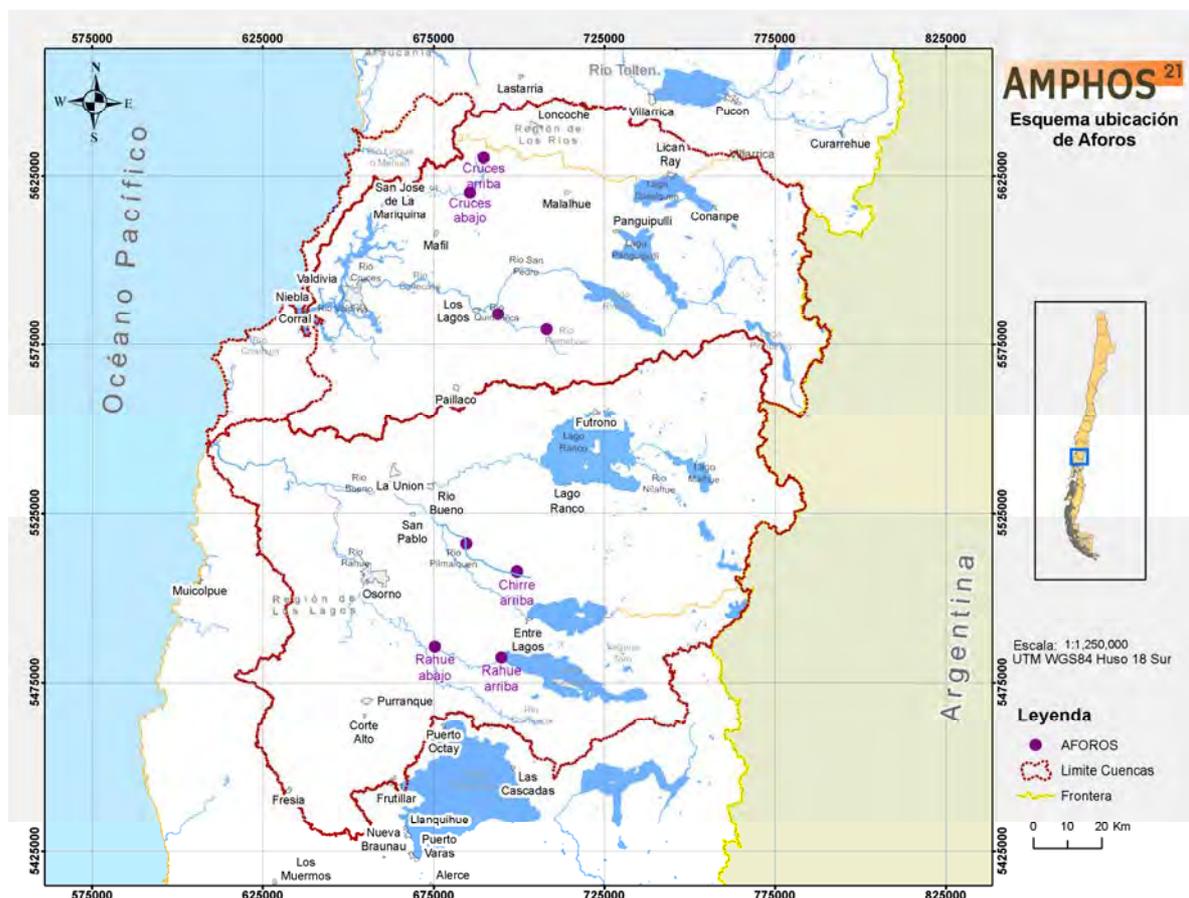


Figura Anexo 5. Mapa de situación de los aforos realizados en las cuencas del río Valdivia y Río Bueno. (Amphos 21).

En resumen, se aforaron los ríos Cruces y Rahue, agregándose los ríos Quinchilca (principal afluente sin regular del río San Pedro, por la ribera izquierda) y el río Chirre (principal afluente sin regular del río Pilmaiquén, por la ribera derecha). Los pares de aforos en un río dado se efectuaron siempre dentro del mismo día, de modo de minimizar la posibilidad de que ocurrieran cambios temporales en el caudal pasante.

No fue posible asegurar que no hubiese llovido en los días anteriores, sobre un período lo suficientemente largo como para que los ríos no estuviesen aún en recesión. Esto se verificó observando el comportamiento de las estaciones de la DGA en tiempo real

cercanas a las secciones de aforo, que corresponden a Río Cruces en Rucaco, Río Calle-Calle en Pupunahue, y Río Rahue en Desagüe Lago Rupanco.

En el caso del Río Cruces y del Quinchilca, se sabe que hubo un evento de mal tiempo unos pocos días antes de los aforos, lo que queda reflejado en el comportamiento de las Estaciones DGA "Río Cruces en Rucaco" y "Río Calle-Calle en Pupunahue", ubicadas en las cercanías de nuestras secciones de aforo. Las Figuras 1 y 2 muestran los caudales en estas estaciones, para los días de interés:

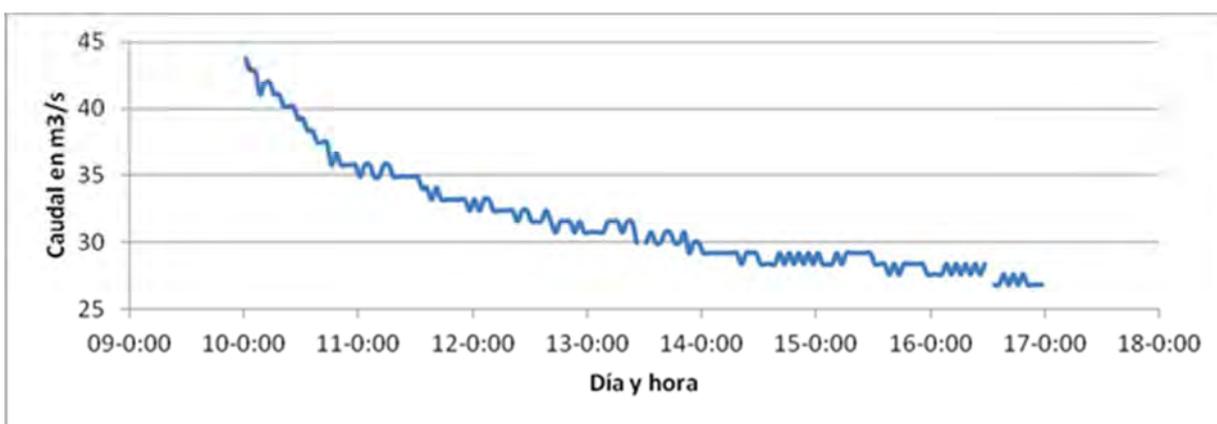


Figura Anexo 6. Caudal medido en la Estación DGA "Río Cruces en Rucaco", entre el 10 y 17 de Noviembre de 2012. El aforo en la sección "Río Cruces aguas abajo" se realizó 7.8 km aguas arriba de este lugar, el día Miércoles 14, desde las 20:37 hasta las 21:13 h.

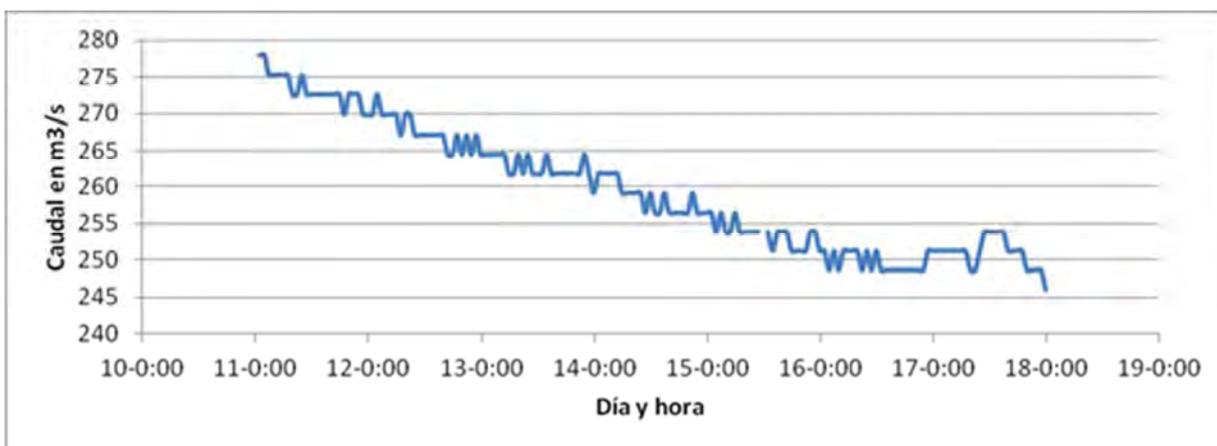


Figura Anexo 7. Caudal medido en la Estación DGA "Río Calle-Calle en Pupunahue", entre el 11 y 18 de Noviembre de 2012. Los aforos se hicieron en el río Quinchilca, principal tributario pero aún muy menor comparado con el San Pedro, el día Jueves 14.

En el caso de la segunda serie de aforos, para los ríos Chirre y Rahue, al parecer también había estado lloviendo en los días anteriores. Incluso, en la noche del 22 al 23, es probable que haya llovido en la cordillera, y se veía claramente la precipitación sobre el lago Rupanco y su cuenca, mientras aforábamos en su desagüe. En el caso del Río Rahue, los datos de la DGA muestran una tendencia gradual a la disminución de los caudales, pero se mantuvieron relativamente constantes en el día anterior, tal como se observa en la Figura 3:

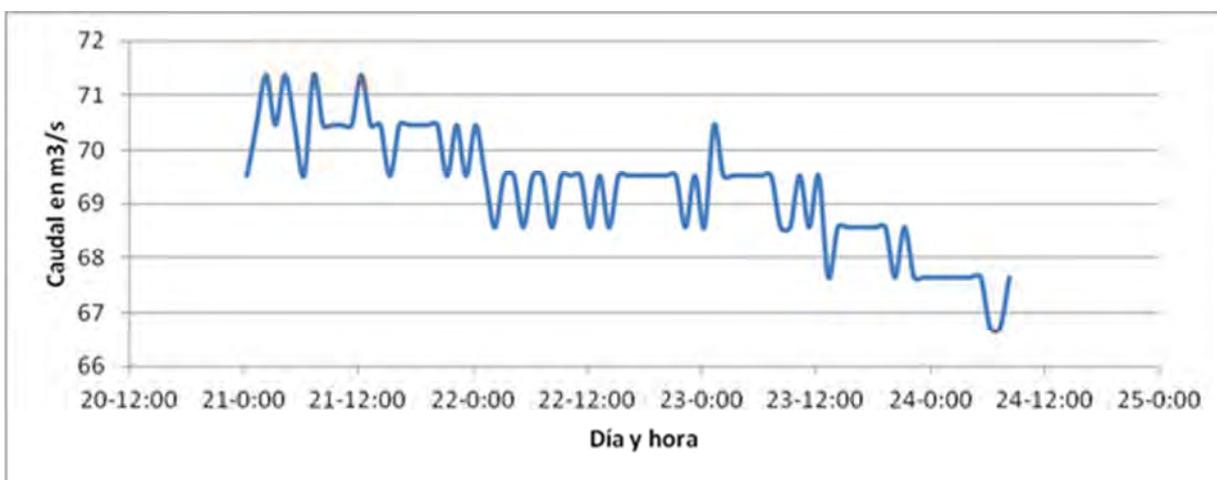


Figura Anexo 8. Caudal medido en la Estación DGA "Río Rahue en Desagüe Lago Rupanco", entre los días 21 y 24 de Noviembre de 2012. La medición con ADCP para la sección "Río Rahue aguas arriba" se realizó en este mismo lugar, el día Viernes 23 desde las 11 hasta las 11:35 h.

Al iniciar cada aforo, se hincó una estaca graduada, de modo de verificar que la cota no cambiara durante la ejecución de la medición. En todos los casos se tuvo que el caudal (y la cota en la estaca) se mantuvieron constantes durante cada uno de los aforos.

Todas las secciones escogidas se ubicaron en tramos con un solo cauce, y ojalá con presencia de riberas rocosas, de modo de evitar que pasara flujo hiporreico bajo el lecho del cauce, el que no puede medirse. La única excepción la constituye la sección de aguas arriba del Rahue, inmediatamente aguas abajo de su nacimiento en el desagüe del lago Rupanco, en que había un pequeño brazo por detrás de una isla, el que se aforó con correntómetro. En este caso se utilizó un molinete.

Los aforos se realizaron con un perfilador de corrientes Doppler acústico (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) marca RDI-Teledyne, modelo StreamPro. Este equipo estima la velocidad del flujo utilizando el principio físico del efecto Doppler: relaciona el cambio o desfase de frecuencia entre la fuente emisora ultrasónica del ADCP y un cuerpo receptor (las partículas suspendidas en la columna de agua), lo que permite conocer la velocidad de tales partículas. La medición vertical de velocidad es discreta, pues el dominio se divide en celdas de profundidad equiespaciadas, asignándosele a cada una la velocidad promediada sobre toda la celda. Se obtiene entonces un campo espacial discreto de velocidades para el perfil transversal medido (ver Figura 4). Luego, al integrar este campo (sujeto a algunas aproximaciones) se obtiene el caudal pasante. El ADCP StreamPro está diseñado para ríos con profundidades de hasta 6 m. Cubre la profundidad con un máximo de 30 celdas, las cuales tienen tamaño variable entre 2 y 20 cm. La precisión en la medición de velocidades es de ± 1 mm/s en cada celda.

Cada sección transversal requiere de al menos 4 pasadas de una ribera a otra, y cada pasada toma típicamente entre 3 a 10 minutos (dependiendo del ancho superficial).

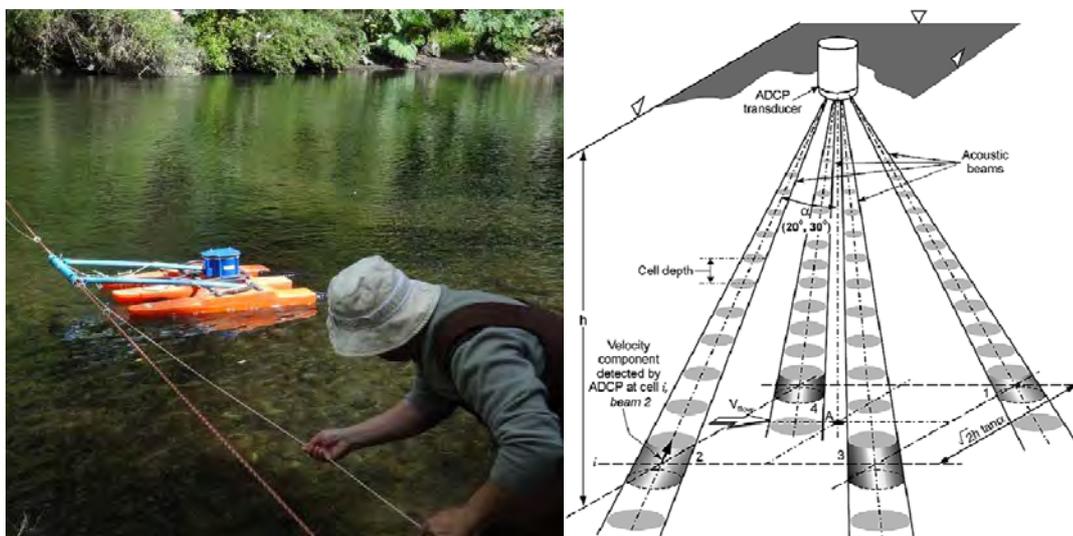


Figura Anexo 9. Medición del caudal en una sección transversal (Río Chirre) con un ADCP StreamPro (izq.) y principio de funcionamiento del sensor con 4 haces.

Se ocupó un protocolo más estricto que el recomendado por el USGS para sus aforos con ADCP. Éste recomienda efectuar 4 pasadas distintas, e informar el valor promedio del

caudal. Si cualquiera de las 4 mediciones tiene una desviación mayor al 5% con respecto al promedio, entonces deben efectuarse 4 pasadas más, para un total de 8, calculándose su promedio.

En esta asesoría, se hicieron en promedio entre 9 y 10 pasadas (repeticiones de la medida) por sección aforada (mínimo 8 pasadas, máximo 11). A su vez, en promedio, en cada pasada se recolectaron perfiles verticales en 189 ubicaciones a lo ancho de la sección del cauce. En cada vertical, el instrumento toma desde 30 puntos (en la sección más profunda) hasta un mínimo de 2 puntos (en la parte más somera). Por ende, asumiendo conservadormente una media de 16 celdas, en promedio se tomaron del orden de las 27.000 mediciones puntuales de velocidad en cada una de las ocho secciones aforadas.

Se revisaron todos y cada uno de los archivos de datos, para ver la posible ocurrencia de datos espúreos, los que deben eliminarse en el post-proceso. Esta revisión indicó que, con excepción de unos pocos puntos en la sección de aguas arriba del Rahue, no hubo datos erróneos. En todo caso, se verificó que los pocos datos erróneos, en el caso del Rahue arriba, no afectarían las estimaciones de caudal.

En siete de las ocho secciones pudo medirse sin problemas con el ADCP, sin requerirse el uso de correntómetro. Sólo en la sección de aguas arriba del Rahue, ya indicada, se tuvo que aforar un brazo menor con correntómetro. Para ello se ocupó un molinete Ott C-2, con hélice Número 6 calibrada individualmente de fábrica. Este equipo entrega una precisión de $\pm 1\%$ en la medición de velocidades puntuales. En todo caso, este brazo llevaba un caudal 3 órdenes de magnitud menor que el brazo principal, por lo que no fue necesario realizar un aforo de precisión. Sobre el ancho de 5.35 m, se tomaron 6 verticales, midiéndose en cada caso la velocidad a 0.6 veces la profundidad, la que se asumió como promedio en la vertical.

Determinado el caudal en las secciones de aguas arriba y de aguas abajo, se asumió que el aporte neto al tramo correspondía a la diferencia neta entre el caudal de aguas arriba y el de aguas abajo.

Utilizando ArcInfo 9.0, se calculó el área aportante a cada una de las 8 ubicaciones aforadas, así como la longitud total de cauces en tal subcuenca. Con esta información, se pudo estimar el aporte subterráneo neto por unidad de área de cuenca, así como por

unidad de longitud de cauce. Además, se determinó la longitud del cauce principal, entre cada sección de aguas arriba y de aguas abajo, usando Google Earth.

Anexo I.3 – RESULTADOS

Los caudales obtenidos con el ADCP en cada una de las 8 secciones aforadas se entregan en un archivo Excel en anexos. Cada aforo está en una hoja Excel distinta, entregándose los detalles para cada una de las pasadas, así como los valores promedio. Entre otras variables, se informa el número de verticales tomadas correctamente (# Ens.), el tiempo de inicio y de término de cada pasada, el ancho medido por el instrumento, el área total de la sección transversal, la velocidad promedio de escurrimiento (por continuidad: $V = Q/A$), y por supuesto el caudal (Q).

El caudal aforado con molinete en el brazo lateral, en la sección “Rahue aguas arriba”, alcanzó a los 536 L/s.

La siguiente tabla entrega los resultados finales para cada uno de los ríos aforados:

Cuenca	Q_{arriba} (m³/s)	Q_{abajo} (m³/s)	ΔQ (m³/s)	A (km²)	L_{tot} (km)	L_{cp} (km)	ΔQ/A (L/s/km²)	ΔQ/L_{tot} (L/s/km)
Cruces	26.4	28.4	2.0	62.1	37.7	29.8	32	53
Quinchilca	11.9	20.6	8.7	486.6	205.3	22.4	18	42
Chirre	4.61	5.39	0.78	46.4	26.3	25.0	17	30
Rahue	65.1	63.5	-1.6	74.1	33.9	33.2	-	-

En esta tabla se tiene que ΔQ corresponde a la diferencia de caudal entre la sección de aguas arriba y la de aguas abajo, A es el área de la subcuenca aportante al tramo, L_{tot} es la longitud total de cauces en la subcuenca, y L_{cp} es la longitud del cauce principal o longitud del tramo entre las secciones de arriba y abajo.

Anexo I.4 – CONCLUSIONES

Se llevaron a cabo los aforos en 4 ríos distintos, intermedios a grandes, de las regiones de los Ríos y los Lagos. Considerando las precisiones de los equipos, la metodología que

se utilizó al hacer los aforos, y la forma de seleccionar las secciones, se estima que éstos tienen errores totales en torno al 3%, máximo 4 %.

Es importante considerar que en todos los casos, es probable que los caudales estuviesen disminuyendo en el tiempo, a la escala del día, por el comportamiento de recesión tras un evento de precipitación (ya se indicó que los caudales no fluctuaron a la escala de la hora; o sea, se mantuvieron constantes mientras se aforaba, en cada una de las 8 secciones). Considerando una celeridad típica para ondas de recesión del orden de los 0.5 m/s, y una longitud promedio de los tramos de 28 km, se tendría que los caudales tardarían del orden de las 15 horas, muy aproximadamente, en bajar desde la sección de aguas arriba a la de aguas abajo.

En el caso del Cruces, se observa en la Figura 1 que el caudal se había mantenido constante sobre unas 24 horas, en el momento en que se efectuó el aforo aguas abajo, lo que garantiza que se midió "el mismo caudal", en régimen permanente, en ambos aforos, permitiendo la comparación. Eso sí, es importante notar que el error en los aforos es del orden de 1 m³/s (un 3.5% de 26.4 o de 28.4 m³/s), por lo que la precisión relativa de la diferencia de caudales es mala. Por otra parte, se compara favorablemente la estimación de la DGA, de 29 m³/s, con los 28.4 que aforamos nosotros, sobre todo considerando que hay un estero menor que contribuye entre nuestra sección y la estación DGA.

En el caso del Quinchilca, no puede decirse gran cosa, al no haber una estación de la DGA. Se observa que el Calle-Calle hacia aguas abajo estaba en clara recesión cuando se midió (Figura 2), sin embargo, el San Pedro (el cual al unirse con el Quinchilca y el Collileufú forman el Calle-Calle) es un río mucho mayor, por lo que este comportamiento pudo deberse a otros factores. De todas formas, como en este caso se consideró un tramo con un área aportante mayor, de modo de tener una mayor diferencia en los caudales, los resultados son más creíbles. Por decirlo de otra manera, aunque el Quinchilca hubiese estado en recesión, la diferencia de caudal entre aguas arriba y abajo es tan grande, que pensamos que los resultados obtenidos son reales, y corresponden bastante bien al aporte subterráneo.

No puede analizarse en detalle el caso del Chirre, el cual tampoco tiene estación en tiempo real. Se trata de un cauce cuya cuenca es primordialmente precordillerana, al igual que el Cruces y el Quinchilca, pero al contrario del Rahue. La evidencia de terreno (depósitos sobre barras, etc.) indica que probablemente estaba relativamente en régimen

permanente. Por otra parte, la diferencia de caudal fue del orden del 15% del caudal aforado, lo cual es relativamente grande. Por lo anterior, se estima que ésta fue una buena estimación de los aportes subterráneos.

El Rahue corresponde al caso más complicado. En efecto, el caudal medido en la estación DGA (Figura 3) se mantuvo relativamente constante en torno a $69 \text{ m}^3/\text{s}$ (promediando la variabilidad horaria) desde temprano el día 22, sobre todo el período de interés. El valor informado por la DGA a la misma hora en que nosotros aforábamos es de $68.5 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que nosotros medimos $65.1 \text{ m}^3/\text{s}$, una diferencia del 5%. En este caso, se obtuvo una disminución del caudal hacia aguas abajo, pero pensamos que éste no es un efecto real, sino que puede deberse simplemente al error en los aforos, que en este caso debiera estar en torno a $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Si el Rahue tuviese aportes por longitud de cauce similares al promedio de los demás ríos (42 L/s/km), ganaría del orden de $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Si tuviera aportes por área similares (22 L/s/km^2), ganaría del orden de $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Ambos valores son inferiores al error esperado de cada uno de los aforos, y con razón serán aún menores que el error compuesto de la diferencia. Para obtener conclusiones en el Rahue, podrían repetirse estos aforos en estiaje, cuando los caudales aportados por la cuenca superior sean mucho más bajos, de modo de poder discriminar de mejor manera los aportes (o sustracciones) de la napa. Tal vez incluso en estiaje, el error en los aforos siga siendo similar a los aportes.

En retrospectiva, se recomienda no escoger ríos que tengan una cuenca superior cordillerana, es preferible efectuar este tipo de estimaciones en período de estiaje, y tal vez habría una mejor idea considerar cuencas más grandes, aunque correspondiesen a tramos cortos, en vez de favorecer tramos largos sin tributarios.

Anexo I.5 – GRUPO DE TRABAJO

Jefe de proyecto: El Prof. Claudio Meier Vargas (Ingeniero Civil, UdeC; M. Sc., Colorado State University; Ph.D., University of Montana) estuvo a cargo del estudio y de los aforos. Estuvo presente en todas las visitas a terreno, eligió la ubicación de los tramos y de las secciones de medición, calculó las longitudes de los tramos, efectuó el aforo con molinete y redactó el informe.

Sub-jefe de proyecto: El Prof. Óscar Link (Ingeniero Civil, UdeC; Dr.Ing. Universidad Técnica de Darmstadt) participó en todas las visitas a terreno, ayudando con los aforos, y

secundó al Prof. Meier en la toma de decisiones respecto de la elección de las secciones de medición.

Ingeniero de proyecto: El Ing. Carlos Olivares Sepúlveda (Ingeniero Civil, UdeC y candidato a Magíster, Depto. de Ingeniería Civil, UdeC) efectuó los aforos con ADCP, con la colaboración de los demás. Redactó los párrafos sobre el ADCP, calculó el caudal aforado con molinete, y revisó los datos tomados por el ADCP.

Ayudante de terreno: El Sr. René Iribarren Catalán, técnico del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de Concepción, estuvo a cargo del bote, y participó en todas las mediciones con correntómetro y con ADCP.

Técnico SIG: El Sr. Alex Henríquez Brash, técnico del Laboratorio de Geomática e Informática Aplicada del Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción, estuvo a cargo de obtener las cuencas drenantes a los tramos estudiados, y determinar sus áreas y longitudes totales de cauces.

Anexo J – Modelo Numérico

(Formato digital estructurado por Cuenca)

Anexo K – Planos y figuras

(Formato digital estructurado por Cuenca)