



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

RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL RÍO MAULE: DETERMINACIÓN DE SECTORES FAVORABLES Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

DANIELA TAMARA MORENO PAVEZ

PROFESOR GUÍA:
CARLOS PARRAGUEZ DECKER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LINDA DANIELE
SERGIO KRAINZ RODRÍGUEZ

SANTIAGO DE CHILE
2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Geóloga
POR: Daniela Tamara Moreno Pavez
FECHA: 27/08/2015
PROFESOR GUÍA: Carlos Parraguez Decker

RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL RÍO MAULE: DETERMINACIÓN DE SECTORES FAVORABLES Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

Una reducción de las precipitaciones y una mayor intensidad de las mismas, acompañado, además, por un aumento en las temperaturas medias, son algunas de las modificaciones que el cambio climático global proyecta, para mediados y finales de siglo, en la zona centro-sur del país. De acuerdo a los escenarios planteados se prevé, para dicha zona, una disminución general en la disponibilidad de los recursos hídricos.

Por otro lado, para entonces, se ha estimado un incremento del crecimiento demográfico, del desarrollo social, y un aumento de la superficie agrícola proyectado que harán aumentar la demanda de agua en la región. Estos hechos pueden afectar particularmente a la cuenca del río Maule donde se espera que la demanda del recurso supere considerablemente la oferta del mismo. Es, por esto último, que el presente estudio, intenta buscar, en la recarga artificial de acuíferos, una solución efectiva a la problemática expuesta.

El objetivo principal de este estudio consiste en determinar sectores, dentro de la cuenca del Maule, que posean las características hidrogeológicas más adecuadas para realizar exitosos proyectos de recarga. Además, se pretende evaluar, a modo preliminar, la factibilidad económica relacionada con distintas alternativas metodológicas de recarga.

Analizando y evaluando las características hidrogeológicas del área de estudio, se ha observado que en la cuenca del río Maule, existen, efectivamente, al menos ocho sectores que por sus profundidades del nivel estático pueden ser potenciales sectores de recarga. Sin embargo, el sector S4 parece ser el mejor emplazamiento para realizar proyectos de recarga ya que posee una gran superficie y las mayores profundidades freáticas del área de estudio. En particular, dentro de dicho sector, el subsector SS4.2 se ha propuesto, finalmente, como adecuado para inducir procesos de recarga porque posee una permeabilidad aceptable y una fuente cercana y medible de agua.

Las cuatro alternativas de métodos de recarga propuestas en el subsector SS4.2, con tasa de infiltración de 6 m/día, resultaron ser proyectos preliminarmente viables. Sin embargo, la factibilidad real y el comportamiento de los materiales sujetos a recarga solo puede ser asegurada con estudios de terreno para conocer la estratigrafía, la tasa real de infiltración, y la calidad actual del agua. Conocimiento que se puede adquirir mediante la ejecución de proyectos pilotos de recarga.

DEDICATORIA

A mis sobrinos Catalina y Andrés.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco:

En primer lugar, a Dios, por hacer posible el estar con mis seres queridos.

A la Universidad de Chile, por su formación académica.

A Carlos Parraguez Decker, profesor guía de esta memoria, por la oportunidad de confiarme la realización de este trabajo. Por su orientación, gran disposición a resolver mis dudas, su paciencia, y por su excelente trato, humor y ánimo entregado.

A la profesora Linda Daniele y a Sergio Krainz, miembros de la comisión de esta memoria, por su excelente disposición a resolver mis dudas, por las acertadas correcciones que efectuaron para la mejora de este trabajo, y por el buen trato entregado.

A la Dirección General de Aguas y la Comisión Nacional de Riego, por facilitar el material solicitado, cuya información fue relevante para llevar a cabo los objetivos de este estudio.

A mi madre, Verónica Pavez, por apoyarme en estos seis años de carrera, que bien sabe ella no fueron fáciles. Por su incondicional amor a lo largo de mi vida. Por el esfuerzo realizado para mi formación académica y personal.

A mi hermana Natalia, y a mi cuñado Jorge, por su preocupación constante acerca de mis avances en la carrera, por su enorme e impagable ayuda a la hora de conseguir prácticas profesionales, y por el apoyo incondicional que me han entregado.

A mi compañero de vida, Hugo, por estar siempre a mi lado, por ser mi apoyo y mi fuerza, por sus consejos, por su enorme paciencia, y por hacer mi vida más feliz.

A mis compañeros de generación, Geología 2011, por hacer de la estadía en la U, una suma de momentos muy gratos, en especial a Kari Allende, por su amistad y compañía en la carrera, y por revisar mis escritos en esta tesis.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Formulación de estudio propuesto.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivos Generales	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Hipótesis de trabajo.....	2
1.4	Metodología.....	2
2	RECARGA ARTIFICIAL.....	5
2.1	Definición.....	5
2.2	Aspectos técnicos	5
2.3	Aspectos legales en Chile	6
2.4	Mecanismos de infiltración	6
2.4.1	Infiltración superficial.....	8
2.4.2	Infiltración en la zona no saturada	8
2.4.3	Infiltración en la zona saturada	9
2.5	Naturaleza y calidad del agua.....	9
2.5.1	Naturaleza	9
2.5.2	Calidad	9
2.6	Experiencias históricas internacionales	10
2.7	Experiencias en Chile.....	11
3	ANTECEDENTES GENERALES	13
3.1	Ubicación	13
3.2	Geomorfología y relieve.....	13
3.3	Estructuras	15
3.4	Hidrografía	15
3.5	Antecedentes climáticos	16
3.5.1	Clima.....	16
3.5.2	Precipitación y evaporación	17
4	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.....	18
4.1	Marco hidrogeológico.....	18
4.1.1	Unidades de roca.....	18
4.1.1.1	Basamento granítico (Pzg/Pzga)	18
4.1.1.2	Stocks aplíticos (Tr/Jsa).....	18
4.1.1.3	Intrusivos graníticos (Jig)	18
4.1.1.4	Formación Coya-Machalí (KTcm)	18
4.1.1.5	Formación Lo Valle (KTlv)	19
4.1.1.6	Cuerpos intrusivos sub-volcánicos (Tisv)	19
4.1.1.7	Flujos laháricos (TQfl)	19
4.1.2	Unidades de depósitos no consolidados	19
4.1.2.1	Rodados multicolores (PQrm)	19

4.1.2.2	Depósitos fluviales de cauces antiguos del río Maule (Qfcam)	20
4.1.2.3	Depósitos cineríticos (Qc)	21
4.1.2.4	Abanico fluvial Auquil-Astillero (Qafa)	21
4.1.2.5	Abanico del curso medio del río Perquilauquén (Qap)	22
4.1.2.6	Abanico de Linares (Qal)	22
4.1.2.7	Depósitos de abanico fluvial de los ríos Claro-Lontué (Qafcl)	23
4.1.2.8	Depósitos de abanico fluvial del río Maule (Qafm)	23
4.1.2.9	Abanico fluvial Ancoa- Achibueno (Qafaa)	24
4.1.2.10	Depósitos fluviales (Qf)	25
4.1.2.11	Depósitos de escombros de falda (Qe)	26
4.1.2.12	Depósitos fluviales de valles interserranos (Qfi)	26
4.1.2.13	Depósitos fluviales en cauces actuales (Qfa)	27
4.2	Permeabilidad de unidades hidrogeológicas	30
4.3	Acuíferos	33
4.3.1	Transmisibilidad	34
4.3.2	Permeabilidad	35
4.3.3	Coefficiente de almacenamiento	36
4.4	Niveles estáticos	36
4.5	Dirección del flujo subterráneo	39
4.6	Vulnerabilidad de acuíferos	39
4.7	Calidad del agua de la cuenca	41
4.7.1	Superficial	41
4.7.2	Subterránea	42
5	RESULTADOS	43
5.1	Determinación de sectores	43
5.1.1	Caracterización del sector S4	46
5.1.1.1	Ubicación	46
5.1.1.2	Estratigrafía	46
5.2	Determinación de subsectores	50
5.2.1	Subsector SS4.1	51
5.2.1.1	Volumen de almacenamiento	51
5.2.1.2	Fuentes de agua	51
5.2.1.3	Mecanismos de recarga	53
5.2.2	Subsector SS4.2	54
5.2.2.1	Volumen de almacenamiento	54
5.2.2.2	Fuentes de agua	54
5.2.2.2.1	Caudales	54
5.2.2.2.2	Calidad	57
5.2.2.3	Mecanismos de recarga	59
5.2.2.4	Tasas de infiltración	59
5.3	Evaluación económica subsector SS4.2	62
5.3.1	Antecedentes relevantes	62
5.3.2	Caudal de infiltración susceptible	62
5.3.3	Métodos de infiltración	64
5.3.3.1	Método 1: zanjas de infiltración	64
5.3.3.2	Método 2: pozos secos en la zona no saturada	66
5.3.3.3	Método 3: pozos en la zona saturada	70
5.3.4	Alternativas de recarga	73
5.3.4.1	Alternativa 1: zanjas de infiltración	73

5.3.4.2	Alternativa 2: pozos secos en la zona no saturada	74
5.3.4.3	Alternativa 3: pozos en la zona saturada.....	76
5.3.4.4	Alternativa 4: zanjas y pozos en la zona saturada	77
5.3.5	Implicancias en la recarga	78
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	83
	ANEXO A: NIVELES ESTÁTICOS Y PARÁMETROS ELÁSTICOS	89
	ANEXO B: SISTEMAS DE RECARGA.....	98
	ANEXO C: REGISTRO HISTÓRICO NIVELES ESTÁTICOS TALCA	106
	ANEXO D: FLUVIOMETRÍA.....	109

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN SUPERFICIAL, EN LA ZONA NO SATURADA Y EN LA ZONA SATURADA, SEGÚN DISTINTOS PARÁMETROS. SS: SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN. FUENTE: MODIFICADO DE JIMÉNEZ, 2013.	7
TABLA 2: CARACTERÍSTICAS DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO PARA RECARGA ARTIFICIAL. FUENTE: UNESCO (2005), MODIFICADO POR JIMÉNEZ, 2013.	9
TABLA 3: TRANSMISIBILIDAD PROMEDIO (m^2/d) DE CADA ACUÍFERO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE DGA, 2010.	35
TABLA 4: PERMEABILIDAD PROMEDIO (m/d) DE CADA ACUÍFERO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE DGA, 2010. ...	35
TABLA 5: FLUCTUACIÓN DE LOS NIVELES ESTÁTICOS, INDICANDO VALORES PROMEDIO, MÍNIMO Y MÁXIMO REGISTRADOS EN 9 ESTACIONES DE LA DGA PARA LA CUENCA DEL MAULE, EN LAS CERCANÍAS DE LA CIUDAD DE TALCA, ENTRE LOS AÑOS 1985 Y 1989. FUENTE: DATOS PROPORCIONADOS POR LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS.....	36
TABLA 6: DETALLE DE COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DEL SECTOR 4. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS84, HUSO 19S.	47
TABLA 7: DATOS PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO.....	51
TABLA 8: DATOS PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO DEL SUBSECTOR SS4.2.....	54
TABLA 9: CAUDALES (m^3/s) EN ESTACIÓN RÍO LIRCAY EN PUENTE LAS RASTRAS, A DISTINTAS PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA, PARA PERÍODOS ANUAL (ABRIL-MARZO) Y ESTACIONAL (ABRIL-SEPTIEMBRE; OCTUBRE-MARZO). FUENTE: DGA, 1992.....	55
TABLA 10: CAUDALES MENSUALES (m^3/s) EN ESTACIÓN RÍO LIRCAY EN PUENTE LAS RASTRAS, A DISTINTAS PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA. FUENTE: DGA, 1992.....	56
TABLA 11: POSIBLES FACTORES INCIDENTES EN LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO LIRCAY. DBO5: DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, CF: COLIFORMES FECALES, CT: COLIFORMES TOTALES. FUENTE: DGA, 2004A.	57
TABLA 12: COMPARACIÓN DE VALORES MEDIDOS DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS, EN ESTACIÓN RÍO LIRCAY EN PANAMERICANA, CON VALORES LÍMITES MÁXIMOS ESTABLECIDOS POR LA NORMA NCH409, REQUISITO DE AGUA POTABLE.....	58
TABLA 13: COMPARACIÓN DE VALORES MEDIDOS DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS, EN ESTACIÓN RÍO LIRCAY EN PANAMERICANA, CON VALORES LÍMITES MÁXIMOS ESTABLECIDOS POR LA NORMA NCH1333, REQUISITO DE AGUA PARA RIEGO.	58
TABLA 14: DATOS Y VALORES REFERENCIALES PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MÉTODOS DE INFILTRACIÓN EN EL SUBSECTOR SS4.2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	62
TABLA 15: CÁLCULO DEL CAUDAL MÍNIMO PARA EL PUNTO 1, Y DATOS UTILIZADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	63
TABLA 16: CUBICACIÓN Y PRESUPUESTO PARA ZANJAS DE INFILTRACIÓN DE 25 M DE LARGO, 2 M DE ANCHO Y 5 M DE PROFUNDIDAD. VALOR DE LA UF CONSIDERADO AL 11/03/2015: \$ 24.559,44. FUENTE: PRECIOS DE REFERENCIA EN UF SEGÚN “LISTA OFICIAL DE PRECIOS DE OBRAS DE PAVIMENTACIÓN PARA COBRO POR GASTOS DE INSPECCIÓN AÑO 1995”, MINVU Y EL “BOLETÍN DE PRECIOS N° 276 DE MAYO-JUNIO DE 1996” DEL SERVIU METROPOLITANO. MINVU (1996).	66
TABLA 17: CAUDAL INFILTRADO (Q) POR UNA ZANJA DE 25x2x5 m^3 . SE INDICA EL COSTO ESTIMADO DE UNA ZANJA DE INFILTRACIÓN, ADEMÁS DE, EL NÚMERO DE ZANJAS NECESARIAS PARA INFILTRAR EL 100, 80, 50, 20 Y 10 % DEL CAUDAL SUSCEPTIBLE DE 15.236,96 L/s.	66
TABLA 18: CUBICACIÓN Y PRESUPUESTO PARA POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA NO SATURADA, DE 20 M DE PROFUNDIDAD Y 2 M DE DIÁMETRO. VALOR DE LA UF CONSIDERADO AL 11/03/2015: \$ 24.559,44. FUENTE: PRECIOS DE REFERENCIA EN UF SEGÚN	

“LISTA OFICIAL DE PRECIOS DE OBRAS DE PAVIMENTACIÓN PARA COBRO POR GASTOS DE INSPECCIÓN AÑO 1995”, MINVU Y EL “BOLETÍN DE PRECIOS Nº 276 DE MAYO-JUNIO DE 1996” DEL SERVIU METROPOLITANO. MINVU (1996). 69

TABLA 19: CAUDAL INFILTRADO (Q) POR UN POZO EN LA ZONA NO SATURADA DE 20 M DE PROFUNDIDAD Y 2 M DE DIÁMETRO. SE INDICA EL COSTO ESTIMADO DE UN POZO EN LA ZONA NO SATURADA, ADEMÁS DE, EL NÚMERO DE ZANJAS NECESARIAS PARA INFILTRAR EL 100, 80, 50, 20 Y 10 % DEL CAUDAL SUSCEPTIBLE DE 15.236,96 L/s.	70
TABLA 20: CUBICACIONES Y ESTIMACIÓN DE COSTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA SATURADA, DE 65 M DE PROFUNDIDAD HABILITADO CON CRIBAS EN 20 M. FUENTE: MODIFICADO DE CNR, 2013.	72
TABLA 21: CAUDAL INFILTRADO (Q) POR UN POZO EN LA ZONA SATURADA DE 65 M DE PROFUNDIDAD Y 12” DE DIÁMETRO, HABILITADO CON CRIBAS EN 20 M. SE INDICA EL COSTO ESTIMADO DE UN POZO EN LA ZONA SATURADA, ADEMÁS DE, EL NÚMERO DE POZOS NECESARIOS PARA INFILTRAR EL 100, 80, 50, 20 Y 10 % DEL CAUDAL SUSCEPTIBLE DE 15.236,96 L/s.....	72
TABLA 22: DATOS GENERALES DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	73
TABLA 23: VALORES ECONÓMICOS ESTIMADOS Y CALCULADOS INVOLUCRADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL QUE INFILTRA APROXIMADAMENTE 781,85 L/s, MEDIANTE 36 ZANJAS DE INFILTRACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
TABLA 24: VALOR ACTUAL NETO (V.A.N.) ESTIMADO EN UN PROYECTO DE RECARGA CON 36 ZANJAS DE INFILTRACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
TABLA 25: VALORES ECONÓMICOS ESTIMADOS Y CALCULADOS INVOLUCRADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL MEDIANTE 174 POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA NO SATURADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	75
TABLA 26: VALOR ACTUAL NETO (V.A.N.) ESTIMADO EN UN PROYECTO DE RECARGA CON 174 POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA NO SATURADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	75
TABLA 27: VALORES ECONÓMICOS ESTIMADOS Y CALCULADOS INVOLUCRADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL MEDIANTE 36 POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA SATURADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
TABLA 28: VALOR ACTUAL NETO (V.A.N.) ESTIMADO EN UN PROYECTO DE RECARGA CON 36 POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA SATURADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
TABLA 29: VALORES ECONÓMICOS ESTIMADOS Y CALCULADOS INVOLUCRADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL MEDIANTE 24 ZANJAS Y 12 POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA SATURADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78
TABLA 30: VALOR ACTUAL NETO (V.A.N.) ESTIMADO EN UN PROYECTO DE RECARGA CON 24 ZANJAS Y 12 POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA SATURADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA. FUENTE: MURRAY ET AL. 2009.....	4
FIGURA 2: CLASIFICACIÓN DE MECANISMOS DE INFILTRACIÓN, DE ACUERDO AL NIVEL DONDE ES RECARGADA EL AGUA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, CON BASE A LAS METODOLOGÍAS REVISADAS EN LA BIBLIOGRAFÍA.....	7
FIGURA 3: ESQUEMA GENERAL DEL PROYECTO “PLAN PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL A LOS ACUÍFEROS DEL VALLE DEL ACONCAGUA, DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS (DOH). FUENTE: TOMADO DE ARDILES, 2013.....	12
FIGURA 4: ZONA DE ESTUDIO, CUENCA DEL RÍO MAULE, VII REGIÓN DE CHILE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ARCHIVOS FORMATO <i>SHAPE</i> DE ALBERS, 2012.....	13
FIGURA 5: UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS Y ELEVACIONES (M.S.N.M.) DE LA CUENCA DEL MAULE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE IMAGEN DEM Y ARCHIVOS FORMATO <i>SHAPE</i> DE ALBERS, 2012. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS84, ZONA 19S.....	14
FIGURA 6 : RED HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA DEL MAULE. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS 84, ZONA 19S. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ARCHIVOS FORMATO <i>SHAPE</i> DE ALBERS, 2012.	16
FIGURA 7: ISOLINEAS DE PRECIPITACIÓN Y EVAPORACIÓN (MM/AÑO) EN LA CUENCA DEL MAULE. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS 84, ZONA 19S. FUENTE: MODIFICADO DE DGA, 1988.	17
FIGURA 8: MAPA HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE. FUENTE: MODIFICADO DE HAUSER, 1995.	28
FIGURA 9: LEYENDA DEL MAPA HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE. FUENTE: MODIFICADO DE HAUSER, 1995.....	29
FIGURA 10: PERMEABILIDAD DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS, SEGÚN ESPINOZA, 2005. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS84, ZONA 19S. FUENTE: MODIFICADO DE ESPINOZA, 2005.....	30
FIGURA 11: PERFILES HIDROGEOLÓGICOS A-A' Y B-B', EN CUENCA DEL MAULE. FUENTE: MODIFICADO DE ESPINOZA, 2005.	32
FIGURA 12: PERFILES HIDROGEOLÓGICOS C-C', D-D', EN CUENCA DEL MAULE. FUENTE: MODIFICADO DE ESPINOZA, 2005.	32
FIGURA 13: PERFILES HIDROGEOLÓGICOS E-E' Y F-F', EN CUENCA DEL MAULE. FUENTE: MODIFICADO DE ESPINOZA, 2005.	33
FIGURA 14: MAPA DE LOS CINCO ACUÍFEROS DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS84, HUSO 19 SUR. FUENTE: MODIFICADO DE CNR, 2013.	33
FIGURA 15: TRANSMISIBILIDADES (M ² /DÍA) DE 205 POZOS EN LA CUENCA DEL MAULE. LA CALIFICACIÓN DE TRANSMISIBILIDADES BAJAS, MEDIAS Y ALTAS SE HA REALIZADO EN BASE A LOS RANGOS REFERENCIALES EXPUESTOS EN EL MANUAL DE NORMAS Y PROCEDIMIENTOS DE LA DGA (2008B). PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS 84, ZONA 19S. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS PROVENIENTES DEL INFORME DGA, 2010.	34
FIGURA 16: PERMEABILIDADES (M/DÍA) DE 205 POZOS EN LA CUENCA DEL MAULE. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS 84, ZONA 19S. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS PROVENIENTES DEL INFORME DGA, 2010.	35
FIGURA 17: ISOVARIACIÓN DE PROFUNDIDAD DE NIVELES ESTÁTICOS EN LA CUENCA DEL MAULE. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS 84, ZONA 19S. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, A PARTIR DE INFORMACIÓN OBTENIDA DE CIREN, 1994.....	37
FIGURA 18: MAPA DE INTERPOLACIÓN POR <i>KRIGING</i> ORDINARIO, DE NIVELES ESTÁTICOS (M), EN LA CUENCA DEL MAULE. LA SIMBOLOGÍA DE PUNTOS SE REFIERE A AQUELLOS DATOS MEDIDOS EN LA CUENCA, PROVISTOS POR LA DGA (2010), Y A PARTIR DE LOS CUALES SE REALIZÓ LA INTERPOLACIÓN. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS84, ZONA 19S. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE LA REFERENCIA DGA, 2010.	38

FIGURA 19: LÍNEAS EQUIPOTENCIALES EN LA CUENCA DEL MAULE. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS84, ZONA 19S. FUENTE: MODIFICADO DE DGA, 2011.	39
FIGURA 20: MAPA VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS SEGÚN MÉTODO GOD, CUENCA DEL RÍO MAULE. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS84, ZONA 19S. FUENTE: MODIFICADO DE ESPINOZA, 2005.	40
FIGURA 21: UBICACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA. PROYECCIÓN UTM, DATUM WGS 84, ZONA 19S. FUENTE: HAUSER (1995).	42
FIGURA 22: DIAGRAMA DE PIPER DE 13 MUESTRAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. FUENTE: TOMADO DE HAUSER, 1995.	42
FIGURA 23: MAPA DE LOS SECTORES RESULTANTES DE DELIMITAR PROFUNDIDADES MÍNIMAS DE NIVEL ESTÁTICO DE 30 M. PARA HACER REFERENCIA A ESTOS 8 SECTORES SE HAN NOMBRADO COMO S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 Y S8. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	44
FIGURA 24: ÁREA PARA RECARGA EN SECTOR CLARO. FUENTE: CNR, 2013.	45
FIGURA 25: ÁREA PARA RECARGA EN SECTOR MAULE-LONCOMILLA. FUENTE: CNR, 2013.	45
FIGURA 26: UBICACIÓN DEL SECTOR S4. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ARCHIVOS FORMATO <i>SHAPE</i> DE ALBERS, 2012.	46
FIGURA 27: COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DE LOS POZOS 1 Y 2. FUENTE: MODIFICADO DE DGA (2010) Y EXPEDIENTES DGA.	47
FIGURA 28: COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DE LOS POZOS 3 Y 4. FUENTE: MODIFICADO DE EXPEDIENTES DGA.	48
FIGURA 29: COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DE LOS POZOS 5 Y 6. FUENTE: MODIFICADO DE EXPEDIENTES DGA.	48
FIGURA 30: COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DE LOS POZOS 7 Y 8. FUENTE: MODIFICADO DE EXPEDIENTES DGA.	49
FIGURA 31: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL POZO 9. FUENTE: MODIFICADO DE DGA (2010).	49
FIGURA 32: SUBSECTORES SS4.1, SS4.2 Y SS4.3, OBTENIDOS SEGÚN LAS DISTINTAS PERMEABILIDADES DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS PRESENTES, ASIGNADAS POR ESPINOZA (2005). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	50
FIGURA 33: RED DE CANALES DE RIEGO EN LOS SUBSECTORES SS4. 1 Y SS4.2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE IMAGEN DE IDE-CHILE.	52
FIGURA 34: FOTOGRAFÍA TOMADA DESDE EL PUENTE BAJO EL CUAL SE ENCUENTRA EL CANAL QUE UNE LOS EMBALSES COLBÚN Y MACHICURA. EN ESTE ES POSIBLE APRECIAR LA TURBIEDAD DEL AGUA PROVENIENTE DESDE EL EMBALSE COLBÚN. FECHA DE LA FOTOGRAFÍA: AGOSTO 2014. COORDENADAS EN UTM, WGS84, ZONA 19S. FUENTE: GENTILEZA CARLOS PARRAGUEZ DECKER.	53
FIGURA 35: CAUDALES (m^3/s) ANUALES Y ESTACIONALES PARA DISTINTAS PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA EN ESTACIÓN RÍO LIRCAY EN PUENTE LAS RASTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE DGA, 1992.	55
FIGURA 36: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL, CAUDALES (m^3/s) A DIFERENTES PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA, EN ESTACIÓN RÍO LIRCAY EN PUENTE LAS RASTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE DGA, 1992.	56
FIGURA 37: ÁREAS QUE POSEEN TASAS DE INFILTRACIÓN SUPERIORES A 6 M/DÍA, SEGÚN CIREN, 2012. FUENTE: MODIFICADO DE CIREN, 2012.	60
FIGURA 38: ÁREAS QUE POSEEN TASAS DE INFILTRACIÓN SUPERIORES A 6 M/DÍA, SEGÚN CIREN, 2012. FUENTE: MODIFICADO DE CIREN, 2012.	61
FIGURA 39: CUENCAS DELIMITADAS SOBRE EL RÍO LIRCAY, DEFINIDAS A PARTIR DE DOS PUNTOS EN EL CAUCE (PUNTO 1 Y 2), MEDIANTE HERRAMIENTA <i>WATERSHEED</i> CON <i>SOFTWARE ARCGIS</i> . NOTAR QUE EL LÍMITE DE CABECERA DE AMBAS CUENCAS ES COINCIDENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	63

FIGURA 40: FACTORES DE SEGURIDAD (Cs). FUENTE: MODIFICADO DE AZZOUT <i>ET AL.</i> 1994.	65
FIGURA 41: ESQUEMA DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN POZO DE INFILTRACIÓN. 1) ALIMENTACIÓN, 2) DECANTADOR (OPCIONAL), 3) CÁMARA DE REBASE (OPCIONAL), 4) REBASE, 5) TUBERÍA DE CONEXIÓN, 6) POZO, 7) GEOTEXTIL, 8) CUBIERTA, 9) ALIMENTACIÓN SUPERFICIAL (OPCIONAL). FUENTE: MODIFICADO DE MINVU, 1996.	67
FIGURA 42: POZO DE INFILTRACIÓN SIMPLE ALIMENTADO DESDE LA SUPERFICIE. 1) CUBIERTA PERMEABLE, 2) RELLENO, 3) GEOTEXTIL (LÍNEA ROJA), 4) PIEZÓMETRO, 5) ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL. FUENTE: MODIFICADO DE MINVU, 1996.	67
FIGURA 43: POZO DE INFILTRACIÓN CON DECANTADOR Y VOLUMEN PARCIAL SIN RELLENO. 1) CUBIERTA PERMEABLE, 2) RELLENO, 3) GEOTEXTIL (LÍNEA ROJA), 4) PIEZÓMETRO, 5) ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL 6) DECANTADOR, 7) CÁMARA REBASE, 8) TUBERÍA ALIMENTACIÓN, 9) VOLUMEN SIN RELLENO, 10) ANTEPOZO DE HORMIGÓN ARMADO, 11) TUBO VENTILACIÓN, 12) TAPA CÁMARA. FUENTE: MODIFICADO DE MINVU, 1996.	68
FIGURA 44: POZO DE INFILTRACIÓN CON DECANTADOR Y REBASE SOBRE EL MISMO POZO. 1) A 12) MISMO QUE EN FIGURAS 38 Y 39. FUENTE: MODIFICADO DE MINVU, 1996.	68
FIGURA 45: DISEÑO PROPUESTO DE UN POZO EN LA ZONA SATURADA Y LOS PARÁMETROS QUE PERMITEN CALCULAR EL CAUDAL INFILTRADO MEDIANTE EL MÉTODO DE LEFRANC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	71
FIGURA 46: DISEÑO ESQUEMÁTICO DE 36 ZANJAS DE INFILTRACIÓN EN UN ÁREA DE 60.000 M ² . FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	73
FIGURA 47: DISEÑO ESQUEMÁTICO DE 174 POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA NO SATURADA EN UN ÁREA DE 50.000 M ² . FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	75
FIGURA 48: DISEÑO ESQUEMÁTICO DE 36 POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA SATURADA, EN UNA SUPERFICIE DE 22.500 M ² . FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 49: DISEÑO ESQUEMÁTICO DE 24 ZANJAS Y 12 POZOS DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA SATURADA, EN UN ÁREA APROXIMADA DE 43.200 M ² . FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
FIGURA 50: ÁREA DE RECARGA ESTIMADA DE 6 KM ² (DOBLE LÍNEA PUNTEADA NEGRA). SE INDICA, EN ROJO, EL ÁREA DE ESQUEMA DE ZANJAS, CORRESPONDIENTE A UNA SUPERFICIE ESTIMADA DE 60.000 M ² , PERTENECIENTE A LA ALTERNATIVA 1. EL TRAZO A-B ES DE APROXIMADAMENTE 2.000 M, Y SE HA DIBUJADO CON EL FIN DE ESTIMAR EL TIEMPO QUE TARDARÍA EL FLUJO SUBTERRÁNEO EN DESPLAZARSE DESDE A HASTA B.	79

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación de estudio propuesto

A lo largo de los últimos años, ha surgido una preocupación mundial por las consecuencias que podría ocasionar el cambio climático sobre la vida en el planeta. En Chile, la preocupación acerca de esta temática no es una excepción. Es por ello, que se han llevado a cabo numerosos estudios con el fin de evaluar los potenciales impactos del cambio climático (MMA, 2011; CEPAL, 2009; CONAMA, 2006). Estos estudios, utilizando modelos de circulación global (GCM), bajo distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), proyectan una disminución de las precipitaciones que afectarían a la zona central y sur del país (entre los paralelos 30° y 42°S, aproximadamente). Esta reducción se haría más importante hacia fines de siglo, con valores que bordean el 30%. Junto con ello, se han realizado estudios sobre la ocurrencia de eventos extremos de precipitaciones, estimándose un aumento en la probabilidad de incidencia de eventos de sequía, hacia mediados y fines de siglo, junto con una mayor ocurrencia de eventos de precipitación intensa y temperaturas elevadas, aumentando el riesgo de inundaciones (CEPAL, 2012). En el caso de la temperatura, se proyecta un incremento en todas las regiones del país, con cambios más intensos en un gradiente oeste-este, alcanzando variaciones entre 2°C y 4°C para finales de siglo. A raíz de lo anterior, se prevén dos efectos principales sobre los caudales. En primer lugar, una disminución de los volúmenes totales disponibles en la cuenca, dada la reducción de las precipitaciones y la menor capacidad de acumulación de nieve en la cordillera; y en segundo lugar, cambios en la estacionalidad de estos caudales, dado por un adelantamiento en la fecha del centroide respecto al período histórico (Vicuña y Meza, 2013; MMA, 2011).

La Cuenca del río Maule, concentra gran parte del desarrollo agrícola del país. Junto a las Regiones V, Metropolitana y VI, representan más del 80% de la superficie plantada (CONICYT, s.a.). Este rubro, además, hace uso de cerca del 80% del agua dulce disponible (MMA, 2011). Por otro lado, el crecimiento demográfico proyectado para mediados de siglo, aumentaría la demanda de los recursos provenientes de dicha actividad. Sin embargo, la escasez de la fuente productiva de la agricultura, el agua, provocaría graves desajustes entre la oferta y demanda del recurso. Esta situación, de alta vulnerabilidad al cambio global, debe ser incorporada, para una correcta planificación, a la gestión de los recursos hídricos a nivel nacional (MMA, 2011).

El presente trabajo, de acuerdo a las necesidades hídricas proyectadas para fines de siglo, en particular, para la cuenca del río Maule, intenta establecer sectores favorables para realizar proyectos de recarga artificial. Además, busca evaluar la factibilidad económica de distintas alternativas metodológicas de recarga.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales

- 1) Buscar sectores, dentro de la cuenca del río Maule, que posean características hidrogeológicamente apropiadas para realizar en ellos proyectos de recarga artificial.
- 2) Evaluar, económicamente, posibles métodos de recarga artificial.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Comprender el Marco Hidrogeológico de la cuenca del Maule.
- 2) Conocer el comportamiento de los niveles estáticos dentro de la cuenca del Maule.
- 3) Reconocer la estratigrafía de la zona vadosa o de aireación.
- 4) Reconocer las distintas unidades acuíferas que toman lugar en la zona de estudio, y además, establecer sus principales características, tales como: tipo de acuífero, conductividad hidráulica o permeabilidad (K), transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento (S).
- 5) Conocer la calidad físico-química del agua participante en la recarga, de acuerdo a la normativa legal vigente.
- 6) Comprender el comportamiento hidrológico de la cuenca. En particular, conocer los montos y distribución de las precipitaciones en ella, y además, conocer los caudales de agua pertenecientes a las fuentes de recarga.
- 7) Escoger y delimitar los sectores más apropiados para realizar en ellos proyectos de recarga artificial.
- 8) Estimar un volumen de almacenamiento a cada sector determinado, anteriormente.
- 9) Establecer los mecanismos o instrumentos de recarga más apropiados para cada sector.
- 10) Realizar una evaluación económica, preliminar, de uno o varios tipos de mecanismos de recarga.

1.3 Hipótesis de trabajo

Debido a que se tienen antecedentes que avalan la existencia de importantes acuíferos en la cuenca del Maule (DGA, 2010; CNR, 2013), se espera encontrar sitios que posean las características hidrogeológicas adecuadas para llevar a cabo un proyecto de recarga artificial. Se espera, además, que la implementación de proyectos de recarga artificial en la cuenca del Maule, beneficie, por un lado, a la comunidad (aumentando la disponibilidad del recurso hídrico), como también a la entidad responsable de este tipo de proyectos (beneficio económico).

1.4 Metodología

Referente a los objetivos específicos, la metodología es la siguiente:

Objetivo específico 1: La hidrogeología de la cuenca fue revisada en Hauser (1995).

Objetivo específico 2: Se revisó la siguiente bibliografía: registros históricos de niveles estáticos en estaciones de la cuenca del Maule (DGA); Ingreso cartografía y base datos de Zonas Hidrogeológicas Homogéneas (ZHH) de las regiones IV-VII. CIREN (1994); Levantamiento de información hidrogeológica para modelación cuenca del río Maule. DGA (2010). A partir de la información contenida en el informe DGA (2010), (anexo A), se realizó una interpolación de, aproximadamente, 400 datos de niveles estáticos, mediante el software ARCGIS10.1. Para esto, se trabajó con el método de *Kriging* Ordinario, el cual ha sido ampliamente utilizado en la interpolación de niveles de agua subterránea (Olea y Davis, 1999; Prakash y Singh, 2000; Desbarats et al. 2002; Kumar y Remadevi, 2006; Theodossiou y Latinopoulos, 2006; Ahmadi y Sedghamiz 2007; Abedini et al. 2008; Yang et al. 2008; Kholghi and Hosseini 2009; Nikroo et al., 2009; Sun et al. 2009; Dash et al. 2010;).

Objetivo específico 3: Para su determinación se utilizó la información de columnas estratigráficas, provenientes del informe DGA (2010), y de expedientes de la DGA.

Objetivo específico 4: Los acuíferos presentes en la cuenca del río Maule, se obtuvieron del informe “Estudio diagnóstico de zonas potenciales de recarga de acuíferos en las regiones de Arica y Parinacota a la región del Maule” (CNR, 2013). Datos puntuales de permeabilidad y transmisibilidad se obtuvieron del informe DGA (2010). Estos datos fueron agrupados y promediados para cada acuífero.

Objetivo específico 5: Se utilizaron los datos mensuales Hidrometeorológicos, en línea, de calidad de aguas, proporcionados por la DGA, de la estación Río Lircay en Panamericana, entre los años 2005 a 2014. Se compararon los datos obtenidos, con aquellos que las Normas NCh1333 y NCh409 establecen como límites máximos para usos de riego y agua potable, respectivamente.

Objetivo específico 6: Se delimitaron los sectores favorables a la infiltración, de acuerdo a las profundidades de niveles estáticos obtenidas de la interpolación. Posteriormente, de acuerdo a condiciones de permeabilidad, se delimitaron subsectores (áreas más pequeñas y abordables desde el punto de vista de un proyecto), candidatos a una evaluación económica.

Objetivo específico 7: Las precipitaciones y la evaporación de la cuenca, se obtuvieron del documento Balance Hídrico (1988). Los caudales utilizados, se obtuvieron del informe “Análisis Estadístico de Caudales en los ríos de Chile” DGA (1992). En dicho documento, se trabajó con la serie completa, entre los años 1950 a 1990, de la estación Río Lircay en puente Las Rastras.

Objetivo específico 8: El volumen de almacenamiento se determinó de acuerdo a la siguiente expresión:

Ecuación 1: Expresión matemática para calcular el volumen de almacenamiento. Fuente: Jiménez (2013).

$$V = \Delta h * A * S$$

En donde:

– V: Volumen de almacenamiento (m³).

- Δh : Espesor no saturado (m).
- S: Coeficiente de almacenamiento.
- A: Área considerada para recarga (m²).

El espesor disponible para almacenamiento, Δh , se determinó considerando los diferentes niveles de agua de un acuífero, ya sean estáticos o dinámicos. En relación a esto, Murray (2009), realizó una clasificación de 5 niveles: 1 representa el fondo del acuífero, 2 es el fondo de la elevación dinámica, 3 es la profundidad actual, 4 la profundidad promedio y 5 la parte superior del acuífero. Esta clasificación se ilustra en la Figura 1.

El espesor no saturado disponible para el acuífero (Ecuación 2) está dado por la diferencia entre la profundidad promedio y una profundidad de diseño (H_d). Jiménez (2013), considera una profundidad de diseño " H_d " de 6 m.

Ecuación 2: Expresión para el espesor no saturado del acuífero. Fuente: Jiménez (2013).

$$\Delta h = h_4 - H_d$$

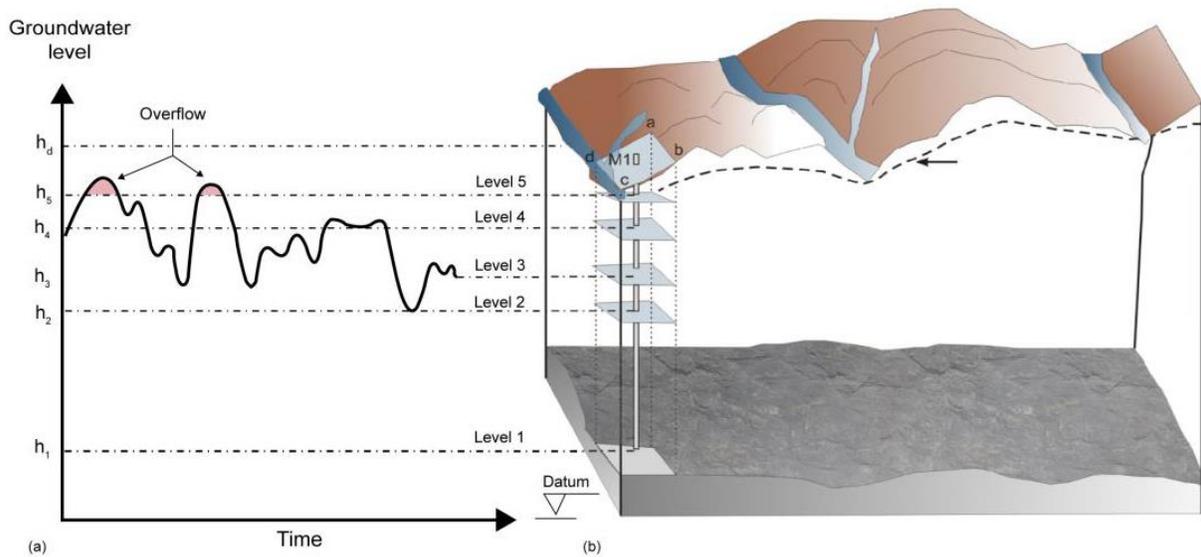


Figura 1: Representación esquemática de niveles de agua subterránea. Fuente: Murray et al. 2009.

Objetivo específico 9: Se establecieron los mecanismos de infiltración más apropiados, a cada subsector, según los requerimientos de aplicación de cada mecanismo, explicados a lo largo de este trabajo.

Objetivo específico 10: Se realizó una evaluación económica, de carácter preliminar, según los tipos de mecanismo seleccionados, anteriormente, para un período común de 5 años. Se determinó, además el VAN (Valor Actual Neto), a una tasa de interés anual de 6%.

2 RECARGA ARTIFICIAL

2.1 Definición

Esta técnica consiste en la introducción de agua en el acuífero de manera no natural, para, entre otras cosas, incrementar la disponibilidad y/o mejorar la calidad de las aguas subterráneas (Custodio y Llamas, 1983). Más recientemente, Bouwer (2002) se refiere a esta técnica de la siguiente manera: “La recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo, desde donde se infiltra y alcanza el acuífero”. Los objetivos de la recarga artificial son, entre otros, reducir la intrusión del agua marina, almacenar el agua, mejorar la calidad del agua a través del tratamiento suelo-acuífero o geo-purificación, y usar los acuíferos como sistemas de transmisión de agua (Bouwer, 2002).

2.2 Aspectos técnicos

Del estudio “Diagnóstico de zonas potenciales de recarga de acuíferos en las regiones de Arica y Parinacota a la región del Maule”, perteneciente a la CNR (2013), se cita lo siguiente: “las condiciones que deben cumplir, aquellos sectores en los que se espera realizar proyectos de recarga exitosos, provienen de las condiciones hidrogeológicas del área de estudio y de la efectiva disponibilidad de agua para efectuar la recarga. Además, dependen del nivel de explotación de las aguas subterráneas de ese acuífero”.

En cuanto al medio físico, un proyecto de recarga artificial será exitoso si se tiene un acuífero libre con un nivel estático profundo, que se encuentre desconectado de los cauces superficiales que pudieran existir en el entorno (CNR, 2013; MINVU, 1996). Además de lo anterior, debe cumplirse que el medio a través del cual se realice la recarga al acuífero tenga una capacidad alta para conducir el agua (permeabilidad), sea que ésta se realice gravitacionalmente o usando inyección del agua a presión (CNR, 2013). Por otra parte, un proyecto de recarga artificial en una cuenca o sector donde el acuífero está siendo sobreexplotado, tendrá un mayor impacto económico positivo que el que se esperaría en un sector subexplotado o en equilibrio hidrológico (CNR, 2013).

En mayor detalle, otros aspectos del medio físico, son descritos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 1996), en el trabajo “Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos”, donde se establece que las variables de interés a considerar para evaluar las aptitudes de un determinado sector como zona de infiltración de aguas lluvias (en este caso de cursos fluviales), son aquellas relacionadas a cubierta vegetal, suelo y agua subterránea. Con respecto a la cubierta vegetal se dice que esta actúa como un filtro, capaz de reducir la colmatación de los poros abiertos y facilitar el crecimiento del humus orgánico. Así, la capacidad de infiltración del suelo es mayor en áreas cubiertas de vegetación (MINVU, 1996). Con respecto al suelo, la cantidad de agua que se puede infiltrar en éste, depende de su porosidad efectiva. Esta última, se define como la cantidad de agua que el suelo puede recibir o liberar por gravedad (MINVU, 1996). En términos sencillos, la porosidad efectiva es la fracción de la porosidad total en la que los poros están interconectados, lo cual le permite al agua desplazarse.

Para el caso de acuíferos libres, esta corresponde al coeficiente de almacenamiento (Sánchez, s.a.). Por ejemplo, en gravas y arenas la porosidad efectiva alcanza valores de 0,3 (existe un 30% en volumen de poros interconectados); en arcillas, en cambio, este valor es del orden de 0,05 (solo un 5% puede ser llenado con agua) (MINVU, 1996). La capacidad de infiltración del suelo depende de la permeabilidad de este. Para estimarla, se requiere conocer el tipo de suelo, espesor vertical por tipo, distribución y variación horizontal por tipo, presencia de niveles arcillosos y lentes impermeables (MINVU, 1996). De acuerdo a las características del agua subterránea, es de suma importancia conocer la distancia entre la superficie del suelo y el nivel freático, ya que de acuerdo a dicha distancia se determina el espacio disponible para almacenamiento. Además, se requiere conocer la dirección del flujo subterráneo y las fluctuaciones del nivel del agua en cada estación del año (MINVU, 1996).

Existen otros factores que pueden hacer exitoso o no un proyecto de recarga artificial, algunos de los cuales resultan relevantes en el caso de nuestro país. Estos están contenidos en la referencia CNR (2013), y de ellos se puede citar lo siguiente: “La presencia de embalses en las cabeceras de los valles, que distribuyen agua en épocas de escasez, a lo largo de ríos o canales, genera una infiltración, la que en la mayoría de los casos, ayuda a mantener alto el nivel estático, limitando la efectividad de un proyecto de recarga. Este tipo de recarga, resulta tanto o más efectiva que la realización de un proyecto de recarga, ya que precisamente la recarga se estaría realizando en el período en que pretende ser utilizada” (CNR, 2013).

2.3 Aspectos legales en Chile

Referente a los derechos de aprovechamiento del agua, en el Artículo 66 del Código de Aguas (Chile, 1981), se establece que cualquier persona puede ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, teniendo, en dicho caso, la preferencia para que se le constituya un derecho de aprovechamiento provisional sobre las aguas subterráneas derivadas de tales obras y mientras estas se mantengan (Artículo 66, inciso segundo).

Con respecto a los aspectos medioambientales, existen dos normativas esenciales a considerar, estas son: el Decreto Supremo N° 46 de 2003 (D.S.N°46) y las Normas Chilenas 1333 Of.78 (NCh1333) y 409/1 Of.2005 (NCh409). La primera, determina las concentraciones máximas permitidas, en residuos líquidos, descargados a las zonas saturadas de los acuíferos, bajo iniciativas de recarga. Además, en dicho documento, se establecen los límites máximos de emisión, en función de la vulnerabilidad de los acuíferos. Sin embargo, en el caso de que la calidad del agua del acuífero exceda los límites máximos, determinados según tipo de vulnerabilidad dada, se establecerán nuevos límites máximos de emisión, correspondientes a dichos valores excedentes. La segunda, establece las concentraciones máximas de contaminantes en el agua según diferentes usos: riego, recreación y estética, vida acuática (NCh1333); y agua potable (NCh409).

2.4 Mecanismos de infiltración

Existen, principalmente, tres mecanismos de infiltración: superficial, en la zona vadosa e infiltración directa al acuífero (Bouwer, 2002) (Figura 2).

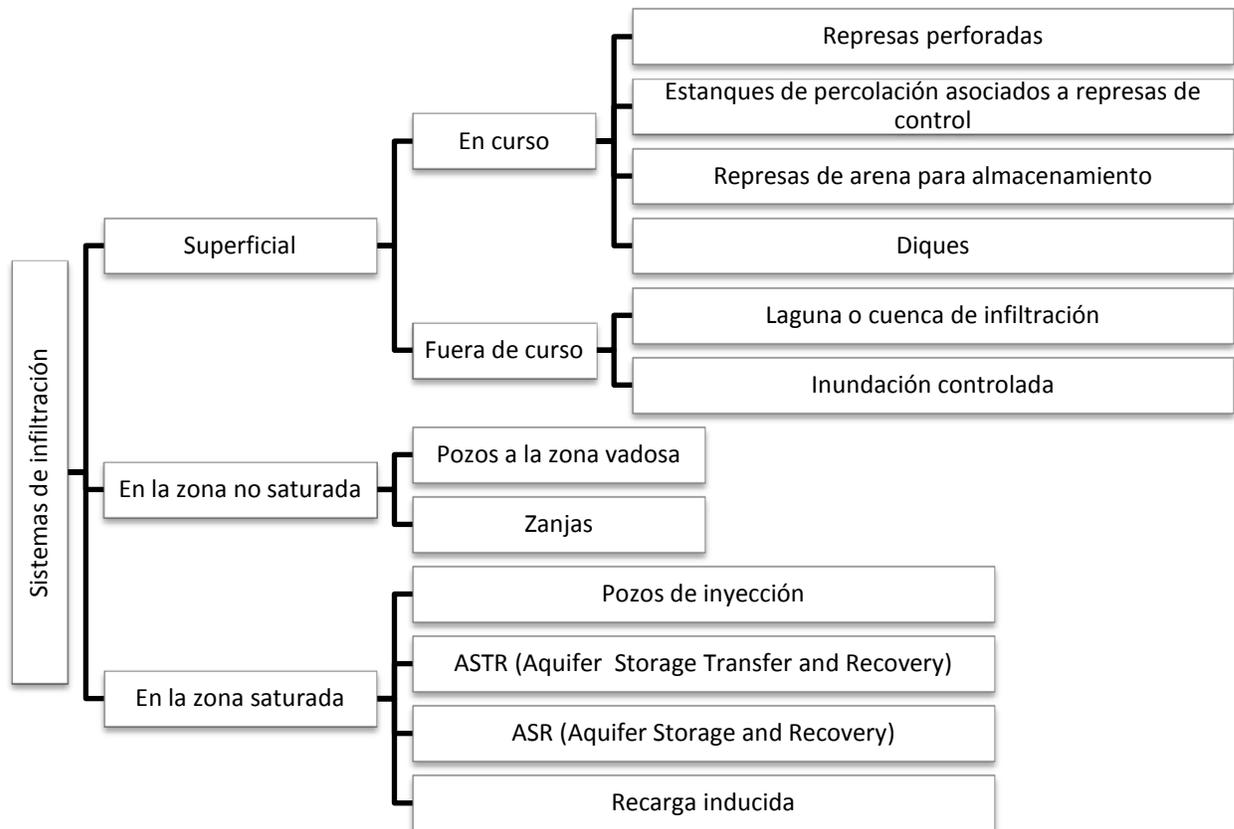


Figura 2: Clasificación de mecanismos de infiltración, de acuerdo al nivel donde es recargada el agua. Fuente: elaboración propia, con base a las metodologías revisadas en la bibliografía.

Las ventajas y desventajas de estos mecanismos se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Ventajas y desventajas de sistemas de infiltración superficial, en la zona no saturada y en la zona saturada, según distintos parámetros. SS: sólidos en suspensión. Fuente: modificado de Jiménez, 2013.

	Superficial		En la zona no saturada	En la zona saturada
	En canal	Fuera de canal		
Necesidad de terreno	media a baja, al generar superficie de inundación	alta, dependiendo de la permeabilidad del terreno	baja a media	baja
Factores estéticos y ambientales	desventaja por generar superficie de inundación, y alterar el régimen natural del río	desventaja debido a su requerimiento de terreno	bajo impacto estético, mejora la calidad del agua	bajo impacto estético, no mejora la calidad del agua
Requerimiento de permeabilidad del acuífero	mediana o alta	en general mediana, depende de la superficie disponible	mediana o alta	mediana o alta
Caudal de recarga	proporcional a la permeabilidad, puede llegar a ser	ventaja, puede llegar a ser muy grande	menor comparado con los sistemas superficiales	menor comparado con los sistemas superficiales

	muy grande			
Pérdidas por evaporación	en general, despreciable respecto a la infiltración	en general, despreciable respecto a la infiltración	despreciable	despreciable
Requisito de calidad del agua	sin contaminantes y acepta bajas cargas de SS	libre de SS y contaminantes, dependiendo de la capacidad de limpieza del suelo	tratamiento secundario o terciario	al menos tratamiento terciario
Colmatación	riesgo medio con opción de limpieza manual o mecánica	riesgo medio con opción de limpieza manual o mecánica	riesgo alto con (zanja) o sin (pozo) opción de limpieza	riesgo alto con opción de limpieza
Grado de depuración del agua	alto, al pasar el agua por la zona no saturada	alto, al pasar el agua por la zona no saturada	pequeño	nulo

La descripción de estos mecanismos de recarga y un mayor detalle respecto a su diseño se puede encontrar en el anexo B.

2.4.1 Infiltración superficial

Los sistemas de infiltración superficial se dividen en: sistemas en curso (*in-channel*) y sistemas fuera de curso (*off-channel*). Los sistemas en curso consisten en presas colocadas a través de las corrientes efímeras y perennes, para respaldar el agua y difundirla, así se incrementa el área de inundación de la planicie, y por lo tanto más agua se infiltra en el suelo. Los sistemas fuera de curso consisten en cuencas de infiltración especialmente construidas, lagunas, tuberías perforadas o alguna otra instalación donde el agua se dispone sobre el terreno para su infiltración dentro del suelo (Bouwer, 2002).

Los sistemas de infiltración superficial, normalmente, requieren suelos superficiales permeables para conseguir altas tasas de infiltración y minimizar los requerimientos de terreno. La zona vadosa debe estar libre de capas de arcilla u otros materiales de textura fina que restrinjan excesivamente el flujo descendente (Bouwer, 2002). Los acuíferos deben ser freáticos y suficientemente transmisivos para acomodar el flujo lateral del agua infiltrada, lejos del área de recarga, sin formar altos montículos de agua subterránea que interfieran con el proceso de infiltración. También, los suelos, las zonas vadosas y los acuíferos deben estar libres de contaminantes indeseables que puedan ser transportados por el agua y trasladados a otros acuíferos u otras áreas (Bouwer, 2002).

2.4.2 Infiltración en la zona no saturada

Donde el suelo, bajo la superficie, no es lo suficientemente permeable, o donde no existe suficiente terreno para sistemas superficiales de infiltración, la recarga de agua subterránea puede, también, ser llevada a cabo con sistemas de infiltración verticales, tales como zanjas o pozos en la zona vadosa (Bouwer, 2002). La principal ventaja de las zanjas o pozos de recarga en la zona vadosa es que son relativamente baratos. La desventaja es que, eventualmente, se

colmatan debido a la acumulación de biomasa y/o partículas suspendidas. Para minimizar la colmatación, el agua debería ser pre-tratada para remover sólidos suspendidos (Bouwer, 2002).

2.4.3 Infiltración en la zona saturada

La recarga directa o los pozos en la zona saturada son usados donde no existe disponibilidad de suelos permeables y/o de suficiente terreno para una superficie de infiltración, donde la zona vadosa no es apta para pozos o zanjas, y donde los acuíferos son profundos y/o confinados. En realidad, los acuíferos confinados pueden aún ser recargados, ya que ellos aceptan y ceden agua por expansión y compresión del acuífero mismo y, particularmente, de capas intercaladas de arcilla y acuitardos que son más comprimibles que las arenas, gravas y materiales consolidados de los acuíferos (Bouwer, 2002).

2.5 Naturaleza y calidad del agua

2.5.1 Naturaleza

A la hora de evaluar un proyecto de recarga artificial, se debe establecer, por un lado, la naturaleza de las aguas que serán infiltradas al acuífero, ya sean, aguas superficiales, de escorrentía de tormentas, residuales, o potable. Además, es necesario conocer la calidad físico-química de la misma. Un resumen de las características de las principales fuentes de agua se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Características de fuentes de abastecimiento para recarga artificial. Fuente: UNESCO (2005), modificado por Jiménez, 2013.

Fuente	Disponibilidad	Calidad
Agua superficial	Variable pero predecible en el caso de ríos. Constante en lagos	Ríos podrían contener carga importante de sólidos suspendidos (SS) o contaminantes. En lagos el agua podría ser recargada directamente
Escorrentía de tormenta	Incierta y espaciada temporalmente	En general sólo requiere remoción de sólidos suspendidos
Agua residual	Constante y predecible	Requiere tratamiento secundario o terciario dependiendo del uso del agua recargada
Agua potable	Constante y predecible	Calidad óptima, no requiere tratamiento

2.5.2 Calidad

Las exigencias de calidad para las aguas utilizadas en un proyecto de recarga artificial son diferentes de acuerdo a su origen. Si se trata de un proyecto que infiltra aguas naturales, la exigencia en la calidad de estas, es que debe ser igual o mejor que la del acuífero. Si se trata de aguas residuales y la vulnerabilidad del acuífero es alta, sólo se podrá infiltrar residuos líquidos cuando estos sean de igual o mejor calidad que el agua del acuífero (Decreto Supremo N° 46; CNR, 2013).

Por otro lado, una apropiada gestión de recarga artificial de agua, necesita contemplar ciertos parámetros químicos que afectan la calidad de la misma. Estos factores, según Alexson (2013) son: pH, contenido de hierro (Fe) y manganeso (Mn), turbidez, temperatura, entre otros.

El pH, ayuda a determinar la calidad del agua. Esta debería ser medida en terreno directamente ya que el pH cambia tan pronto como es tomada de su fuente. La temperatura altera rápidamente el pH, como también lo hace el CO₂ del carbonato de calcio (CaCO₃) presente en el suelo. Este último provoca un bajo pH en el agua debido a que el suelo ya no puede amortiguar la baja de pH, y así el agua se acidifica. El pH bajo, si bien no conlleva un problema en la ingesta de agua, a corto plazo, por el ser humano, este ocasiona problemas producto de la corrosión que podría ocurrir al interior de las tuberías que transportan el agua para la bebida humana. Si las tuberías contienen, por ejemplo, plomo, este podría ser disuelto y liberado al agua potable, causando envenenamiento (Alexson, 2013).

Inconvenientes estéticos, coloración y sabor desagradable son algunos de los problemas que el excesivo contenido de hierro y manganeso, en el agua, pueden ocasionar. Lo anterior, además, revierte un problema técnico, ya que se podría obstruir la infiltración en el suelo (Frycklund, 1992). El hierro y el manganeso precipitan en el agua cuando los niveles de oxígeno son altos. Esto podría llevar a la colmatación del sistema de infiltración y, dependiendo de las profundidades a las que el nivel de oxígeno es alto, la remoción de los agentes colmatantes podría resultar muy costosa (Alexson, 2013).

La turbidez es una medida de la cantidad de partículas que se encuentran en suspensión en el agua. Una baja cantidad de partículas le da al agua un color más claro. La turbidez del agua es un asunto de gran importancia cuando se refiere a recarga artificial de agua, ya que las partículas pequeñas pueden fácilmente colmatar el sistema de infiltración (Cech, 2003).

Dependiendo de la temperatura del agua, esta adquiere diferentes viscosidades. A bajas temperaturas la viscosidad es más alta y el agua se mueve a un ritmo más lento (Frycklund, 1992). Esto se debe tomar en cuenta cuando se calcula el período de tiempo y la cantidad de agua que se necesita infiltrar en un área específica, con el fin de que el agua que se esté sacando del acuífero no exceda a la que se está infiltrando. La mayoría de las características del agua dependen de la temperatura de esta. Por ejemplo, mientras más caliente el agua, menos oxígeno disuelto puede contener y esto, a su vez, cambiará el pH de la misma (Alexson, 2013).

2.6 Experiencias históricas internacionales

La recarga artificial de acuíferos, en nuestro país, es una técnica que muy pocos conocen y aplican, sin embargo, en el resto del mundo existen numerosas experiencias que avalan su efectividad.

El inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo, realizado por Fernández et al. (2005) comparte las siguientes experiencias.

En España, los primeros antecedentes de recarga artificial, datan, al menos, desde la época árabe, como son los careos alpujarreños o el sistema de diques y boqueras levantinos (Díaz-Marta, 1989). Las primeras instalaciones de recarga artificial que se construyeron en la época

moderna (1969) están situadas en Cornellá y en los alrededores de Barcelona: aluvial del río Besós y del río Llobregat (Valdés, 1992; Martín-Alonso, 2003).

En Europa se han ensayado distintos esquemas de recarga artificial desde 1870 en Dusseldorf (Alemania) y desde 1879 en Nigmejen (Holanda). Desde entonces se han practicado diferentes alternativas, caracterizadas por la carencia de un protocolo común europeo, carencia que persiste en la actualidad. Algunas cifras sobre las experiencias de recarga artificial en países de Centroeuropa nos dicen que las aguas de recarga artificial derivadas desde algún río representan un 45% del abastecimiento en Hungría, un 16% en Alemania, un 50% en Eslovaquia, etc. A modo de ejemplo, las ciudades de Dusseldorf y Budapest dependen en un 100% de aguas de recarga artificial y Berlín en un 75%.

En América, según el inventario de instalaciones del Instituto Acacia de Holanda, al menos hay 56 instalaciones operativas de recarga artificial de acuíferos en Estados Unidos (Pyne, 1998). También se han encontrado algunas referencias de actuaciones de recarga artificial en México y Argentina (Tuinhof y Heederik, 2002; Tuinhof et al., 2004).

En África, nuevas experiencia de recarga artificial de acuíferos en Egipto, Kenia y Namibia se han llevado a cabo empleando embalses subsuperficiales, embalses arenosos de recarga, tanques de percolación y gaviones (Tuinhof et al., 2004).

En Asia, las experiencias más extendidas han sido llevadas a cabo en Israel, donde existen dos proyectos que aprovechan aguas de inundaciones para recargar los acuíferos de Shiquima, al norte de la franja de Gaza, y de Nahalei Menashe, cerca de Cesarea (Acreman, 2000).

2.7 Experiencias en Chile

En Chile la experiencia en recarga artificial es limitada. Sólo existen algunos estudios aislados, en áreas muy localizadas. Actualmente, gracias a iniciativas de la CNR, DGA y DOH, además de algunos privados, se está empezando a investigar de manera sistemática el tema, a través de estudios que están en ejecución o prontos a comenzar (CNR, 2013).

El estudio “Diagnóstico de zonas potenciales de recarga de acuíferos en las regiones de Arica y Parinacota a la región del Maule, CNR (2013)”, es el primero que abarca una amplia zona del territorio nacional, con el fin de establecer sectores propicios para realizar en ellos proyectos de recarga. En dicho estudio, se han establecido sectores favorables a la recarga, en cuanto a profundidades de niveles estáticos y permeabilidades.

Existen además, proyectos piloto de recarga artificial, como lo es el caso del proyecto del valle del Aconcagua, a cargo de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) (Ardiles, 2013). Dicho proyecto, el cual está en desarrollo, se propone utilizar aguas del río Aconcagua, contar con 1 decantador de 5.000 m² y 2 balsas de infiltración de 2.500 m² cada una. El proyecto está diseñado para recargar hasta 500 l/s de manera continua, pretende contar con un sistema de medición y monitoreo (Figura 3), y los costos estimados serían de aproximadamente \$ 525.000.000/ha (Ardiles, 2013).

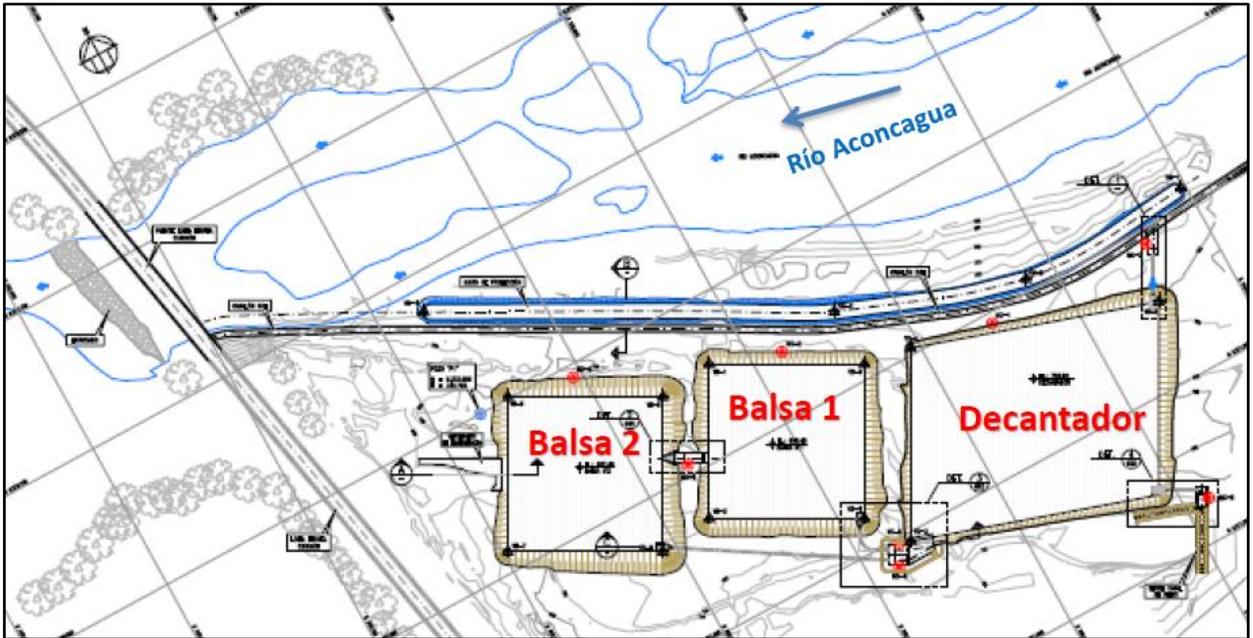


Figura 3: Esquema general del Proyecto “Plan piloto de recarga artificial a los acuíferos del valle del Aconcagua, Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Fuente: tomado de Ardiles, 2013.

3 ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Ubicación

La cuenca del río Maule se encuentra, casi totalmente, en la VII Región del país, entre los paralelos 35°05' y 36°30' de latitud sur y los meridianos 70°25' y 72°30' de longitud oeste, y tiene una extensión aproximada de 20.865 km², siendo la cuarta más grande del país (Figura 4).

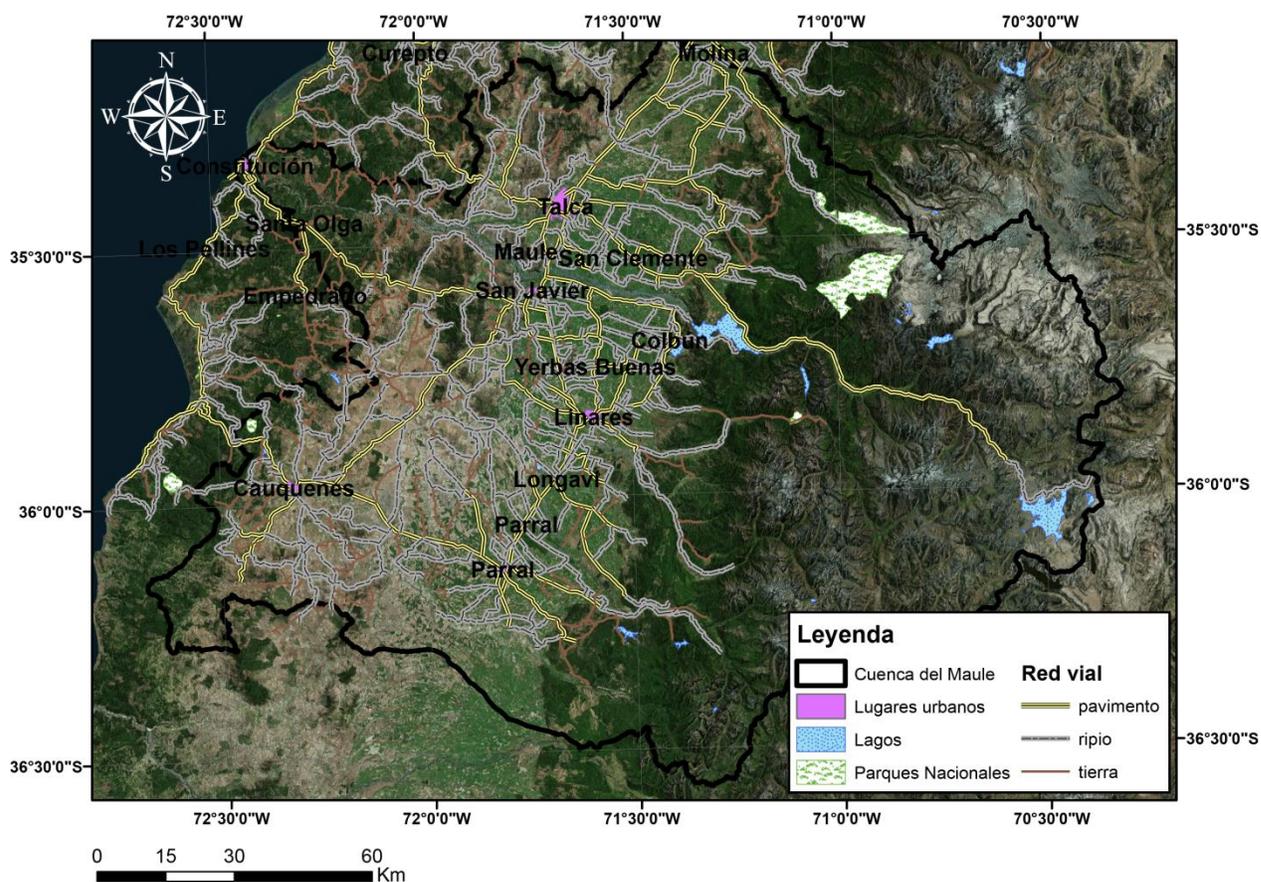


Figura 4: Zona de estudio, cuenca del río Maule, VII Región de Chile. Fuente: elaboración propia a partir de archivos formato *shape* de Albers, 2012.

3.2 Geomorfología y relieve

En esta cuenca se distinguen, de este a oeste, principalmente, cinco unidades, características de toda la zona central: Cordillera de los Andes, Precordillera, Depresión Central, Cordillera de la Costa y Planicies Litorales (DGA, 2004a). La Cordillera de los Andes se caracteriza por ser una extensa llanura de origen volcánico, desarrollada a una altura promedio de 2.500 m.s.n.m. (Figura 5), esta presenta una suave pendiente hacia el oeste y se encuentra

frecuentemente disectada por cursos de agua de valles profundos y abruptos producto de la erosión glacial cuaternaria (DGA, 2004a).

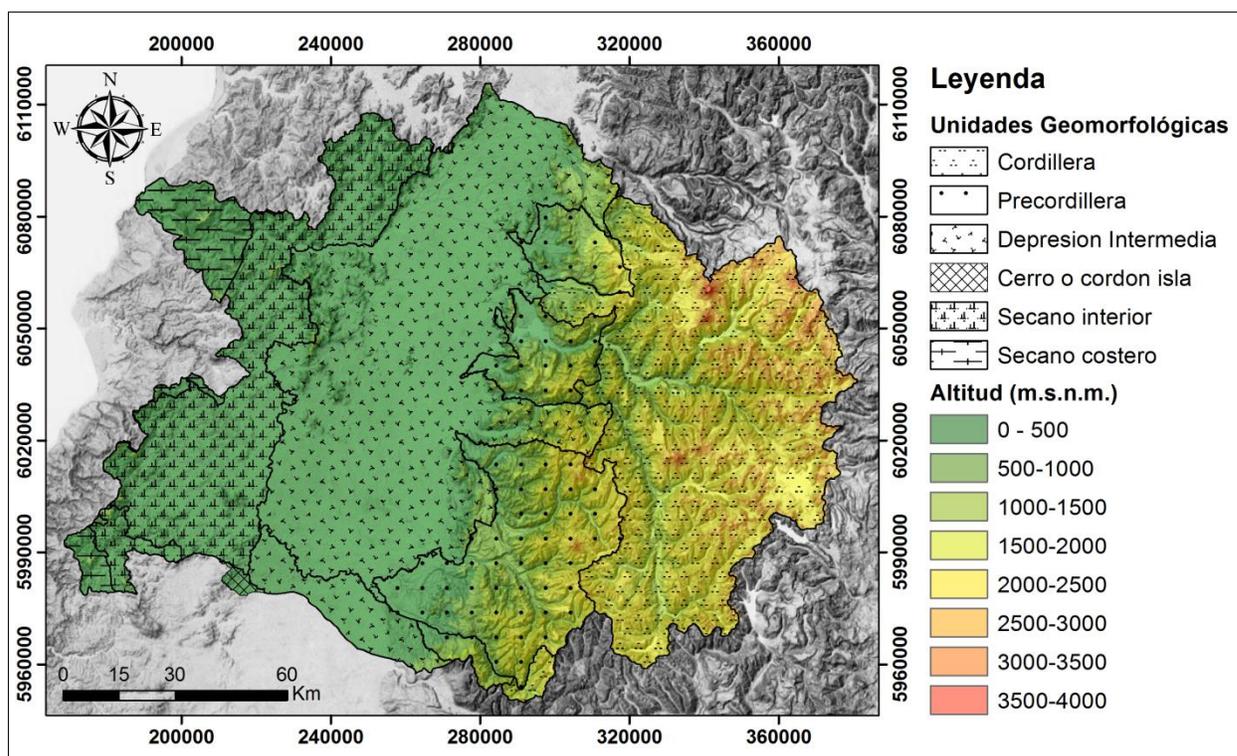


Figura 5: Unidades geomorfológicas y elevaciones (m.s.n.m.) de la cuenca del Maule. Fuente: Elaboración propia mediante imagen DEM y archivos formato *shape* de Albers, 2012. Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19S.

La Precordillera conforma un plano inclinado, con pendiente suave hacia el oeste, a una altura que varía entre los 500 y 1.500 m.s.n.m. Se compone de rocas sedimentarias y volcánicas, de origen continental y edad cretácica superior a terciaria. Producto de la fuerte denudación cuaternaria, este plano se encuentra profundamente disectado por valles de origen glacial, tributarios de aquellos de origen volcánico (DGA, 2004a). La Depresión Intermedia o Llano central corresponde a una cuenca tectónica limitada por sistemas de fallas de rumbo norte – sur, la que ha sido, paulatinamente, rellenada producto de la erosión causada por los glaciares, ríos y el viento. Conforman un plano levemente inclinado hacia el oeste, y se encuentra disectada por valles poco profundos, de origen fluvial, a través de los cuales se han depositado los abundantes sedimentos que han rellenado esta cuenca (DGA, 2004a).

La Cordillera de la Costa posee una altura máxima de aproximadamente 700 m.s.n.m. Esta se presenta como un macizo montañoso, el cual está compuesto, principalmente, por rocas graníticas y metamórficas de edad paleozoica del llamado basamento cristalino, con la excepción del sector nororiental, compuesto por rocas sedimentarias y volcánicas, de edad cretácica. Presenta un relieve suave y ondulado, de lomajes bajos y formas amesetadas, que descienden suavemente hacia la costa producto de la deformación tectónica (DGA, 2004a). Las Planicies Litorales corresponden a extensas zonas relativamente planas, con suave pendiente hacia el oeste, aunque no siempre están presentes; es así como en el sector sur de Constitución, la Cordillera de la Costa no permite el desarrollo de esta unidad morfo-estructural (DGA, 2004a).

3.3 Estructuras

Las fallas pueden modificar la permeabilidad local del relleno sedimentario o imponer barreras al expedito escurrimiento subterráneo, ya que influyen en la configuración hidrogeológica de cuencas sedimentarias tectónicamente activas (Hauser, 1995). Los planos de estratificación y las fracturas conceden espacios favorables para el almacenamiento y escurrimiento del agua subterránea; la disposición de estas estructuras resulta determinante para condicionar la magnitud y trayectoria preferencial de los flujos de agua. Las transmisibilidades más elevadas suelen estar asociadas a la presencia de pliegues anticlinales, a zonas de rocas fuertemente fracturadas o al piso de valles (Davis y De Wiest, 1971).

En la zona pre-andina, las fallas alcanzan un escaso desarrollo, en términos de continuidad, ancho y desplazamiento; estos, normalmente producen solo leves modificaciones en los rasgos morfológicos preexistentes. En la zona comprometida por las obras del Complejo Colbún-Machicura, se detectó la presencia de fallas de rumbo general norte-sur, concordante con los padrones estructurales dominantes en la zona andina de Chile Central (Hauser, 1995).

El Valle Central ha sido interpretado como una estructura del tipo graben, limitado lateralmente por extensas y profundas fallas regionales, que generaron una amplia depresión en la cual se segregaron, en el área, depósitos de acuerdo a diversos procesos de relleno sedimentario; por ello es que las características de estos depósitos varían lateralmente. En la actualidad, estas fallas limitantes del Valle Central son de difícil detección en el área estudiada, ya que están obliteradas por la acción erosiva y la sedimentación cuaternaria. En el margen oriental del Valle Central, se infiere que la actividad termal de Panimávida y Quinamávida se relaciona con una extensa zona de falla regional, cuya traza enmarca la frontera morfo-estructural Valle Central - borde pre-andino. En el borde occidental del Valle Central, no se reconoce una clara expresión morfológica de fallamiento (Hauser, 1995).

El gran espesor de las rocas volcanoclásticas, correlacionables con la Formación Coya-Machalí, que conforman el borde pre-andino de la zona estudiada, tipifica una secuencia de mala estratificación de rumbo preferencial norte, dispuesta sub-horizontal a levemente inclinada al este, sin dislocaciones ni plegamientos relevantes. Hacia el este, la tectónica incorpora, cada vez, estructuras más complejas en frecuencia e intensidad de las deformaciones (Hauser, 1995).

3.4 Hidrografía

El río Maule nace en la Laguna del Maule y, en sus primeros tramos, escurre en dirección noroeste (Figura 6). Cerca de 40 km desde su nacimiento, recibe por el norte al río Cipreses que nace en la laguna Invernada y más abajo, a 30 km del punto anterior, recibe su principal afluente cordillerano, el río Melado, el que le entrega los aportes de toda la zona alta de la parte sur de la cuenca.

Luego de atravesar la Depresión Intermedia y junto a las primeras estribaciones de la Cordillera de la Costa, el Maule recibe como afluentes al río Loncomilla desde el sur, y al río Claro desde el norte. El Loncomilla se forma por la unión de los ríos Longaví y Perquilauquén, siendo este último el que se ubica más al sur en el sistema hidrográfico. A su vez, el Perquilauquén capta las aguas de los contrafuertes de la Cordillera de la Costa a través de los ríos

Cauquenes y Purapel. El río Loncomilla recibe más tarde los aportes de los ríos Achibueno, que a su vez recibe aguas de los ríos Ancoa y Putagán (Hauser, 1995).

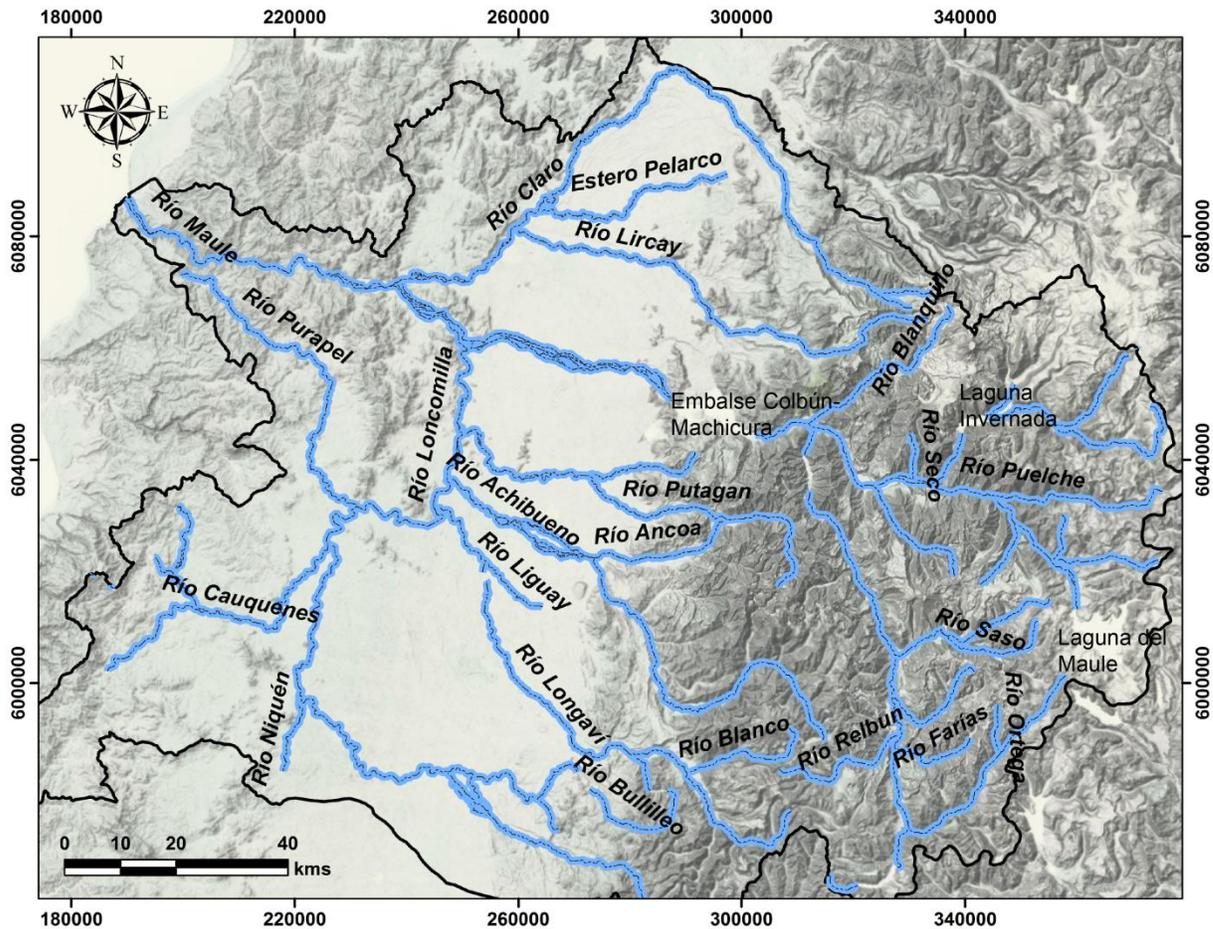


Figura 6 : Red hidrográfica de la cuenca del Maule. Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 19S. Fuente: elaboración propia a partir de archivos formato *shape* de Albers, 2012.

3.5 Antecedentes climáticos

3.5.1 Clima

La cuenca del Maule desarrolla un clima mediterráneo, es decir, da cabida a mínimo dos meses consecutivos de verano con déficit hídrico (DGA, 2004a). El verano es predominantemente seco y con fuerte radiación solar; el invierno es húmedo, lluvioso y frío. La primavera y el otoño son de carácter transicional (Hauser, 1995). La temperatura media anual es de 14,9° C, con una máxima de 22,8° C y una mínima de 8° C. El período seco es de seis meses y la precipitación promedio anual es de 735 mm (DGA, 2004a). El control que ejerce la Cordillera de la Costa sobre el carácter moderador del mar, da lugar a significativas amplitudes en las temperaturas anuales (Hauser, 1995).

3.5.2 Precipitación y evaporación

Las precipitaciones y la evaporación registrada en la cuenca del Maule, se presentan en la Figura 7.

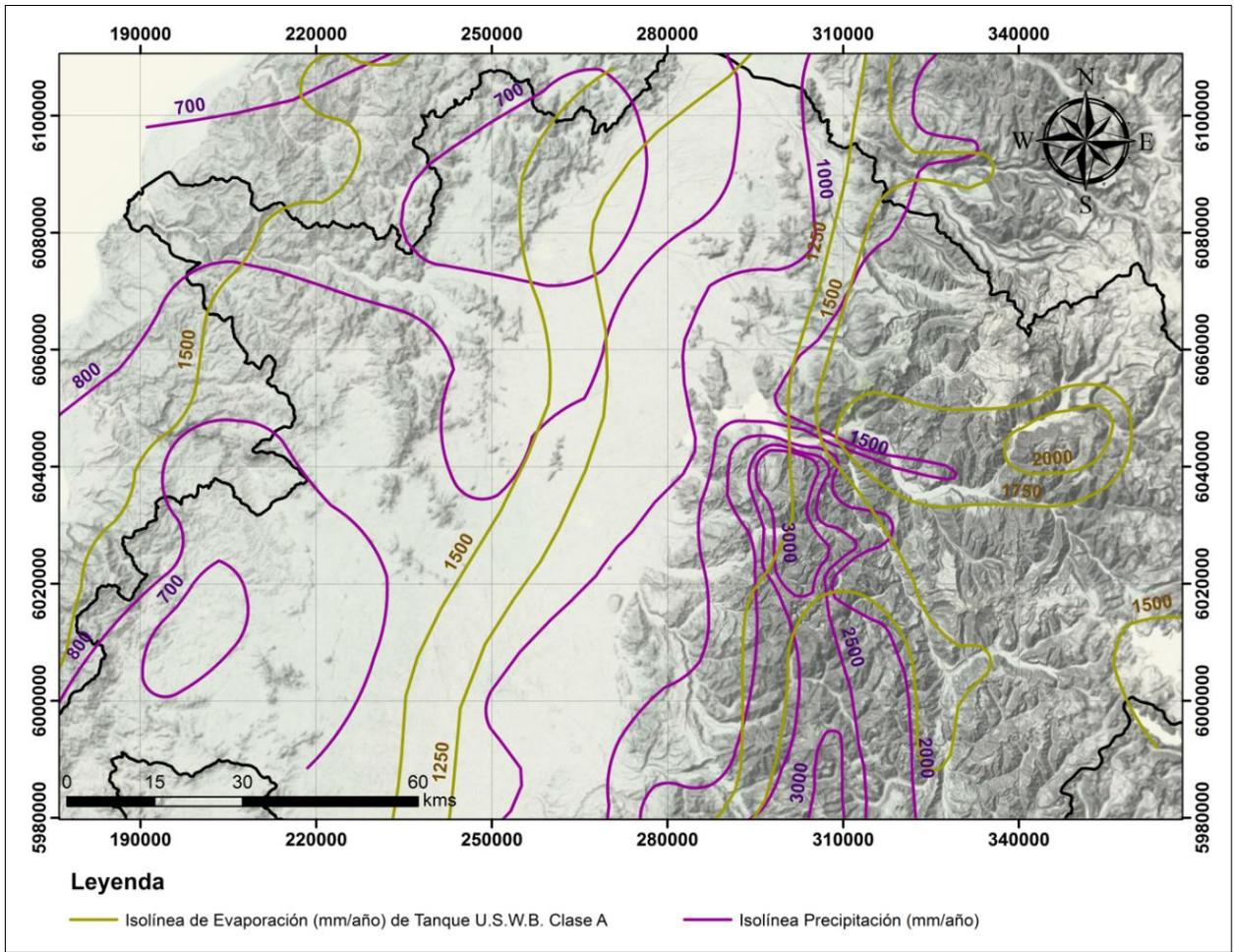


Figura 7: Isolíneas de Precipitación y Evaporación (mm/año) en la cuenca del Maule. Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 19S. Fuente: modificado de DGA, 1988.

4 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

4.1 Marco hidrogeológico

Según la Carta Hidrogeológica, Hoja Talca (Hauser, 1995), las unidades hidrogeológicas, presentes en la Cuenca del Maule (Figura 8), son las siguientes:

4.1.1 Unidades de roca

4.1.1.1 Basamento granítico (Pzg/Pzga)

Granitoides (Pzg), principalmente, tonalitas y granodioritas de gran uniformidad textural y petrográfica. En algunos sectores, se presentan muy meteorizadas, dando lugar al desarrollo de suelos granulares conocidos como “maicillo” (Pzga). Estos suelos son fácilmente afectados por la erosión hídrica, provocando en ellos profundas incisiones o cárcavas. Las rocas de esta unidad, de acuerdo a afinidades petrográficas y continuidad de afloramientos, pueden ser correlacionadas con los “Granitos de Llongocura”, de edad paleozoica superior (Gana y Hervé, 1983).

4.1.1.2 Stocks aplíticos (Tr/Jsa)

Al sur del río Maule y al occidente de Linares, destacan como pequeños cerrillos aislados, con alturas variables de entre 80 y 150 m sobre la llanura aluvial. Constituyen rocas graníticas de tipo aplítico, sin gran alteración. Escobar *et al.* (1977) asignan una edad triásica-jurásica a rocas petrográficamente afines que, al oeste de Melozal y Villaseca, integran un extenso complejo intrusivo.

4.1.1.3 Intrusivos graníticos (Jig)

Cuerpos intrusivos aislados, de escasa distribución, en los que predominan granodioritas y dioritas con escasa alteración y poco fracturamiento. Afloran, principalmente, en torno al cerro El Peñón, inmediatamente al oeste de Talca. Por su similitud petrográfica, esta unidad puede ser correlacionada con el “Granito Montecillos” de probable edad jurásica (Gana y Hervé, 1983).

4.1.1.4 Formación Coya-Machalí (KTcm)

Potente secuencia de volcanitas y sedimentitas continentales que según Drake *et al.* (1982), por continuidad geográfica, litológica y estructural, correspondería a la Formación Coya-Machalí (Klohn, 1960). La unidad consiste en una alternancia de coladas andesíticas a dacíticas, con intercalaciones de capas volcanoclásticas con predominio de brechas y esporádicos niveles sedimentarios de areniscas y lutitas que contienen gran cantidad de hojas fósiles.

4.1.1.5 Formación Lo Valle (KTIv)

Secuencia de rocas volcanoclásticas que integran la mayor parte del desmembrado e irregular relieve interserrano en torno al flanco occidental del Valle Central en la región estudiada, fue asignada a la Formación Lo Valle (Thomas, 1958). En la zona del Maule está constituida por lavas andesíticas y riolíticas e ignimbritas y brechas, con escasas intercalaciones locales de tufitas y areniscas. Nasi y Thiele (1982) asignan a esta formación una edad cretácica superior paleógena.

4.1.1.6 Cuerpos intrusivos sub-volcánicos (Tisv)

En el flanco oriental del Valle Central destaca una serie de pequeños cerrillos que se disponen en una orientación aproximadamente norte sur. Estos tienen morfologías cónicas, de base circular y diámetro medio de entre 500-1.000 m, con alturas de 70-150 m sobre el nivel del llano. Son considerados como “cerros islas”; algunos de ellos son el Huencuecho, Quesería, Los Pavos, Santa Lucía y La Cruz, ubicados entre los ríos Claro y Lircay.

En mayor parte, constituyen rocas andesíticas y basálticas, junto a pórfidos dacíticos. Por sus rasgos morfológicos y carácter litológico, estas estructuras serían, genéticamente, contemporáneas con intrusivos hipabisales (diques y filones manto) identificados al oriente de Colbún y asignados al Mioceno (18 Ma) por Karzulovic *et al.* (1979).

4.1.1.7 Flujos laháricos (TQfl)

Varela y Moreno (1982) la incluyeron en su unidad “Cono volcanoclástico de Lomas Gaticanas”. Estos últimos la definen como “una gruesa secuencia de lavas y brechas volcánicas e ignimbritas de carácter, esencialmente, andesítico”. Genéticamente estos depósitos corresponderían a flujos originados en torno a las laderas occidentales del grupo volcánico Descabezado grande, volcanes Azul (3.810 m) y Quizapu (3.050 m); Drake *et al.* (1982) le asignan una edad plioleistocena (1,3-2,4 Ma).

4.1.2 Unidades de depósitos no consolidados

4.1.2.1 Rodados multicolores (PQrm)

Morfológicamente, estos depósitos integran terrenos del tipo lomajes alargados según un eje este-oeste en las cercanías de los ríos Putagán y Ancoa, hacia el oriente culminan en la cota 350 a 370 m.s.n.m. cubriendo rocas de la formación Coya-Machalí; hacia el occidente, en cambio, en la zona de Lomas de Putagán, tienden a engranar insensiblemente con materiales fluvioaluviales antiguos.

Corresponde a bancos macizos de rodados polimícticos con predominio de clastos andesíticos, bien redondeados, de diámetro promedio de 15 a 16 cm, incluidos en una escasa matriz arenosa que en sectores donde se hace más abundante, adquiere un carácter lenticular. La

particularidad más relevante de estos estratos la constituye la llamativa alteración de color anaranjado que afecta la totalidad de los rodados en condición de humedad suficiente, se tornan blandos, deformables. En cárcavas recientes muy activas como en el Alto del Nabo y Cerro Mesamávida, se reconocen perfiles discontinuos con profundidades de hasta 20 a 25 m, en los cuales la alteración es muy intensa. Esta situación hace que el material presente una extrema sensibilidad a los efectos de erosión hídrica.

Estos depósitos corresponderían a flujos fluviotorrencales originados en la zona andina y movilizados gravitacionalmente hacia el borde pre-andino, a lo largo del curso primitivo de los ríos Putagán y Ancoa los que se habrían ocurrido en el Plio-Pleistoceno (Hauser, 1986).

Esta unidad tiene escasa permeabilidad hasta en sus niveles superficiales; debido a ello, un importante porcentaje de las aguas pluviales experimentan escurrimiento en detrimento de la infiltración, por lo que disminuyen los aportes para recarga subterránea; el escurrimiento provoca severa erosión en estos sedimentos. Vulnerabilidad a la contaminación moderada a baja.

4.1.2.2 Depósitos fluviales de cauces antiguos del río Maule (Qfcam)

Potente secuencia sedimentaria, que en términos morfológicos incluyen principalmente, un llano elongado de dirección noroeste, entre la zona de El Colorado y las inmediaciones de Pelarco. La sección superior del relleno hasta los 85 m de profundidad, consiste, principalmente, en materiales clásticos gruesos (ripios, gravas y gravas arenosas) de probable origen fluvioaluvial, con algunas intercalaciones limo-arcillosas. La secuencia basal, entre los 85 y 237 m de profundidad, está integrada por una alternancia rítmica de limos y arcillas con importante contenido cinerítico, propio de sedimentación en ambientes con circulación restringida, lacustre a fluvioacustre.

Hacia el occidente, en el flanco norte del río Lircay, los 20 m superiores consisten en depósitos finos (arcillas y arenas) con escasas gravas; en los 30 m basales la secuencia grada a depósitos de grano más grueso (ripio fino, arena gruesa, con algo de arcillas). En la expresión meridional de la unidad, en el flanco sur del río Maule, la secuencia contiene, en los 30 m superiores, arenas, gravas con escasos bolones y un 15-30 % de arcilla intersticial; en los 24 m basales dominan bolones, gravas y arenas. Es muy probable que, en profundidad, esta unidad albergue depósitos granulares hidrogeológicamente atractivos, conexos a mecanismos deposicionales propios de paleocanales, ligados a variaciones del cauce antiguo del río Maule. Genéticamente, la unidad sería el resultado de procesos deposicionales ocurridos durante el Pleistoceno inferior.

Se trata de acuíferos semiconfinados vinculados a bancos de gravas y gravas arenosas con frecuentes niveles de bancos de buen desarrollo de ripios con bolones, con abundante arcilla intersticial. En el sector de El Colorado, segmento oriental de esta unidad, la secuencia clástica gruesa se ubica entre la superficie del terreno y los 85 m de profundidad; a profundidades mayores y hasta los 215 m predominan los sedimentos finos (limos a arcillas limosas, con alto contenido cinerítico, y por lo tanto con baja permeabilidad). Los materiales clásticos más gruesos superiores, presentan baja compacidad, son permeables y tienen buenas capacidades para almacenar y transmitir abundante agua, bajo condiciones de recarga adecuada.

La heterogeneidad de la secuencia determina que, con frecuencia, las perforaciones intercepten niveles acuíferos ubicados por encima del nivel local de aguas; estos corresponden a aguas “colgadas” asociadas a estratos lenticulares asilados. Los acuíferos de la unidad proporcionan aguas cuyas propiedades químicas las hacen aptas para distintos usos (potable, riego). Vulnerabilidad a la contaminación baja.

4.1.2.3 Depósitos cineríticos (Qc)

La escasa permeabilidad superficial de esta unidad, provoca el desarrollo de una densa red de drenaje. A nivel regional, constituye una gruesa secuencia en la que predomina una alternancia de capas de cenizas y tobas de lapilli. Estos depósitos se presentan, normalmente, bastante compactos, duros y bien cementados. El carácter heterogéneo de la secuencia, debido a frecuentes cambios laterales de facies, determina un comportamiento hidráulico muy complejo. Pozos adyacentes proporcionan rendimientos contrastantes, lo que impide hacer generalizaciones cuantitativas. La prevalencia de niveles arcillosos, que condicionan frecuentes cambios laterales y verticales de permeabilidad, le proporciona un carácter anisótropo a esta unidad.

Estos depósitos incluyen una gran variedad de tipos texturales, desde limos y arcillas hasta materiales gruesos acumulados durante episodios aluviales; estos últimos alcanzan particular desarrollo en torno al borde pre-andino y hacia el flanco occidental del Valle Central. En la unidad predominan acuíferos del tipo semiconfinados, lo que está condicionado por la presencia de numerosos estratos impermeables limo arcillosos de origen volcánico, lo que se hace más evidente alejándose del flanco norte del río Maule. Las aguas subterráneas que producen los acuíferos de esta unidad son aptas para satisfacer demandas potables, agrícolas y/o industriales. Vulnerabilidad a la contaminación baja.

4.1.2.4 Abanico fluvial Auquil-Astillero (Qafa)

Al oriente de Pelarco, el relleno sedimentario está constituido por una compleja secuencia de materiales en los que predominan los ripios y gravas arenosas con frecuentes bloques y bolones heterocomposicionales. Estos depósitos se superponen y/o intercalan con bancos de areniscas de grano medio a grueso, cuyos clastos son de carácter volcánico (andesitas y/o basaltos); se presentan en estratos macizos que en algunos lugares tienen estratificación cruzada. Las capas arenosas están bien cementadas. Exposiciones puntuales en segmentos de los esteros Auquil y Lo Vargas permiten estimar una potencia de 30 a 40 m para estos sedimentos.

Los materiales detríticos de esta unidad provienen de la intensa erosión de macizos rocosos pre-andinos, de los relieves circundantes a las cabeceras de las hoyas de los esteros Auquil y Lo Vargas (Cordón del Astillero) y de aportes intermitentes de arenas negruzcas, derivadas de actividad volcánica de tipo explosivo en centros andinos (Peteroa-Quizapu-Grupo Descabezados). Morfológicamente, la unidad adopta el modelado de abanico, formado por verdaderos flujos, cuyas partes distales o frentes poseen rasgos lobulares. El avanzado grado de meteorización que presentan los clastos de esta unidad, sugiere una vinculación genética con procesos sedimentarios pre-holocenos.

La mayoría de las norias están excavadas en materiales que conforman una compleja secuencia de depósitos, cuya elevada compacidad y gran cantidad de finos intersticiales no

favorecen el desarrollo de acuíferos de interés. Estos depósitos se caracterizan por su mala selección y permeabilidad generalmente baja. Vulnerabilidad a la contaminación moderada.

4.1.2.5 Abanico del curso medio del río Perquillauquén (Qap)

Hacia el flanco occidental del Valle Central, en la confluencia de los ríos Perquillauquén, Ancoa, Achibueno y Loncomilla, Varela y Moreno (1982) definen con este nombre a una importante secuencia sedimentaria que hacia el sur de la latitud 36°S se extiende hacia el río Ñuble. Morfológicamente, este abanico genera un relieve llano con suave pendiente hacia el norte; localmente, se observa interrumpido por una serie discontinua de pequeños relieves acolinados, de naturaleza granítica.

Los depósitos de esta unidad consisten, principalmente, en cenizas de colores claros y naturaleza ácida con frecuentes intercalaciones de sedimentos finos (limos y arcillas) propios de ambiente lagunar. El conjunto tiene grados de cementación variables desarrollando, al menos superficialmente, delgadas costras impermeables.

En este depósito se han perforado escasos pozos para la extracción de agua; esto limita el exacto conocimiento en términos de extensión y naturaleza litológica de la secuencia. La presencia de intercalaciones arcillosas condiciona el desarrollo de acuíferos semiconfinados, de bajo rendimiento (0,4 y 0,8 l/s/m).

En la unidad, sobre el nivel estático medio, suelen detectarse ciertos cuerpos de “aguas colgadas” de escaso rendimiento, los que derivan de retornos de riego de canales de irrigación o de pequeños caudales superficiales de alcance local. La complejidad litológica de esta unidad hace muy azarosa la extracción permanente de importantes caudales. La ubicación de pozos debe realizarse con el respaldo de acuciosos estudios, centrando las expectativas de producción en niveles modestos 5-10 l/s, para profundidades medias de 50-56 m. Sea como fuere, el notable espesor que alcanza la unidad hacia la parte media del Valle Central, garantiza que los pozos intercepten algún acuífero explotable en profundidades aceptables. La recarga opera con riguroso ajuste estacional: en invierno-otoño, de tipo pluvial; y en primavera-verano asociada a percolación a partir de retornos de riego. El agua extraída de las norias es de buena calidad química para diversos usos. Vulnerabilidad a la contaminación baja.

4.1.2.6 Abanico de Linares (Qal)

Secuencia sedimentaria integrada, principalmente, por ripios gruesos arenosos con intercalaciones de arenas bien clasificadas, y que ocupan una importante franja territorial al noreste de Linares entre los ríos Putagán y Ancoa. El registro stratigráfico de pozos confirma la existencia de una secuencia sedimentaria única, cuyas variaciones laterales y en profundidad, son atribuibles a cambios de facies, propias de acciones deposicionales aluviales, condicionados por cambios en la trayectoria, caudal y tipo de materiales movilizados por los flujos.

La secuencia sedimentaria interceptada en pozos en torno al borde pre-andino, confirma la presencia, hasta los 70 m de profundidad, de materiales clásticos en que predominan gravas y gravas arenosas; hacia el occidente, éstas gradan insensiblemente a sedimentos más finos, arenosos y limosos con frecuentes niveles arcillosos. Morfológicamente, estos depósitos

conforman un extenso abanico cuyo ápice coincide, aproximadamente, con el punto de descarga del río Achibueno al Valle Central. Hacia la parte media del Valle Central la unidad está integrada por una secuencia superior de granulometría más gruesa (ripió grueso con arena y arcilla subordinada) de 30 a 32 m de espesor, que sobreyace a bancos alternantes de arena, limo y arcilla con escasa grava, con una potencia medida cercana a los 40 m. La unidad posee una cubierta de suelo arcilloso negro (1,0 a 1,5 m de potencia), impermeable, que restringe decisivamente la infiltración del agua superficial. Genéticamente, la unidad sería el resultado de procesos deposicionales propios de las primeras fases de relleno del Valle Central en la zona, conexos a aportes precursores de los ríos Maule, Putagán y Ancoa. Varela y Moreno (1982) asignan a estos depósitos una edad pleistocena superior-holocena.

4.1.2.7 Depósitos de abanico fluvial de los ríos Claro-Lontué (Qafcl)

La llanura interfluvial entre los ríos Claro por el norte y Lontué por el sur, está conformada, en mayor parte, por materiales clásticos gruesos, producto de extensos procesos deposicionales fluviales. Litológicamente, comprende sedimentos de origen fluvial en que participan predominantemente rípios, gravas, gravas arenosas y arenas en menor proporción. Estos materiales, resultantes de procesos deposicionales predominantemente holocenos, presentan escasa compactación y por lo tanto tienen una elevada porosidad y son muy permeables. Los tamaños de los clastos experimentan una clara tendencia a disminuir desde el borde pre-andino hacia el occidente, de acuerdo a variaciones en la primitiva capacidad de transporte-deposición de los cauces portadores. Varela y Moreno (1982), asignan a estos depósitos una edad pleistocena superior-holocena.

No alberga acuíferos individuales netamente diferenciados. Se trataría, más bien, de acuíferos continuos únicos, integrados por materiales saturados de distintas permeabilidades. Las mayores trayectorias de transporte determinan que los depósitos incrementen su permeabilidad en la medida que se alejan del borde pre-andino. Los acuíferos son de tipo libre a semiconfinados.

Las fluctuaciones del nivel estático son imperceptibles a lo largo del año. Hacia el borde occidental del Valle Central se amortiguan, debido a que los niveles se sitúan muy próximos a la superficie del terreno. La normal ausencia de niveles finos impermeables en la secuencia, facilita la comunicación directa de los acuíferos con los cursos superficiales mayores (ríos Lontué, Claro, Maule), sin excluir obras de riego (canales), lo que favorece la recarga, vía percolación directa.

La calidad de las aguas es buena; sin embargo, cabe destacar que la alta permeabilidad de los depósitos, incrementa el riesgo de contaminación en acuíferos superficiales. La contaminación por organismos patógenos en aguas de norias excavadas en esta unidad, es muy frecuente; la alta permeabilidad de gravas y rípios favorece la rápida propagación de dichos contaminantes, vía efluentes procedentes de fosas sépticas adyacentes. Vulnerabilidad a la contaminación moderada a baja.

4.1.2.8 Depósitos de abanico fluvial del río Maule (Qafm)

Morfológicamente, estos depósitos constituyen un extenso llano con suave inclinación hacia el oeste. Violentos episodios fluviales del río Maule, asociados a fuertes crecidas, condicionaron el desarrollo de un extenso depósito de sedimentos clásticos fluviales; éstos se

disponen en torno al actual cauce, a partir de ambos flancos del valle del río Maule, con mayor distribución en el sector meridional.

La unidad incluye, principalmente, sedimentos de granulometría gruesa, con claro aspecto de acumulaciones fluviales: ripios de bolones, ripios, gravas y arenas con muy ocasionales intercalaciones lenticulares finas (limo y arcillas). El espesor de esta unidad varía entre 25 y 60 m. Estos depósitos estarían relacionados con un ciclo de rejuvenecimiento del segmento andino del río Maule que condicionó allí una importante erosión; una vez liberados, los clastos resultantes fueron movilizados en forma torrencial hacia el Valle Central configurando un extenso manto con morfología de abanico, que sobrepuso a depósitos fluviales ‘antiguos’.

A profundidades superiores a los 45 a 55 m bajo la superficie del llano, estos depósitos se dispondrían localmente sobre aquellos que integran la unidad Abanico de Linares. La unidad presenta una delgada cubierta (15 a 30 cm) de suelo vegetal limo arcilloso, y se vincularía a deposición fluvial pleistocena del río Maule.

No alberga acuíferos individuales netamente diferenciados. Se trataría, más bien, de acuíferos continuos únicos, integrados por materiales saturados de distintas permeabilidades. Las mayores trayectorias de transporte determinan que los depósitos incrementen su permeabilidad en la medida que se alejan del borde pre-andino. Los acuíferos son de tipo libre a semiconfinados.

Las fluctuaciones del nivel estático son imperceptibles a lo largo del año. Hacia el borde occidental del Valle Central se amortiguan, debido a que los niveles se sitúan muy próximos a la superficie del terreno. La normal ausencia de niveles finos impermeables en la secuencia, facilita la comunicación directa de los acuíferos con los cursos superficiales mayores (ríos Lontué, Claro, Maule), sin excluir obras de riego (canales), lo que favorece la recarga, vía percolación directa.

La calidad de las aguas es buena; sin embargo, cabe destacar que la alta permeabilidad de los depósitos, incrementa el riesgo de contaminación en acuíferos superficiales. La contaminación por organismos patógenos en aguas de norias excavadas en esta unidad, es muy frecuente; la alta permeabilidad de gravas y ripios favorece la rápida propagación de dichos contaminantes, vía efluentes procedentes de fosas sépticas adyacentes. Vulnerabilidad a la contaminación: moderada a baja.

4.1.2.9 Abanico fluvial Ancoa- Achibueno (Qafaa)

Extenso abanico fluvial integrado por materiales clásticos gruesos; abundan conglomerados de bolones, ripios y gravas, con escaso contenido de arenas. Estos depósitos tienen una típica disposición en forma de abanico; el tamaño de sus clastos disminuye gradualmente en la medida del avance hacia el oeste. En superficie, se observan sueltos, muy porosos, con alta permeabilidad.

De acuerdo a lo que es posible visualizar en pozos de empréstito y norias, presentan escasa variación en sus dimensiones vertical y/o lateral; su espesor, inferido por relaciones morfológicas, sería de 20 a 30 m. La carencia de una cubierta de suelo bien desarrollada se traduce en una elevada pedregosidad superficial, limitando el aprovechamiento agrícola.

Estos depósitos se habrían generado debido a fuertes crecidas de los ríos Ancoa y Achibueno, que aumentaron gradualmente su capacidad de erosión y transporte; al colmatar parcialmente el fondo de sus cauces en segmentos pre-andinos, ocasionaron importante sedimentación por sobre los llanos de inundación y terrazas aluviales preexistentes; ellos se apoyan directamente sobre los sedimentos de la unidad Abanico de Linares descrita anteriormente. La escasa cubierta de suelo y vegetación que se observa en ellos permite asignarlos a procesos eminentemente holocénicos.

La alta permeabilidad superficial de los depósitos, junto a la presencia de una densa red de canales no revestidos, cuyas trayectorias en terrenos de la unidad comprometen segmentos con importante caudal, por su proximidad a las bocatomas, determinan altas tasas locales de infiltración. Niveles estáticos someros hacen posible la extracción de agua mediante norias superficiales, cuando se trata de abastecimientos rurales. Esto contribuye a la degradación del agua, vía contaminación por residuos orgánicos. Vulnerabilidad a la contaminación: moderada.

4.1.2.10 Depósitos fluviales (Qf)

Sedimentos clásticos de grano, normalmente, grueso (ripios y gravas, con frecuentes niveles arenosos) marginales al actual cauce de ríos mayores: Mataquito, Claro, Maule, Lontué y Loncomilla; conforman morfologías llanas que, en partes, incorporan rasgos con forma de terrazas resultantes de la incisión del río al producirse cambios locales en el régimen fluvial.

La mayor parte de estos depósitos conforma una secuencia vertical homogénea con una evidente disminución del tamaño de los clastos en la medida del alejamiento del borde pre-andino, unido a un incremento de lentes de sedimentos finos, lo que se debe a pérdidas graduales en la energía de transporte. Los sedimentos constitutivos de esta unidad están sólo débilmente compactados, son de buena selección y de alta porosidad y permeabilidad; ello genera una eficiente interconexión hidráulica con las aguas de los cauces actuales. Genéticamente, los depósitos se vincularían a sedimentación holocénica.

Los acuíferos contenidos en esta unidad son de tipo libre. Están constituidos por arenas y gravas limpias, de buena selección, con escasa matriz fina y clastos resistentes, sub-redondeados a redondeados. Existen intercalaciones arcillosas de escaso espesor y continuidad lateral, las que, al restringir el movimiento subterráneo del agua, crean condiciones lo cales propicias para el desarrollo de acuíferos semiconfinados. La presencia de abundantes intercalaciones lenticulares finas en la secuencia, puede demandar habilitaciones multicapa; los niveles acuíferos de mayor interés corresponden a ripios y grava con arena. El nivel freático se sitúa, generalmente, muy próximo a la superficie, influenciado por la cota del río en el momento. La recarga pluvial se acentúa en acuíferos someros. La conexión río-acuífero provoca que el primero, además de constituir un factor determinante de recarga, actúa a la vez, en sectores, como elemento de descarga. En profundidad, gradualmente, la unidad experimenta un deterioro en sus propiedades hidráulicas: los sedimentos clásticos gruesos tienden a incorporar mayores porcentajes de fracciones finas (limos y arcillas) lo que los hace más compactos y menos permeables.

Los depósitos de gravas no compactas y sin materiales finos intersticiales que conforman predominantemente esta unidad, tienen altas permeabilidades; ello les confiere el carácter de muy buenos acuíferos, capaces de almacenar y transmitir abundante agua, cuando son sometidos a

recarga pluvial eficiente. El nivel del agua en la unidad se rige por el correspondiente a las aguas del río respectivo. Vulnerabilidad a la contaminación: alta a moderada.

4.1.2.11 Depósitos de escombros de falda (Qe)

Granulométricamente, los escombros de falda están integrados por una mezcla muy heterogénea de fragmentos rocosos de diverso tamaño, forma, composición y resistencia, inmersos en escasa matriz de gravilla, arenas y limos; el conjunto es macizo, carente de estratificación; normalmente se observa suelto, por lo tanto bastante permeable; estos depósitos están cubiertos por un delgado manto de suelos limo-arenosos.

La unidad alcanza mayor desarrollo al pie de relieves en los cuales las rocas denotan importante fracturamiento y/o alteración; su acumulación tiene relación con procesos modeladores actuales. De reducida extensión y baja ocupación poblacional. Solo se explota rudimentariamente mediante “tazones” en torno al eje de esteros o quebradas. No se consideran de interés geológico. Las aguas extraídas de esta unidad demuestran, en general, una importante contaminación orgánica, debido a la presencia de animales domésticos.

4.1.2.12 Depósitos fluviales de valles interserranos (Qfi)

Unidad integrada por arenas y gravas arenosas, con esporádicos niveles lenticulares finos (limos y arcillas), cuyos clastos derivan de la erosión de relieves volcanoclásticos (formaciones Lo Valle y Coya-Machalí) y graníticos; su transporte y deposición se produjo por acción de un paulatino “lavado” de laderas ligado a intensa precipitación pluvial: este mecanismo se acentúa en zonas donde el hombre ha actuado para eliminar la escasa cubierta de arbustos; la degradación del terreno se expresa en el desarrollo de profundas y activas cárcavas de erosión.

Los clastos de estos depósitos son sub-angulosos a angulosos, debido a su corta trayectoria de transporte; poseen una mala selección y común presencia de arenas sucias, propias de transporte torrencial; normalmente, estos materiales se presentan muy friables, no consolidados; su granulometría disminuye a partir de la cabeceras de los valles acorde con una paulatina atenuación en la energía de transporte.

El hecho que la unidad presente un escaso desarrollo de suelo, unido a la normal ausencia de alteración de los clastos y matriz y al bajo grado de compactación, sugiere un origen conexo a procesos definitivamente holocenos. Estos depósitos, en los que predominan las fracciones arenosas, experimentan una efectiva recarga pluvial en sus niveles superficiales, desarrollando acuíferos libres cuyos niveles estáticos están influenciados por los niveles momentáneos de agua en los esteros.

Producto de la meteorización, transporte y deposición de rocas graníticas, los depósitos suelen incorporar abundantes elementos micáceos que liberan hierro, el cual además de reducir la permeabilidad en ciertos niveles, incrementa los sólidos en suspensión en el agua siendo necesario decantarla y/o filtrarla para uso doméstico. Vulnerabilidad a la contaminación: alta.

4.1.2.13 Depósitos fluviales en cauces actuales (Qfa)

Consiste de ripios, gravas y gravas arenosas, uniformemente distribuidos a todo lo largo y ancho de la actual llanura de inundación de los ríos mayores; localmente, en las vecindades del borde precordillerano, estos depósitos incorporan abundantes bolones; el conjunto se observa superficialmente suelto. Los clastos mayores se disponen en una escasa matriz de arenas gruesas a gravilla, conformando numerosas islas o bancos dispuestos anárquicamente a todo lo ancho y largo de los cauces, cuyo desarrollo está determinado por fenómenos torrenciales asociados a crecidas de invierno (régimen pluvial) o primavera (régimen nival andino). Sus márgenes poseen una clara expresión cuando el cauce ha logrado cierta profundización, con desarrollo de niveles aterrazados. Genéticamente, la unidad se vincula a procesos de transporte y sedimentación actual.

Constituidos, en su mayoría, por gravas arenosas y frecuentes niveles de arenas limpias, conformando estratos de buena selección, escasa compactación, favoreciendo el desarrollo de acuíferos libres. En ellos, los niveles estáticos tienden, en general, a concordar con el nivel de aguas superficiales de los cauces actuales. El normal y buen carácter físico-químico de las aguas extraídas de la unidad denota, en general, dependencia con respecto a las aguas de escurrimiento superficial. La alta permeabilidad de los depósitos genera una eficiente interconexión hidráulica.

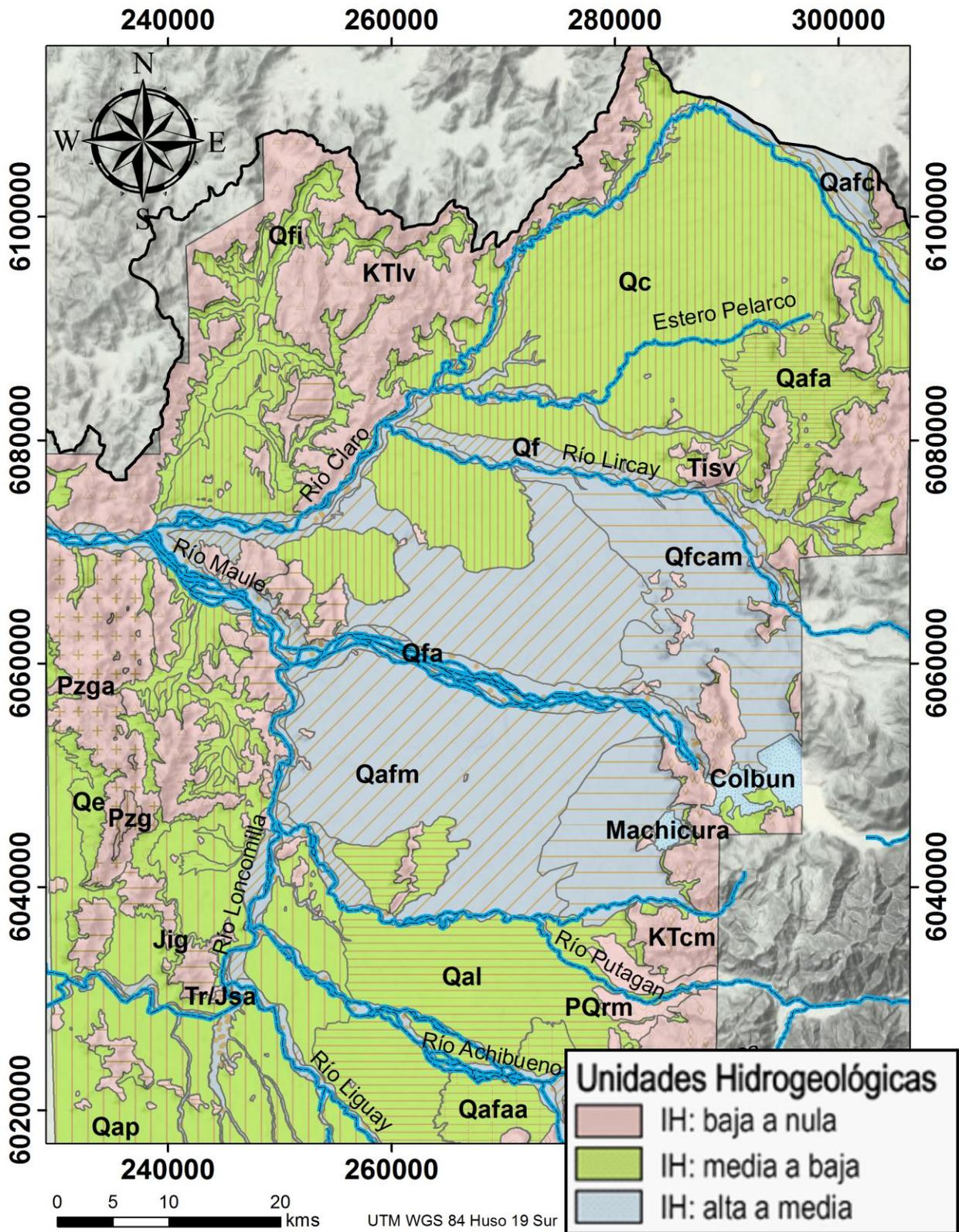


Figura 8: Mapa Hidrogeológico de la cuenca del río Maule. Fuente: modificado de Hauser, 1995.

ERA	PERIODO	EPOCA	Ocurriencia del agua				
			En depósitos porosos; importancia hidrogeológica relativa: alta a media.	En depósitos o rocas fracturadas; importancia hidrogeológica relativa: media a baja.	En rocas porosas, fracturadas o alteradas; importancia hidrogeológica relativa: baja o nula.		
CENOZOICO	CUATERNARIO	ACTUAL		Embalses Colbún y Machicura.			
				Qfa Depósitos fluviales en cauces actuales, principalmente rípios, gravas y arenas sueltas, alta porosidad, buena permeabilidad; clastos con aspecto fresco, resistentes, subredondeados; escasa matriz intersticial; sedimentos con buena capacidad para almacenar y conducir agua.			
				Qe Depósitos de escombrera de ladera de cerro, fragmentos heterogéneos rocosos de diversa forma, tamaño y composición, en escasa matriz limo-arcillosa; clastos angulosos, resistentes, sub-redondeados; conjunto macizo, con importantes variaciones granulométricas en sentido vertical; de permeabilidad media a alta.			
			Qafa Abanico fluvial Ancoa-Achibueno, principalmente rípios, gravas y arenas, con muy escasos finos intersticiales, sueltos; alta porosidad, eficiente permeabilidad, conexos a procesos fluviales, sobre planicies de inundación. Buena capacidad para almacenar y conducir agua.				
			Qfi Depósitos fluviales en valles inter-serranos, bancos de arenas y arenas limosas con abundante desarrollo lenticular; intercalaciones de niveles cineríticos y/o maicillosos; alta a media porosidad; permeabilidad media.				
			Qf Depósitos fluviales, bancos de rípios, gravas y arenas, con abundantes estructuras lenticulares y estratificación diagonal; escasos niveles finos; conjunto con permeabilidad media alta. Gran capacidad para almacenar y conducir agua.				
			Qafcl Depósitos de abanico fluvial de los ríos Claro-Lontué, principalmente bancos de rípios, gravas y gravas arenosas, ocasionales intercalaciones lenticulares limoarcillosas; clastos sub-redondeados, resistentes, heterocomposicionales; permeabilidad media a alta, muy persistente lateralmente. Gradual descenso en el tamaño de las fracciones clásticas en sentido este-oeste. Buena capacidad para almacenar y conducir agua.				
			Qafm Depósitos de abanico fluvial del río Maule, similar a Qafcl				
			Qal Abanico de linares, alternancia de sedimentos granulares: gravas arenosas con abundantes intercalaciones lenticulares limoarcillosas; ocasionales niveles cineríticos; clastos heterocomposicionales, bastante alterados; significativas variaciones granulométricas laterales. Regular capacidad para almacenar y conducir agua. Potencia >170m, en medio del Valle Central.				
			Qap Abanico del curso medio del río Perquiñauquén, dominio de sedimentación fina areno-limosa, abundante cinerita intersticial y/o lentes de escaso desarrollo; localmente, pequeñas intercalaciones de depósitos granulares; gravas arenosas conexas a paleocanales fluviales; significativas variaciones granulométricas; permeabilidad media a baja, con marcada anisotropía.				
	PLEISTOCENO		Qafa Abanico fluvial Auquil-Astillero, alternancia de rípios y gravas arenosas con frecuentes bloques y bolones heterocomposicionales, bastante alterados, junto a bancos de areniscas medias a gruesas, negruzcas que contienen abundantes clastos líticos, de origen volcánico, básico. Elevada compacidad, baja permeabilidad, anisotropía; bancos de areniscas con marcada disposición tabular.				
			Qc Depósitos cineríticos, potente secuencia de bancos alternantes de cenizas y lapilli de carácter ácido, constituido por esquirilas vítreas, cristales de plagioclasa y fragmentos de pómez; conjunto denso, compacto, bien cementado; con permeabilidad media a baja y significativas variaciones laterales; depósitos con disposición tabular. Intercalaciones arcillosas desarrollan confinamiento local.				
			Qfcam Depósitos fluviales de cauces antiguos del río Maule, secuencia de rípios, gravas y gravas arenosas, con frecuentes bolones heterocomposicionales, bastante alterados; ocasionales intercalaciones lenticulares limoarcillosas junto a potentes bancos cineríticos; significativas variaciones laterales en permeabilidad; anisotropía.				
			PQrm Rodados multicolores, potente secuencia de rípios y gravas con ocasionales bolones de naturaleza volcánica, mayoritariamente básicos; alto porcentaje de clastos con importante alteración y desarrollo de estructuras esféricas; depósitos macizos, reducida permeabilidad; baja capacidad para almacenar y conducir agua.				
			TQfi Flujos laháricos, depósitos macizos, formados por una mezcla de fragmentos rocosos heterocomposicionales y heterométricos, con dominio de variedades volcánicas básicas, angulosos a sub-redondeados, resistentes; abundante matriz cinerítica; conjunto muy denso, compacto, reducida permeabilidad.				
			Tisy Cuerpos intrusivos sub-volcánicos, cuerpos de reducido tamaño; integrados por andesitas, basaltos y pórfidos dacíticos; macizos, aspecto fresco, escaso fracturamiento superficial.				
			KTcm Formación Coya-Machalí, rocas volcánicas andesíticas, riolíticas y basálticas, con frecuentes intercalaciones de sedimentitas terrígenas: lutitas, limolitas y areniscas, en bancos bien estratificados.				
		MESOZOICO	CRETACICO		KTlv Formación Lo Valle, sedimentitas terrígenas finas: lutitas y limolitas con niveles volcanoclásticos; brechas y tobas con abundantes intercalaciones de coladas riolíticas y andesíticas.		
					Jig Intrusivos graníticos, cuerpos intrusivos de extensión escasa y forma muy irregular, constituidos por granodioritas, de color gris claro, ferneríticas, en cuyos bordes dominan rocas silicificadas en forma de aureola. Aspecto fresco, escaso fracturamiento superficial.		
				Tr/Jsa Stocks aplíticos, pequeños cuerpos intrusivos constituidos por rocas claras, ácidas, tipo aplitas, textura afanítica, de aspecto fresco, superficialmente inalterados, escaso fracturamiento.			
	Pzg Basamento granítico (Pzg/Pzga): principalmente rocas graníticas de grano grueso y colores claros; tonalitas y granodioritas; severa alteración en torno a zonas basales del flanco de cerros inter-serranos; en partes, con importante desarrollo de suelo residual maicilloso (Pzga).						
	Pzga						

Figura 9: Leyenda del Mapa Hidrogeológico de la cuenca del río Maule. Fuente: modificado de Hauser, 1995.

4.2 Permeabilidad de unidades hidrogeológicas

Espinoza (2005), de acuerdo a características granulométricas, condiciones de deposición y edad de los sedimentos, agrupa las unidades hidrogeológicas anteriores, en 4 grandes unidades, a las cuales les asigna un rango de permeabilidad (Figura 10). Además, de dicho estudio se obtienen 6 perfiles estratigráficos, en la parte media del valle, los cuales establecen el comportamiento, continuidad y distribución de estas unidades en profundidad.

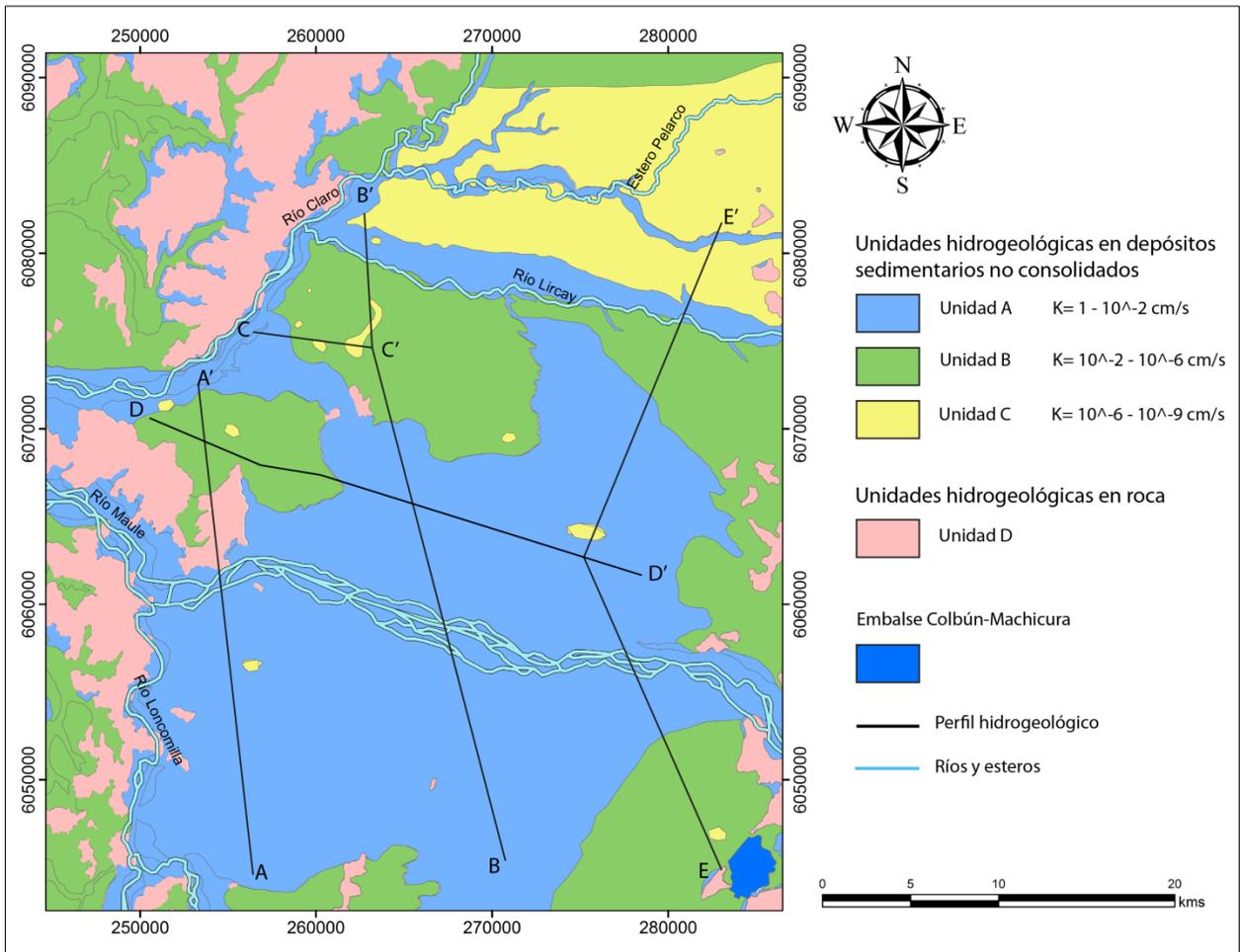


Figura 10: Permeabilidad de unidades hidrogeológicas, según Espinoza, 2005. Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19S. Fuente: modificado de Espinoza, 2005.

A continuación se muestra la descripción general de estas cuatro unidades, según Espinoza (2005).

UNIDAD A: Unidad de alta permeabilidad. Comprende gravas, bolones, arenas y una baja cantidad de finos. Se presenta en depósitos fluviales, tanto de cauces como en terrazas, en depósitos de abanico fluvial actual del río Maule y en depósitos coluviales, todos ellos de edad holocena. En esta unidad se desarrollan, principalmente, acuíferos libres. Presentan variables niveles estáticos (entre 3 y 30 m), los cuales se profundizan a medida que se acercan a la Precordillera. Entregan caudales específicos de entre 1 y 20 l/s/m.

SUBUNIDAD A1: Constituida por bolones, gravas y arenas. Corresponde a la subunidad más importante, ya que presenta una alta permeabilidad, y los mayores espesores en todos los depósitos (Figura 11, Figura 12, Figura 13). Posee una alta conductividad hidráulica de 10^0 a 10^{-2} cm/s. Presenta espesores variables, dependiendo del tipo de depósito en que se emplace. Se puede estimar un espesor mínimo de 70 m. En el abanico fluvial actual del Maule, alcanza hasta 80 m de potencia.

SUBUNIDAD A2: Constituida por arenas, limos, pocas gravas, bolones, y cantidades variables de arcilla. Permeabilidad menor que A1. Posee rangos de conductividad hidráulica menores que A1, del orden de 10^{-2} a 10^{-4} cm/s, debido a la existencia de sedimentos finos.

UNIDAD B: Unidad semipermeable, constituida por ripios, gravas y arenas, con cantidades variables de limo y arcilla, en una combinación clasto o matriz soportada. La permeabilidad depende de la proporción entre sedimentos gruesos y finos, en particular de la cantidad de arcilla presente. Esta unidad se distribuye en los depósitos cineríticos, en los depósitos del abanico antiguo del Maule, en los depósitos fluvioaluviales interserranos, y en los depósitos del abanico de Linares. Presenta valores de conductividad hidráulica variable. El espesor es variable. En los depósitos de abanico fluvial antiguo del Maule, alcanza una potencia mayor a 100 m. En los depósitos cineríticos, alcanzan una potencia máxima de 70 m. En esta unidad se desarrollan acuíferos libres, y se reconocen, localmente, acuíferos cubiertos, semiconfinados y confinados, estos dos últimos se restringen a los sondajes en los que fueron detectados. Los niveles estáticos son variables, someros en los sectores con confinamiento, y entre 8 y 20 m en sectores de acuíferos libres. Entregan caudales específicos de entre 0,5 y 20 l/s/m.

SUBUNIDAD B1: En ella se desarrollan los principales acuíferos. Predominan las fracciones gruesas. Conductividad hidráulica del orden de 10^{-2} y 10^{-4} cm/s.

SUBUNIDAD B2: Corresponde a un estrato de permeabilidad variable que puede actuar como un acuitardo o como un acuífero de menor permeabilidad que B1. Predominan las fracciones finas. Conductividad hidráulica del orden de 10^{-4} y 10^{-6} cm/s.

UNIDAD C: Unidad prácticamente impermeable, conformada, principalmente, por cenizas, arcillas y limos, en menor cantidad, de edad pleistocena a holocena, originados producto de la meteorización de los depósitos cineríticos. Conforman lentes de decenas de centímetros a metros, sin continuidad lateral. Presenta valores de conductividad hidráulica de entre 10^{-6} y 10^{-9} cm/s. se encuentra, principalmente, a nivel superficial, desarrollando acuíferos cubiertos y confinados. Se emplaza, especialmente, en los depósitos cineríticos, como capas superficiales poco potentes (3 m), lateralmente discontinuas. En los depósitos fluviales aparece superficialmente y sin presentar una gran extensión, alcanzando 4 m de potencia. En depósitos de abanico fluvial del Maule, se emplazan superficialmente, con 3 m de potencia y poca extensión areal. En depósitos de abanico de Linares, se infiere que se emplazan como lentes, sin embargo, se desconocen su ubicación y potencia.

UNIDAD D: Corresponde al basamento impermeable, conformado de rocas intrusivas de edad jurásica y de nula permeabilidad, y por rocas volcánicas y sedimentarias de edad cretácica a miocena, de porosidad y permeabilidad primaria muy baja, que no constituyen acuíferos. En el caso de encontrarse fracturadas o altamente meteorizadas, podrían contener acuíferos.

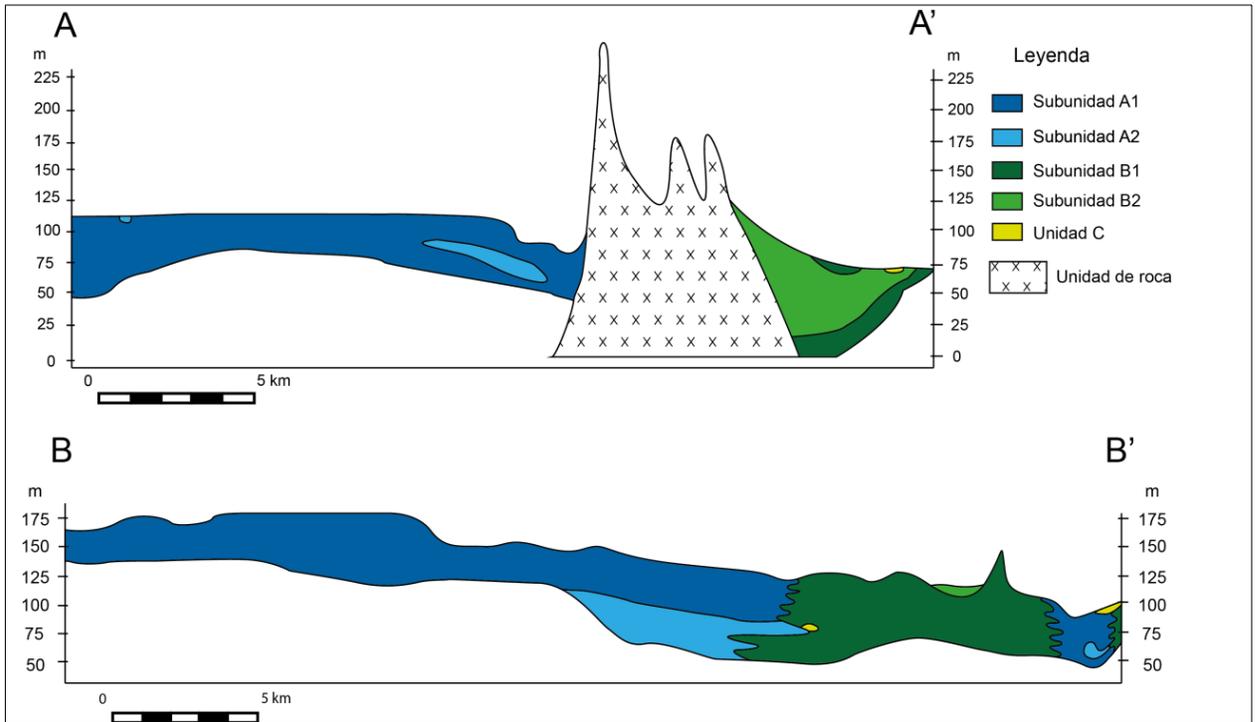


Figura 11: Perfiles hidrogeológicos A-A' y B-B', en cuenca del Maule. Fuente: modificado de Espinoza, 2005.

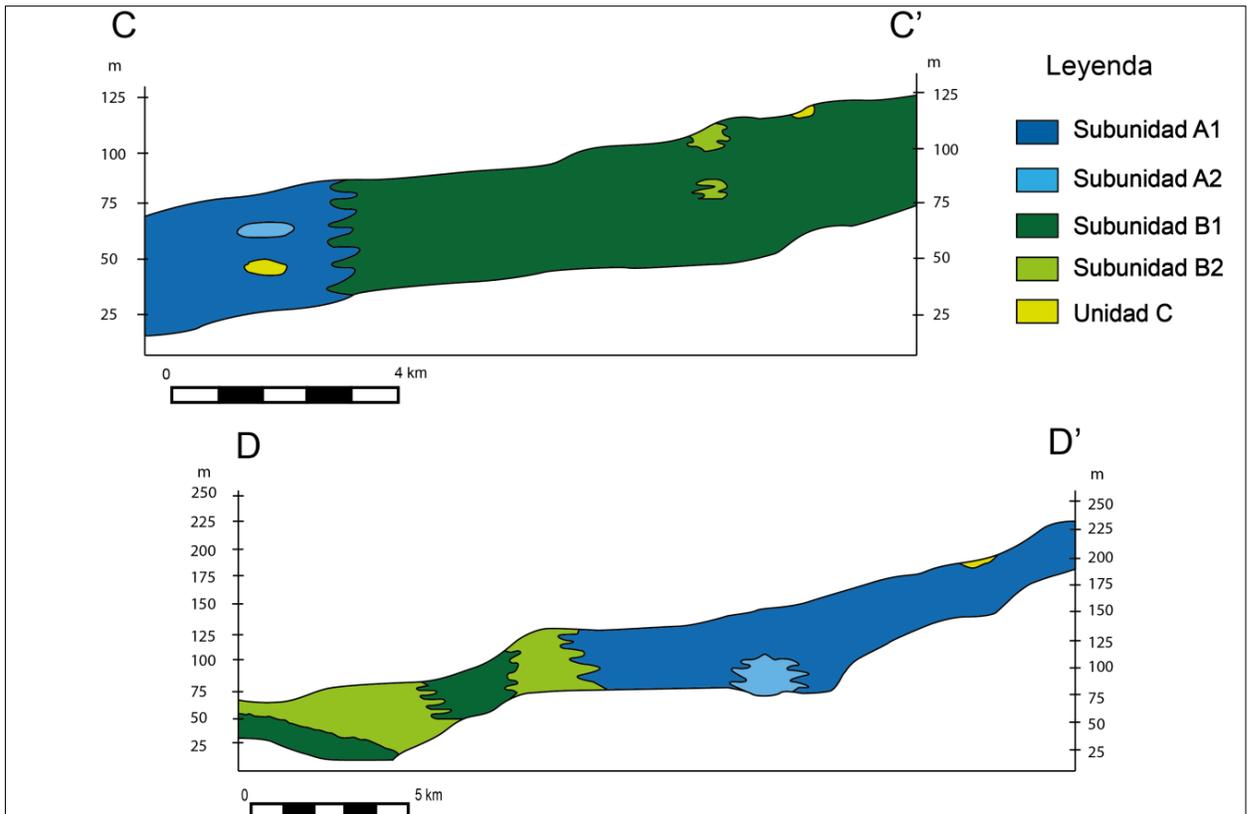


Figura 12: Perfiles hidrogeológicos C-C', D-D', en cuenca del Maule. Fuente: modificado de Espinoza, 2005.

Es de suma importancia, de acuerdo a los objetivos de este estudio, conocer los parámetros elásticos que caracterizan a cada acuífero, tales como transmisibilidad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento.

4.3.1 Transmisibilidad

La transmisibilidad (T) es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario, por unidad de tiempo, y bajo la carga de un metro. Representa la capacidad que tiene un acuífero de ceder agua. La unidad, comúnmente, utilizada es $m^2/día$ (DGA, 2008b).

Se han obtenido 205 datos de transmisibilidad en la cuenca del Maule, provenientes del informe DGA (2010), las cuales se muestran en la Figura 15, estos valores se han calificado en bajos, medios a altos, altos y muy altos, según rangos referenciales del Manual de Normas y Procedimientos de la DGA (2008b).

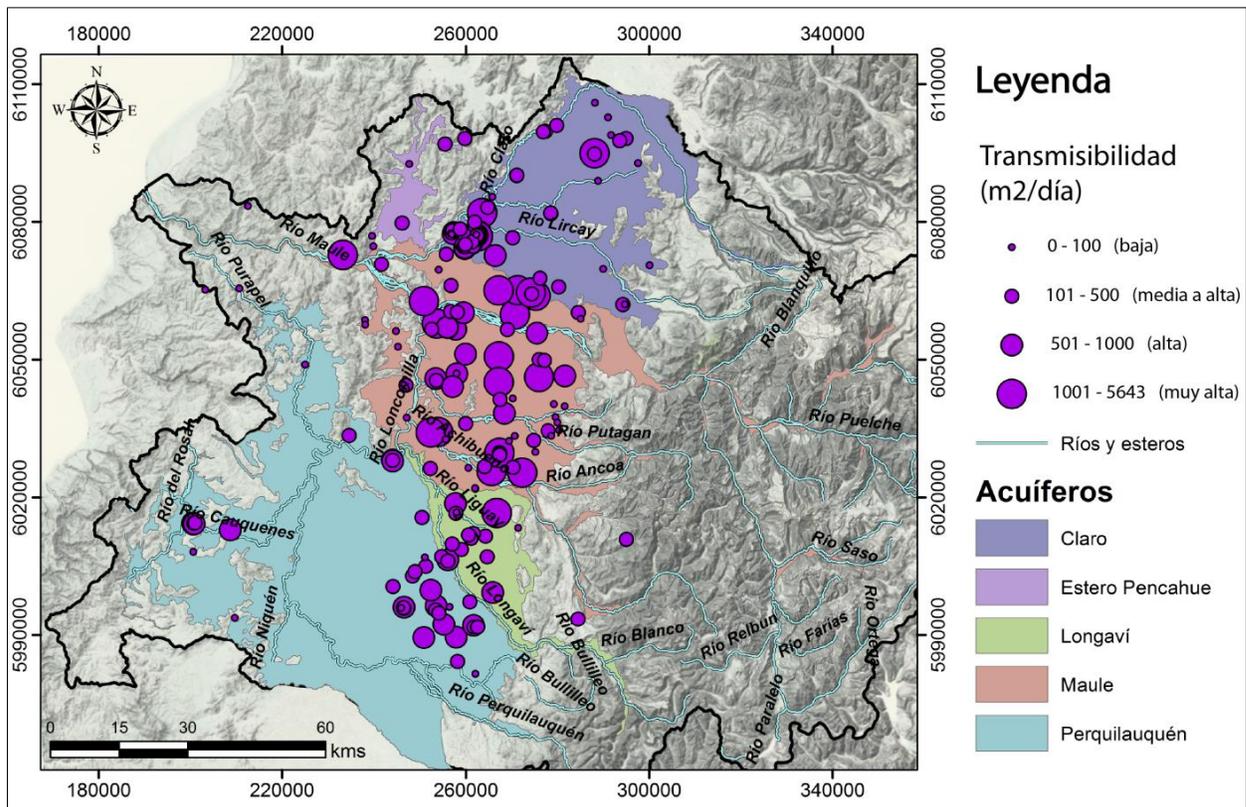


Figura 15: Transmisibilidades ($m^2/día$) de 205 pozos en la cuenca del Maule. La calificación de transmisibilidades bajas, medias y altas se ha realizado en base a los rangos referenciales expuestos en el Manual de Normas y Procedimientos de la DGA (2008b). Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 19S. Fuente: elaboración propia a partir de datos provenientes del informe DGA, 2010.

Agrupando dichos datos puntuales, por cada acuífero, se obtienen los siguientes valores promedio de Transmisibilidad.

Tabla 3: Transmisibilidad promedio (m²/d) de cada acuífero. Fuente: elaboración propia a partir de datos de DGA, 2010.

Acuífero	Claro	Maule	Estero Pencahue	Longaví	Perquillauquén
T (m ² /d)	442,18	569,39	135,33	361,06	342,56

4.3.2 Permeabilidad

La permeabilidad (K) es el cociente entre la transmisibilidad y el espesor del acuífero. Esta es una medida característica de la textura del acuífero, pero no representa, como la transmisibilidad, las posibilidades de ceder agua. Un acuífero muy permeable pero de poco espesor, puede ser poco transmisor, y como consecuencia, los pozos no serán de mucho caudal (DGA, 2008b). Se han obtenido 205 datos de Permeabilidad en la cuenca del Maule, provenientes del informe DGA (2010), los cuales se muestran en la Figura 16.

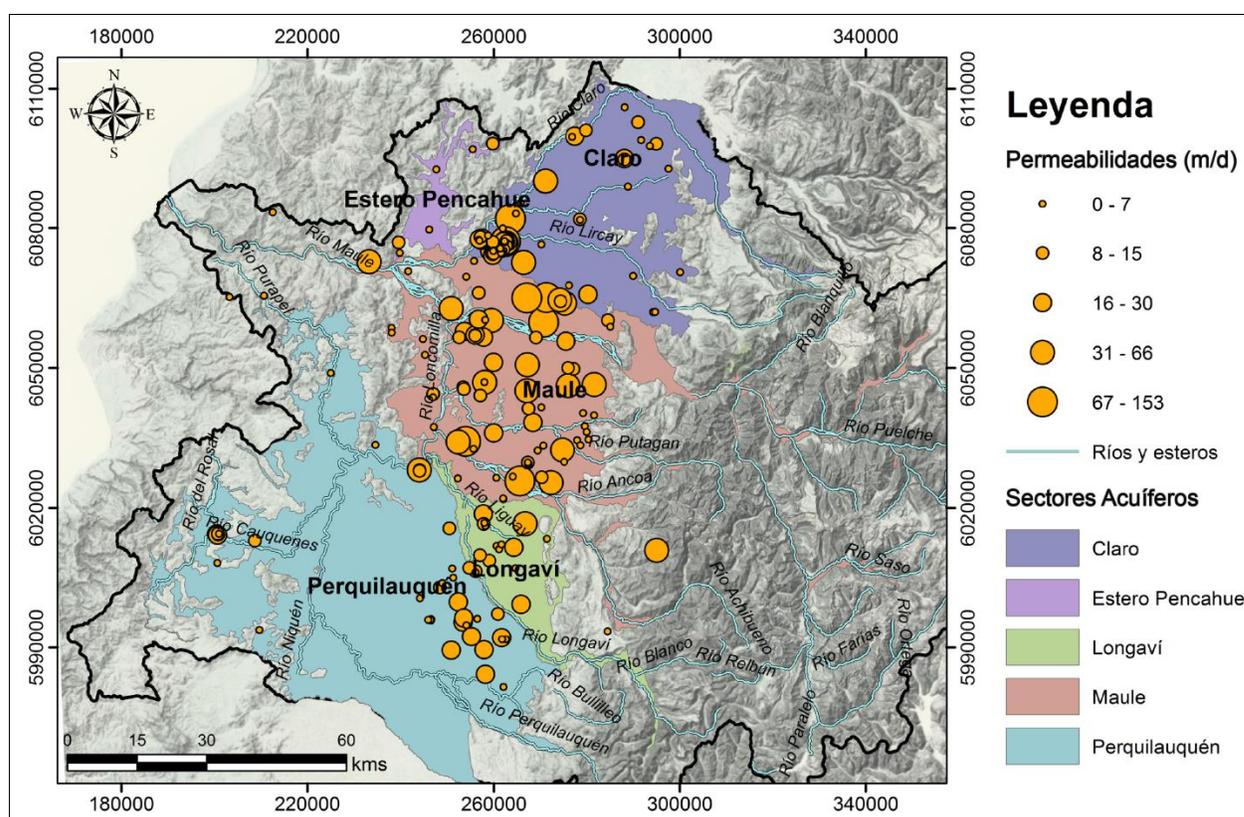


Figura 16: Permeabilidades (m/día) de 205 pozos en la cuenca del Maule. Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 19S. Fuente: elaboración propia a partir de datos provenientes del informe DGA, 2010.

Agrupando dichos datos puntuales, por cada acuífero, se obtienen los siguientes valores promedio de Permeabilidad.

Tabla 4: Permeabilidad promedio (m/d) de cada acuífero. Fuente: elaboración propia a partir de datos de DGA, 2010.

Acuífero	Claro	Maule	Estero Pencahue	Longaví	Perquillauquén
K (m/d)	13,99	21,22	5,91	11,44	9,74

4.3.3 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento (S) representa la cantidad de agua entregada, por unidad de volumen, de un material saturado por unidad de depresión del nivel freático. Valores típicos de este coeficiente para acuíferos libres, van de 0,05 a 0,20. Se estima que, en el caso de que no haya antecedentes, usar un valor del coeficiente de almacenamiento igual a 0,1 es una estimación conservadora. (DGA, 2008b).

4.4 Niveles estáticos

La recarga artificial de acuíferos requiere que la profundidad del nivel estático sea lo suficientemente alta para poder albergar grandes volúmenes de agua en la zona no saturada o de aireación (MINVU, 1996; CNR, 2013). Además, es importante conocer el comportamiento de las fluctuaciones de los niveles estáticos dentro de la cuenca, a lo largo del año.

En general, la profundidad de los niveles estáticos en el valle central, entre los 34° y 38°S, decrece gradualmente de cordillera a mar, coincidiendo con la disminución de pendiente superficial del valle en dicha dirección. Sin embargo, existen irregularidades, aunque muy poco frecuentes, de este patrón de nivel estático dadas puntualmente por ondulaciones del terreno o por intervenciones de niveles anormales, atribuibles a aguas “colgadas.” Además, la fluctuación del nivel estático está controlada por 2 factores, principalmente: explotación y precipitación (Hauser, 1995). Los niveles estáticos más bajos ocurren durante los meses de noviembre a febrero, coincidiendo con el período de escasa precipitación y gran desarrollo de vegetación. Mientras que los niveles más altos tienden a desarrollarse en los meses de mayo a agosto, coincidiendo con el período en que normalmente se registra el 80-85 % de la precipitación anual en la región (Hauser, 1995). En el caso de pozos cercanos al borde pre-andino, de acuíferos profundos (más de 40-50 m), la existencia de interconexiones hidráulicas con acuíferos adyacentes, provoca que los niveles estáticos sean poco fluctuantes o uniformes (Hauser, 1995).

Tabla 5: Fluctuación de los niveles estáticos, indicando valores promedio, mínimo y máximo registrados en 9 estaciones de la DGA para la cuenca del Maule, en las cercanías de la ciudad de Talca, entre los años 1985 y 1989. Fuente: Datos proporcionados por la Dirección General de Aguas.

ESTACIÓN	Código BNA	UTM Este (WGS84)	UTM Norte (WGS84)	Nº datos	N.E. prom. (m)	N.E. mín. (m)	N.E. máx. (m)
PUEBLO SAN RAFAEL	07372004-4	270820	6090002	1	23,50	23,50	23,50
PUEBLO PANGUILEMO	07373005-8	266108	6085532	1	19,50	19,50	19,50
UNIVERSIDAD CATOLICA	07378005-5	262452	6075691	1	16,80	16,80	16,80
A. P. TALCA	07378006-3	262664	6077239	47	16,60	15,20	20,00
A. P. RIO CLARO	07378007-1	257100	6077583	1	6,95	6,95	6,95
CERVECERIAS UNIDAS CCU	07378008-K	257641	6076241	1	8,66	8,66	8,66
A. P. SAN CLEMENTE	07378009-8	274723	6064475	10	14,41	13,02	16,20
A. P. SAN CLEMENTE	07378010-1	274493	6064593	46	14,11	12,27	19,95
PUEBLO COLIN	07379003-4	250581	6071421	1	4,00	4,00	4,00

La Dirección General de Aguas (DGA) posee 9 estaciones con registro de niveles estáticos dentro de toda la cuenca del Maule. Este registro, aunque insuficiente, permite conocer las fluctuaciones de los niveles piezométricos a través del tiempo para un pequeño sector de la cuenca, específicamente en los alrededores de la ciudad de Talca (ver anexo C). Los datos que

muestra la Tabla 5, corresponden al resumen de los registros piezométricos observados, dentro de la cuenca del río Maule, por la Dirección General de Aguas (DGA). Allí, se puede observar que la máxima fluctuación de profundidad de nivel estático es de, aproximadamente, 7 m, en la estación A.P. San Clemente. Con estos antecedentes y con lo establecido en Hauser (1995) se puede asumir que no existen mayores fluctuaciones en los niveles de agua subterránea en la cuenca del Maule. Por otro lado, los registros de niveles estáticos, anteriormente mostrados, representan una muy pequeña porción de la cuenca, lo que resulta insuficiente para llevar a cabo este estudio. Dado lo anterior, se presentan a continuación algunas fuentes adicionales de información, provenientes del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, 1994) y del Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA, 2010).

De CIREN (1994), se obtuvo información de profundidades de niveles estáticos mínimos y máximos dentro de la cuenca, a partir de los cuales se ha construido un mapa de isovariación de profundidad de niveles freáticos (Figura 17).

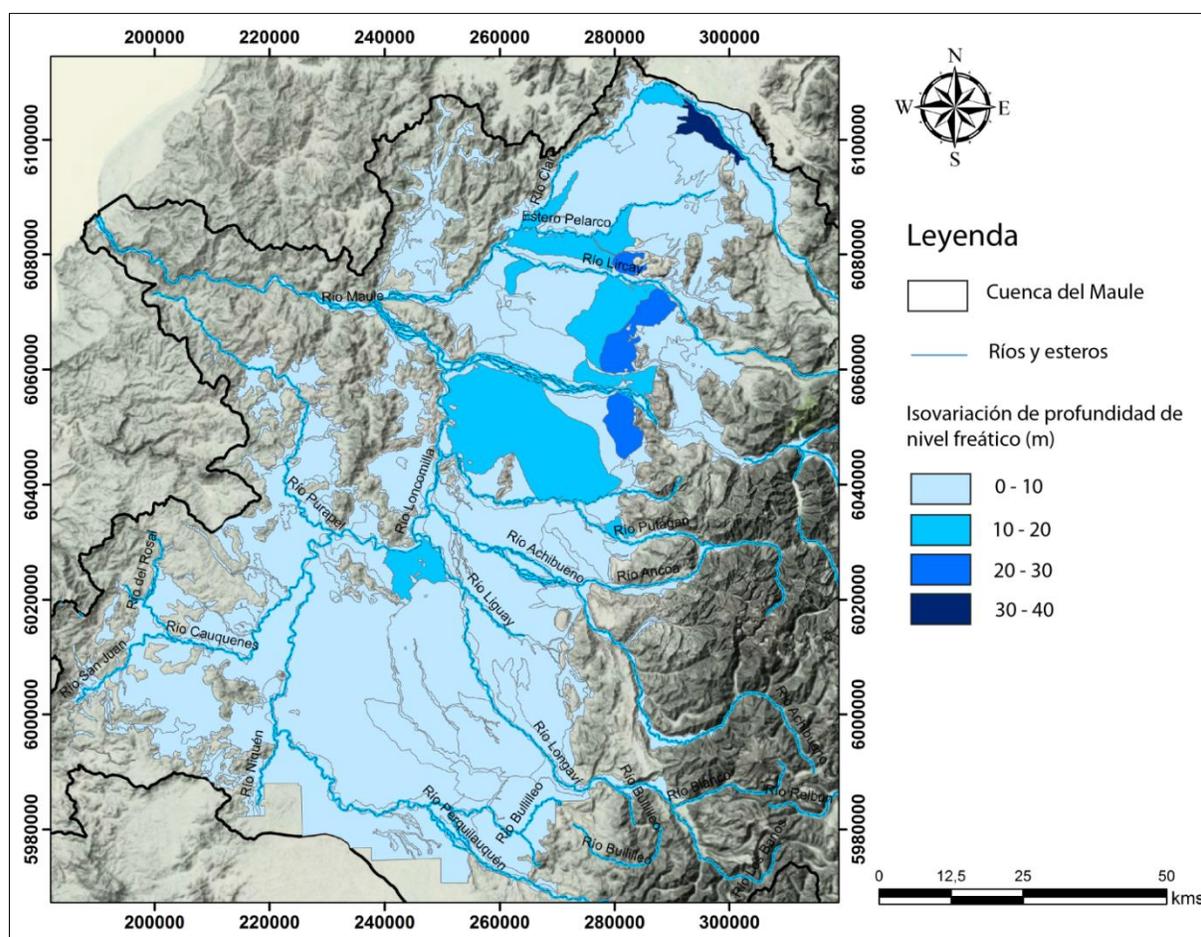


Figura 17: Isovariación de profundidad de niveles estáticos en la cuenca del Maule. Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 19S. Fuente: elaboración propia, a partir de información obtenida de CIREN, 1994.

De DGA (2010) se obtuvo alrededor de 400 datos de nivel estático, con los cuales se ha realizado una interpolación, con el método de *Kriging* Ordinario, mediante el software ARCGIS10.1, para así obtener una estimación de los niveles en toda la cuenca (Figura 18).

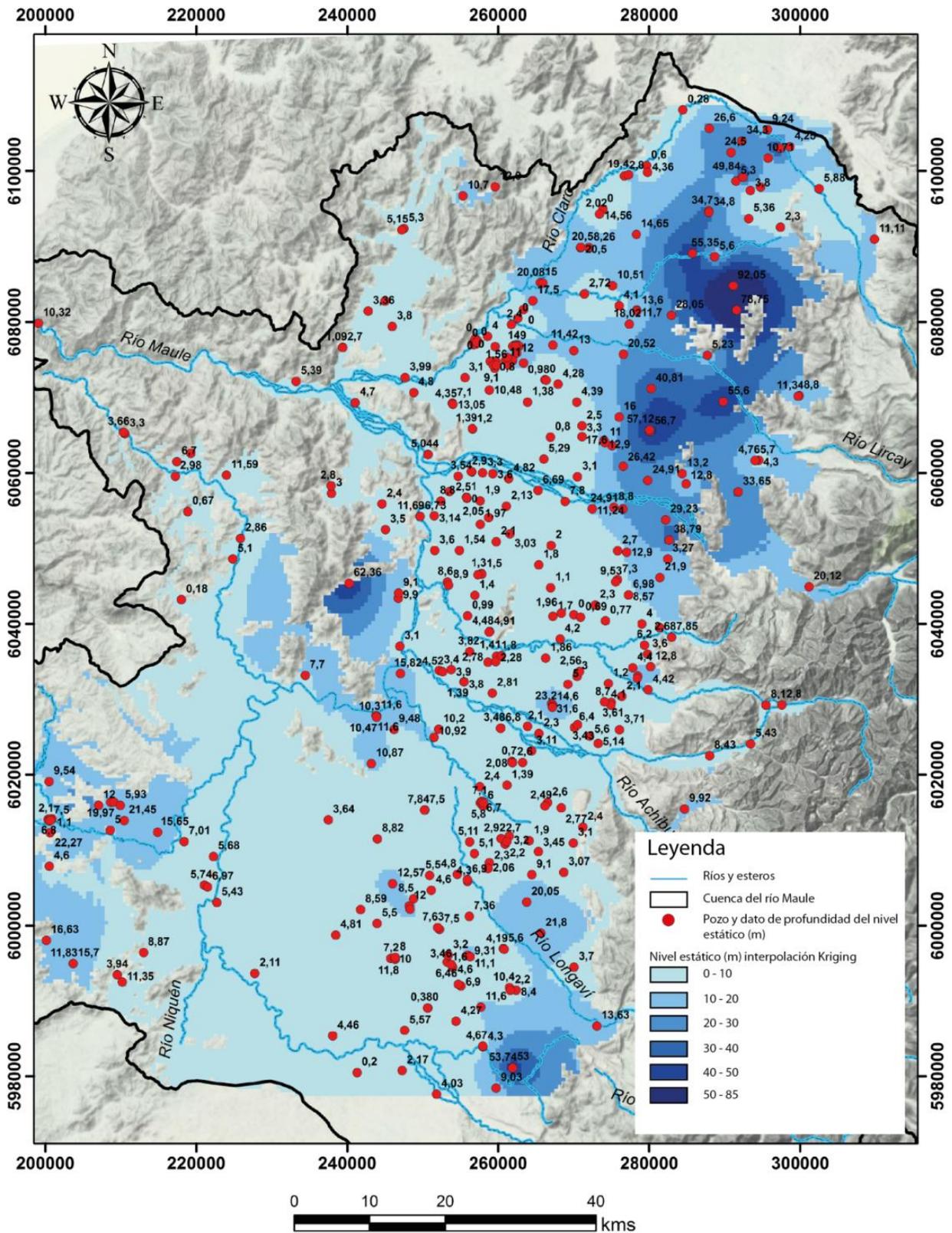


Figura 18: Mapa de interpolación por *kriging* ordinario, de niveles estáticos (m), en la cuenca del Maule. La simbología de puntos se refiere a aquellos datos medidos en la cuenca, provistos por la DGA (2010), y a partir de los cuales se realizó la interpolación. Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19S. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la referencia DGA, 2010.

4.5 Dirección del flujo subterráneo

Hauser (1995), establece que el particular carácter morfoestructural de la región estudiada, en la que se distinguen serranías intermedias, valle central y borde pre-andino, determina el sentido y la magnitud del flujo de aguas subterráneas. La trayectoria dominante es de este a oeste y coincide con el padrón regional de escurrimiento superficial. Además, la representación del movimiento del agua subterránea, se expresa por las líneas de flujo, las cuales son normales a las líneas equipotenciales o isopiezas. Estas líneas se obtienen a partir de los niveles estáticos, medidos con respecto al nivel del mar (Figura 19).

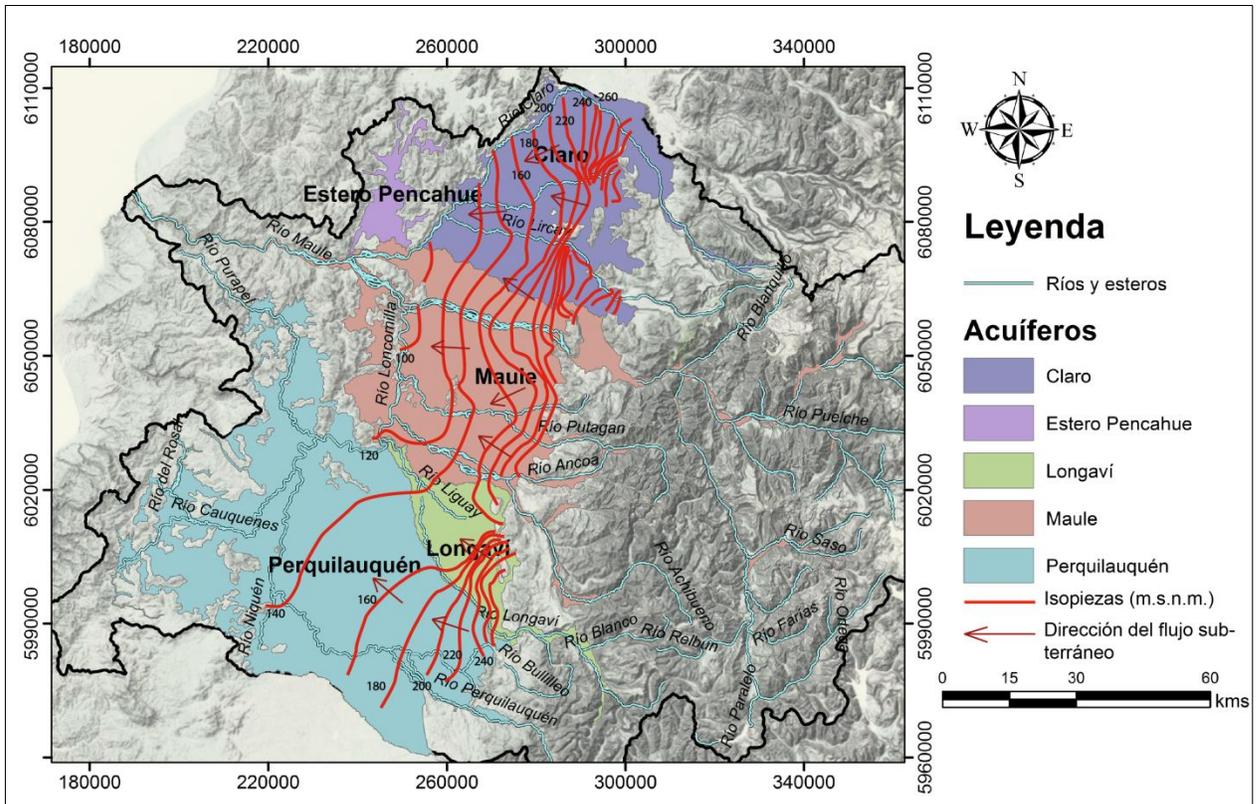


Figura 19: Líneas Equipotenciales en la cuenca del Maule. Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19S. Fuente: modificado de DGA, 2011.

4.6 Vulnerabilidad de acuíferos

La vulnerabilidad de un acuífero, se define como el nivel de penetración con que un contaminante alcanza una posición específica en un sistema acuífero, después de su introducción en alguna posición sobre la zona no saturada. Por otra parte, el riesgo de contaminación está determinado, básicamente, por las características del acuífero, las que son permanentes a escalas razonables de tiempo, y por la existencia de actividades potencialmente contaminantes, las que son, esencialmente, dinámicas (DGA, 2004b). Existen, por su parte, diversos métodos para la determinación de la vulnerabilidad de un acuífero. Espinoza (2005) establece la vulnerabilidad de acuíferos de la cuenca del Maule, mediante el método GOD, cuyos resultados se muestran en la Figura 20.

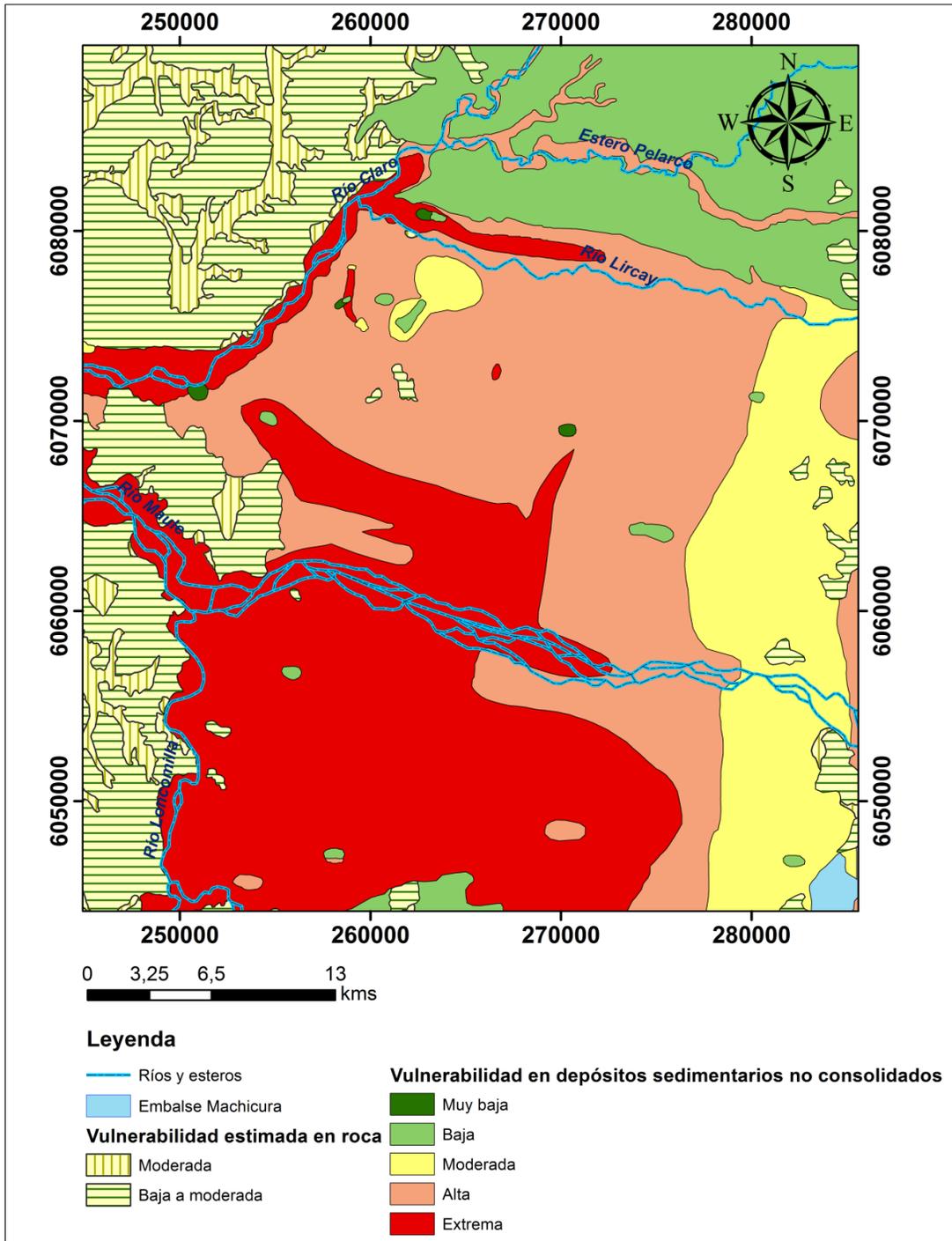


Figura 20: Mapa vulnerabilidad de acuíferos según método GOD, cuenca del río Maule. Proyección UTM, Datum WGS84, Zona 19S. Fuente: modificado de Espinoza, 2005.

De la figura anterior, se puede observar que, en general, la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, está directamente relacionada con la permeabilidad de la formación hidrogeológica, es decir, que aquellas vulnerabilidades más altas se asocian a las unidades más permeables, y por el contrario, las vulnerabilidades más bajas se asocian a las unidades más impermeables.

4.7 Calidad del agua de la cuenca

4.7.1 Superficial

En el informe de la referencia DGA (1997), se establece la calidad general de las aguas superficiales de la cuenca del Maule. Esta presenta muy poca variabilidad entre los puntos de muestreo, por lo que, en general, se puede concluir lo siguiente:

- El pH, es prácticamente neutro, varía de 6 a 8,5, y en promedio es de unos 7 a 7,5.
- El grado de mineralización en estas aguas es bastante bajo, lo que se comprueba al observar los valores de conductividad eléctrica que van desde 20 a 300 umhos/cm.
- De los macro elementos, se observa un predominio de los iones bicarbonato, con valores promedio entre 30 y 80 mg/l. Las concentraciones de cloruros y sulfatos son similares entre sí, con valores promedio para ambos de entre 2 y 15 mg/l.
- Con respecto a los cationes, el calcio presenta valores medios de entre 5 y 20 mg/l. El sodio, presenta valores medios de entre 2 y 11 mg/l. La concentración promedio del magnesio es del orden de 3.5 mg/l.
- De los micro elementos, el arsénico se encuentra inexistente o en concentraciones muy bajas, siempre bajo los 0,03 mg/l.
- El boro y el fierro, en algunas estaciones, presentan, eventualmente, valores por encima del límite permisible por la norma NCh1333. Lo anterior, en todo caso, no provoca problemas en el uso del agua.
- Los nitratos presentan valores bajo, en promedio, no superiores a los 0,5 mg/l.

En general, se puede afirmar que la calidad química de las aguas superficiales de la cuenca, estaría dentro de los valores permisibles por la norma NCh1333, la cual indica los requisitos mínimos que debe cumplir el agua para el riego. Cabe destacar, además, que la concentración de los principales elementos analizados presenta un comportamiento, relativamente, estable a lo largo del tiempo.

La calidad bacteriológica, de las aguas de la cuenca, está muy asociada a la contaminación antropogénica, y en particular, a la cercanía a las grandes ciudades de la región, por lo que la calidad varía de un sector a otro. La contaminación secundaria de estas (en los canales, aguas abajo de las bocatomas) es importante en la región. En efecto, de un total de 132 muestras en canales de regadío durante 1993, el 81 % resultó exceder el límite de 1000 coliformes fecales/100ml, y solo el 19 % estaba bajo la norma. Muchos de estos canales tienen su bocatoma en cursos naturales no contaminados, sin embargo existe contaminación secundaria, la cual se debe, principalmente, a dos causas: por un lado existen criaderos de animales y/o abrevaderos, junto a los canales, en donde se produce la contaminación del mismo, producto de la evacuación de excretas de animales. Por otro lado, es común que casas que se ubican junto a los canales, evacuen a estos los efluentes de sus letrinas, causando gran contaminación.

4.7.2 Subterránea

Hauser (1995) presenta análisis químicos en aguas subterráneas, provenientes de pozos y norias distribuidas en la cuenca del Maule (Figura 21). De dichos análisis, y mediante un diagrama de Piper, se observa que la mayoría de las aguas son del tipo bicarbonatado-cálcicas (Figura 22).

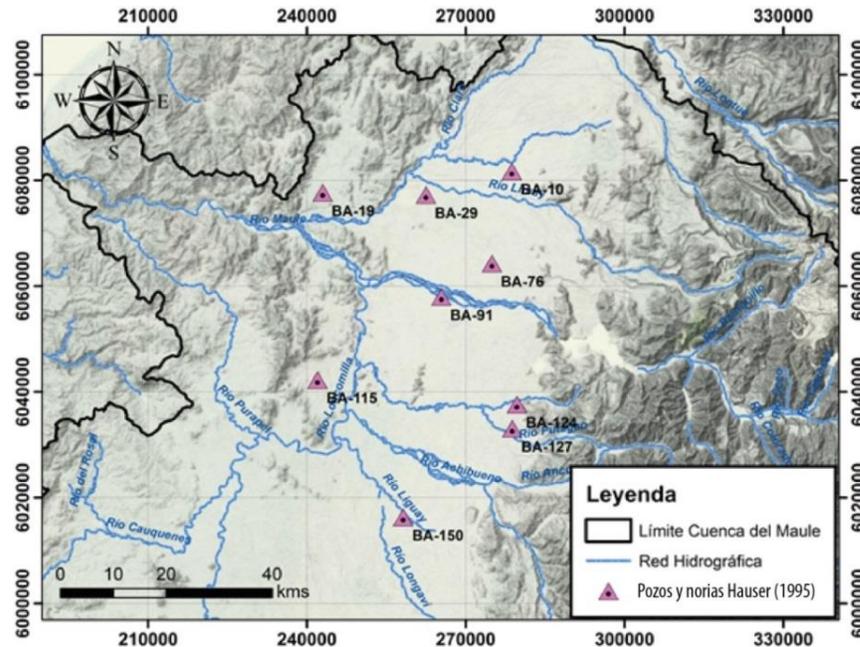


Figura 21: Ubicación de muestras de agua subterránea. Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 19S. Fuente: Hauser (1995).

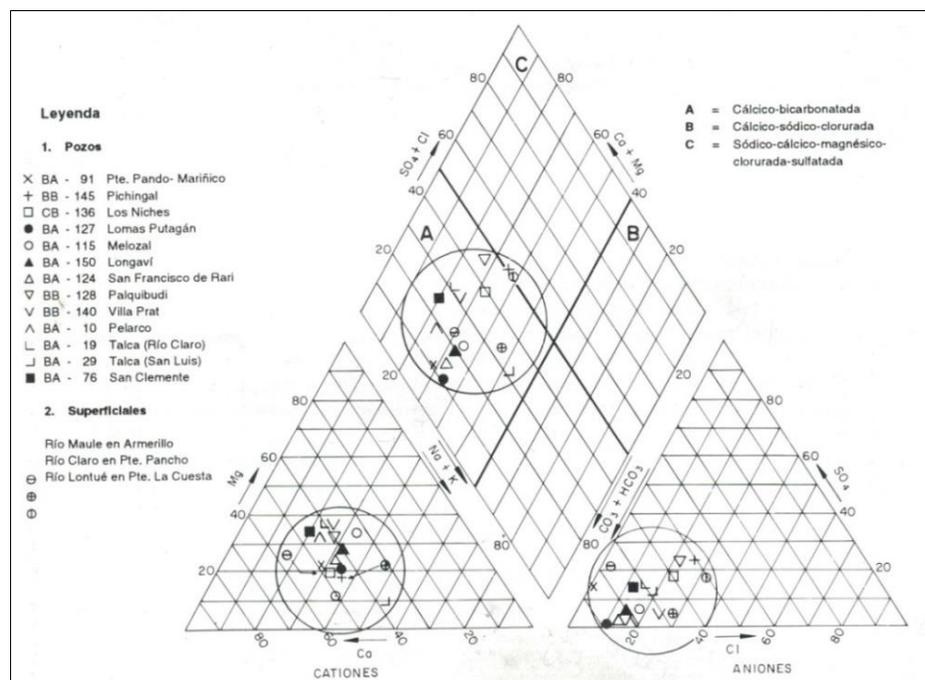


Figura 22: Diagrama de Piper de 13 muestras de aguas subterráneas. Fuente: tomado de Hauser, 1995.

5 RESULTADOS

5.1 Determinación de sectores

Los sectores favorables se deben determinar, por un lado, asegurando que el nivel estático sea lo suficientemente profundo. Lo anterior, es indispensable para proporcionar un considerable volumen de almacenamiento y, además, para que el nivel de aguas subterráneas no interfiera con los procesos y/o mecanismos de recarga (MINVU, 1996; CNR, 2013). Por otro lado, es necesario considerar aquellos sectores que posean una permeabilidad tal que permita, posteriormente, extraer dichos recursos cuando sean requeridos (CNR, 2013; Bouwer, 2002). Adicionalmente, se requiere de una alta permeabilidad horizontal, que permita el flujo lateral, evitando así una excesiva sobrecarga (MINVU, 1996).

Los sectores favorables a la infiltración se han determinado encerrando aquellas áreas en donde la profundidad del nivel estático es de mínimo 30 m (Figura 23). Aquella profundidad ha sido establecida como una profundidad media, de acuerdo a los límites considerados en el estudio CNR (2013), en donde se toman profundidades del orden de 18, 28 y 45 m para delimitar sectores apropiados para la recarga (Figura 24 y Figura 25).

Se obtienen, así, un total de 8 sectores, dentro de la cuenca (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, y S8) que poseen una profundidad mínima del nivel estático de 30 m. Los sectores, resultantes de este estudio, que coinciden con las áreas señaladas para la recarga, por la CNR (2013), son, a modo cercano, los sectores S1, S2, S3, parte del S4, y el S6.

No todos ellos, sin embargo, serán analizados en detalle. Solo el sector S4 se ha considerado, dada su extensión superficial, y sus profundidades del nivel estático.

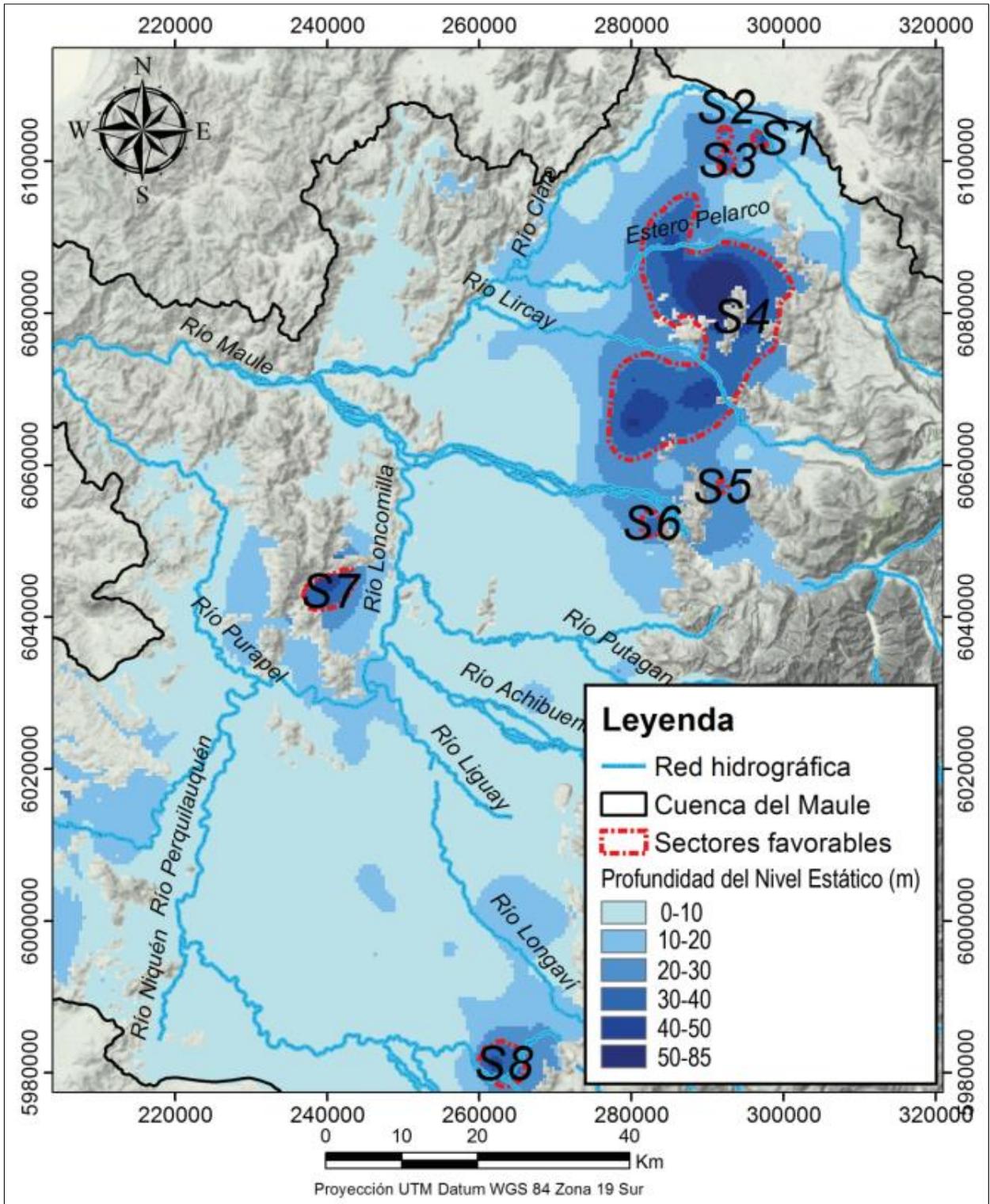


Figura 23: Mapa de los sectores resultantes de delimitar profundidades mínimas de nivel estático de 30 m. Para hacer referencia a estos 8 sectores se han nombrado como S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 y S8. Fuente: elaboración propia.

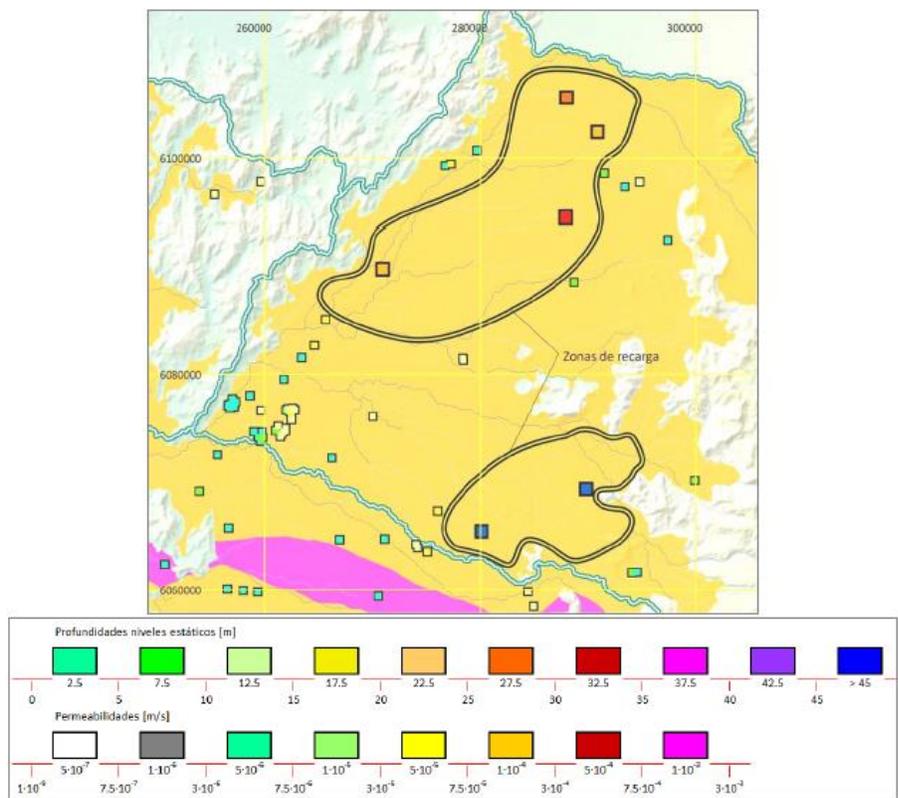


Figura 24: Área para recarga en sector Claro. Fuente: CNR, 2013.

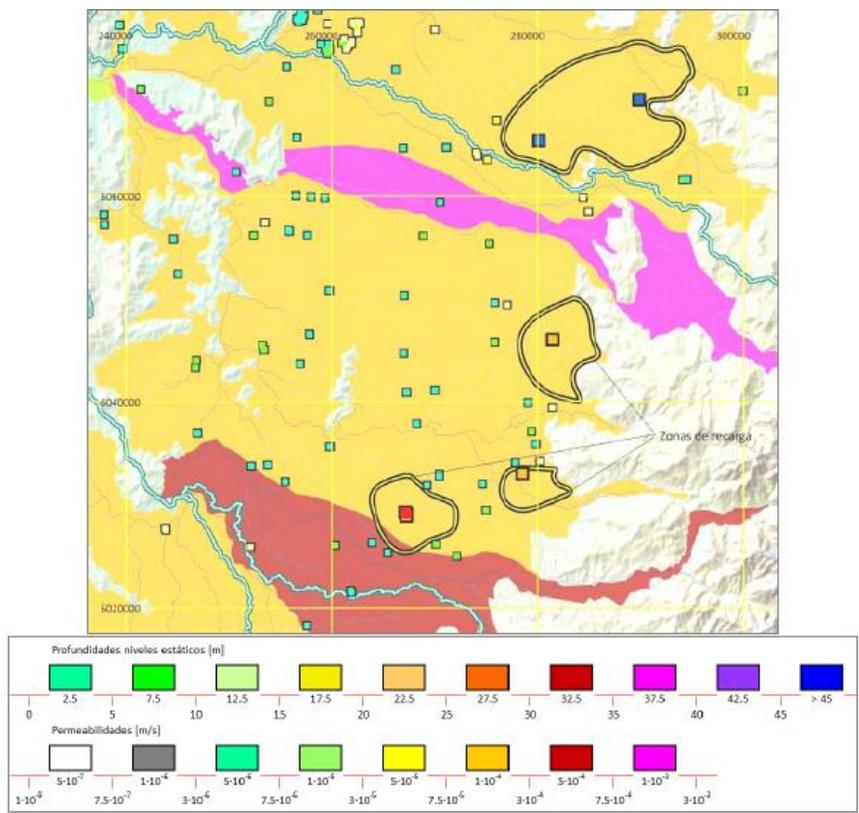


Figura 25: Área para recarga en sector Maule-Loncomilla. Fuente: CNR, 2013.

5.1.1 Caracterización del sector S4

5.1.1.1 Ubicación

El sector S4 abarca las comunas de Río Claro, Pelarco y San Clemente, se encuentra a unos 30 km al este de la ciudad de Talca, y comprende un área de 431,3 km², aproximadamente.

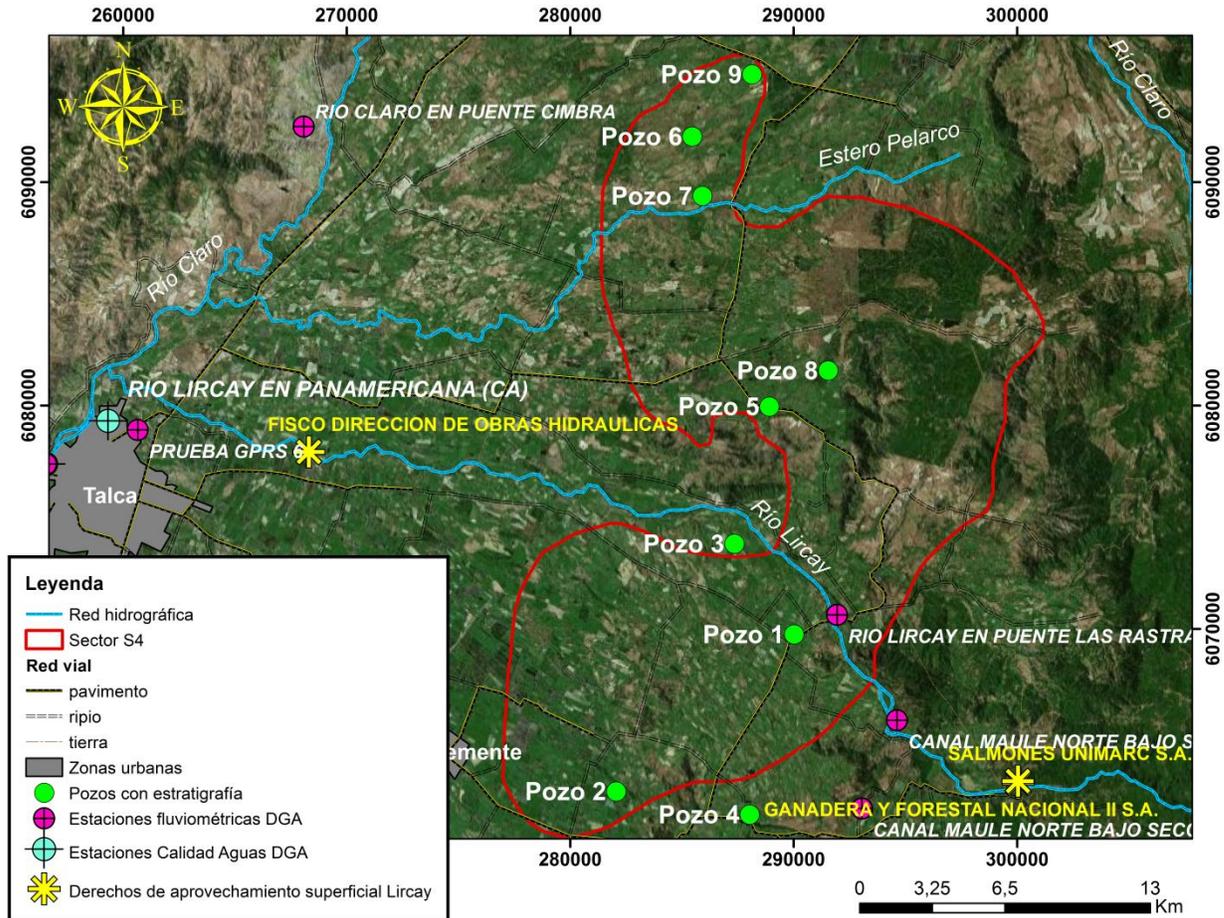


Figura 26: Ubicación del sector S4. Fuente: elaboración propia a partir de archivos formato *shape* de Albers, 2012.

5.1.1.2 Estratigrafía

Para establecer apropiados mecanismos de recarga, en este sector, es imprescindible conocer la estratigrafía de la zona no saturada. Lo anterior, determina si la recarga se realiza mediante sistemas de infiltración superficial, a la zona vadosa o directamente al acuífero. Además, para establecer, a grandes rasgos, las características de diseño de dichos sistemas, se requiere saber con cierto grado de precisión la estratigrafía cercana a los puntos de recarga. Es, así, que se han recopilado un total de 9 columnas estratigráficas cercanas o pertenecientes al sector 4 (Figura 27 a la Figura 31).

El detalle de estas columnas se muestra en la Tabla 6, y su ubicación se ha indicado en la figura anterior.

Tabla 6: Detalle de columnas estratigráficas del sector 4. Proyección UTM, Datum WGS84, huso 19S.

Nombre Pozo	Expediente/Código	UTM Este	UTM Norte	Cota (msnm)	Profundidad (m)	Fuente
Pozo 1	117	290020,0	6069747,0	283,0	80,0	Informe DGA 2010
Pozo 2	ND-0702-1498	282061,0	6062719,0	273,0	71,5	Expediente DGA
Pozo 3	ND-0702-1585	287350,0	6073808,0	233,0	68,0	Expediente DGA
Pozo 4	ND-0702-3559	288031,0	6061683,0	329,0	50,0	Expediente DGA
Pozo 5	ND-0702-1473	288913,0	6079952,0	225,0	86,0	Expediente DGA
Pozo 6	ND-0702-3300	285459,0	6092039,0	224,0	103,0	Expediente DGA
Pozo 7	ND-0702-3417	285677,0	6089030,0	217,0	97,6	Expediente DGA
Pozo 8	ND-0702-3523	291542,0	6081563,0	264,0	125,4	Expediente DGA
Pozo 9	166	288135,5	6094823,7	249,0	100,0	Informe DGA 2010

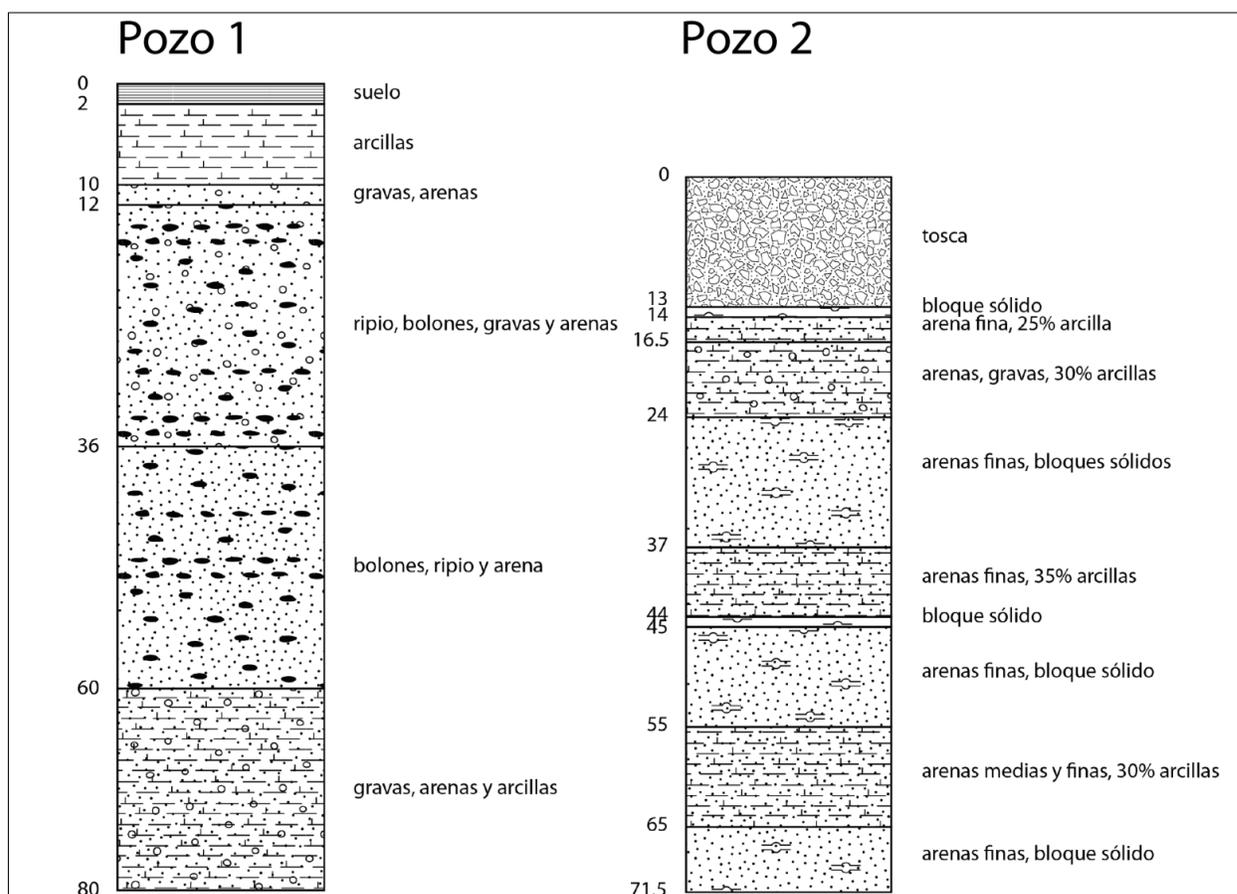


Figura 27: Columnas estratigráficas de los Pozos 1 y 2. Fuente: modificado de DGA (2010) y expedientes DGA.

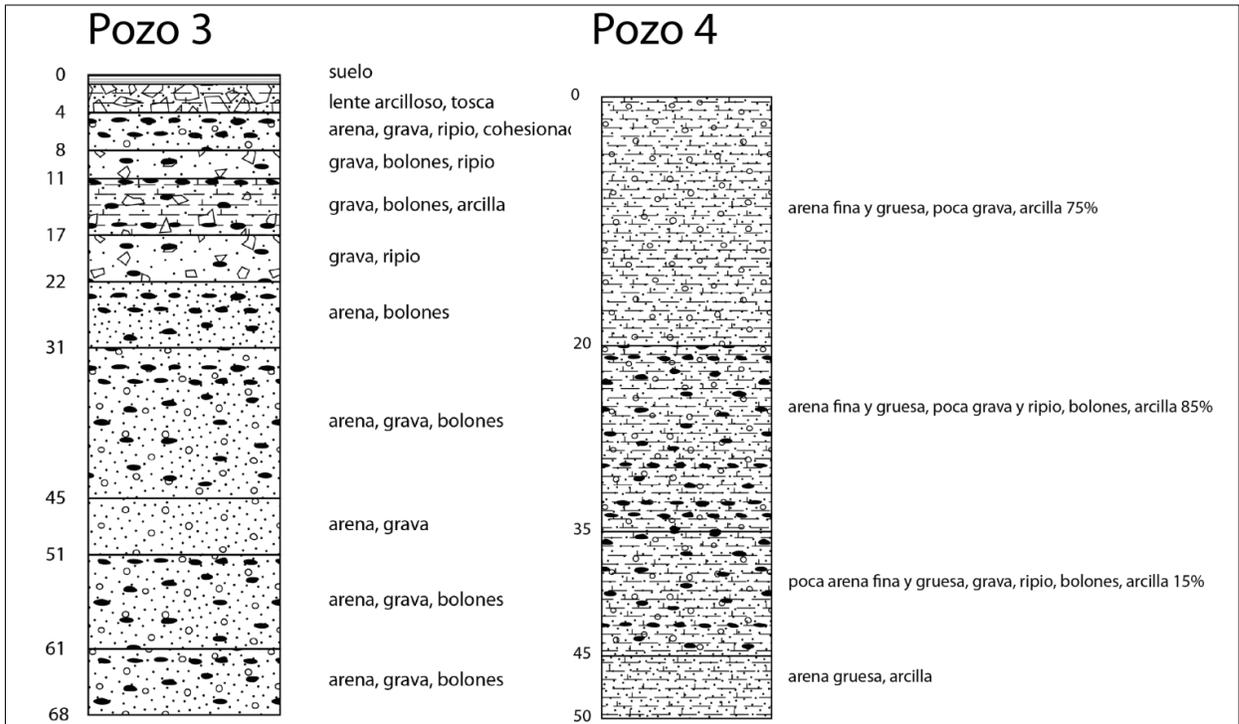


Figura 28: Columnas estratigráficas de los Pozos 3 y 4. Fuente: modificado de expedientes DGA.

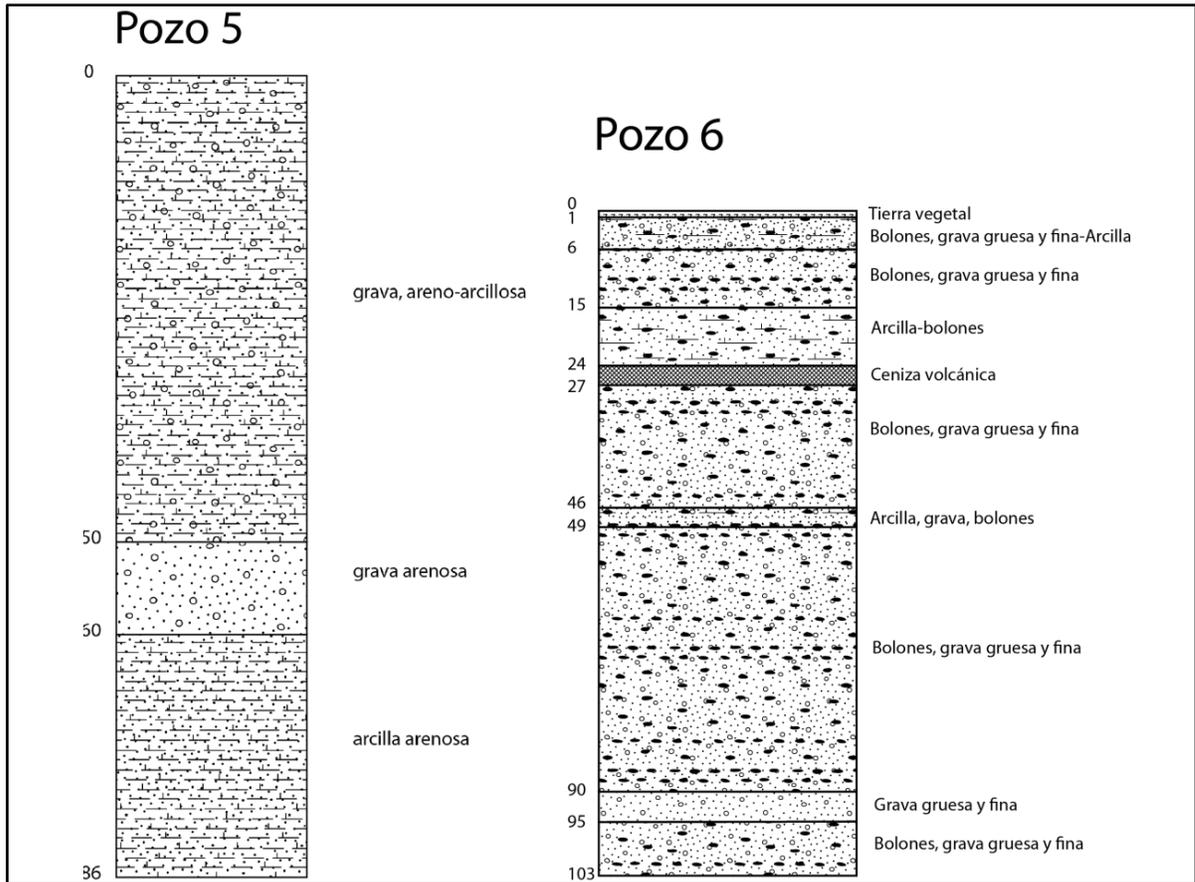


Figura 29: Columnas estratigráficas de los Pozos 5 y 6. Fuente: modificado de expedientes DGA.

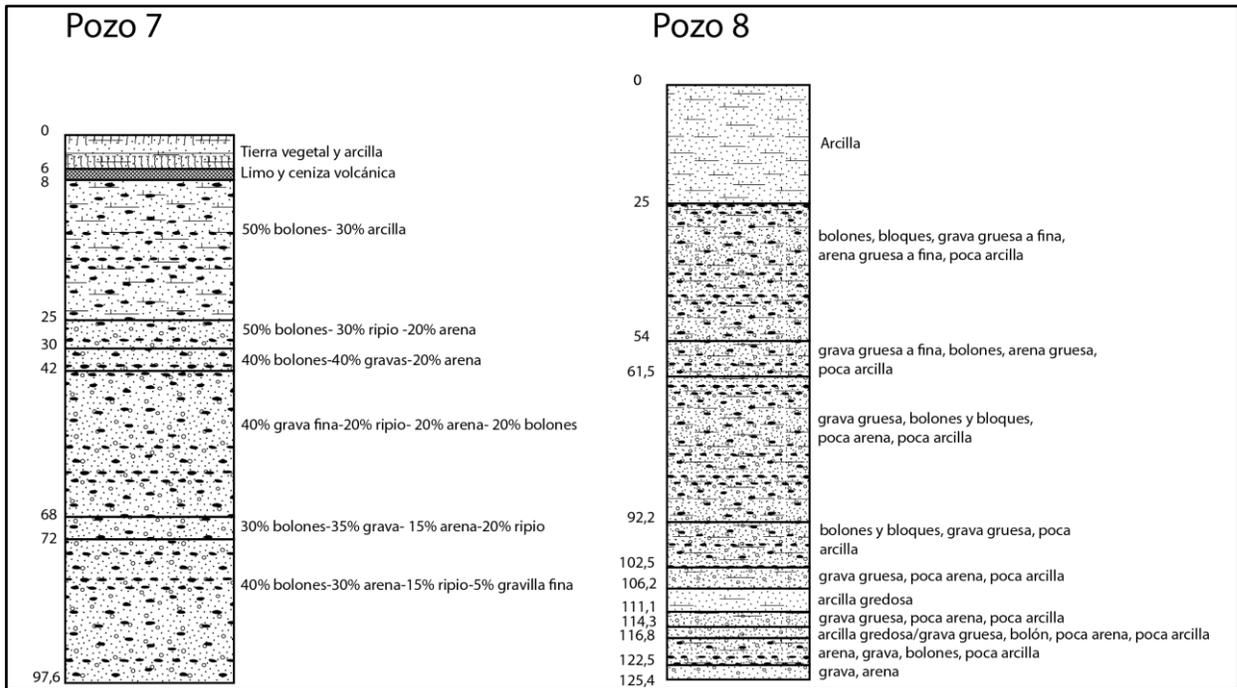


Figura 30: Columnas estratigráficas de los Pozos 7 y 8. Fuente: modificado de expedientes DGA.

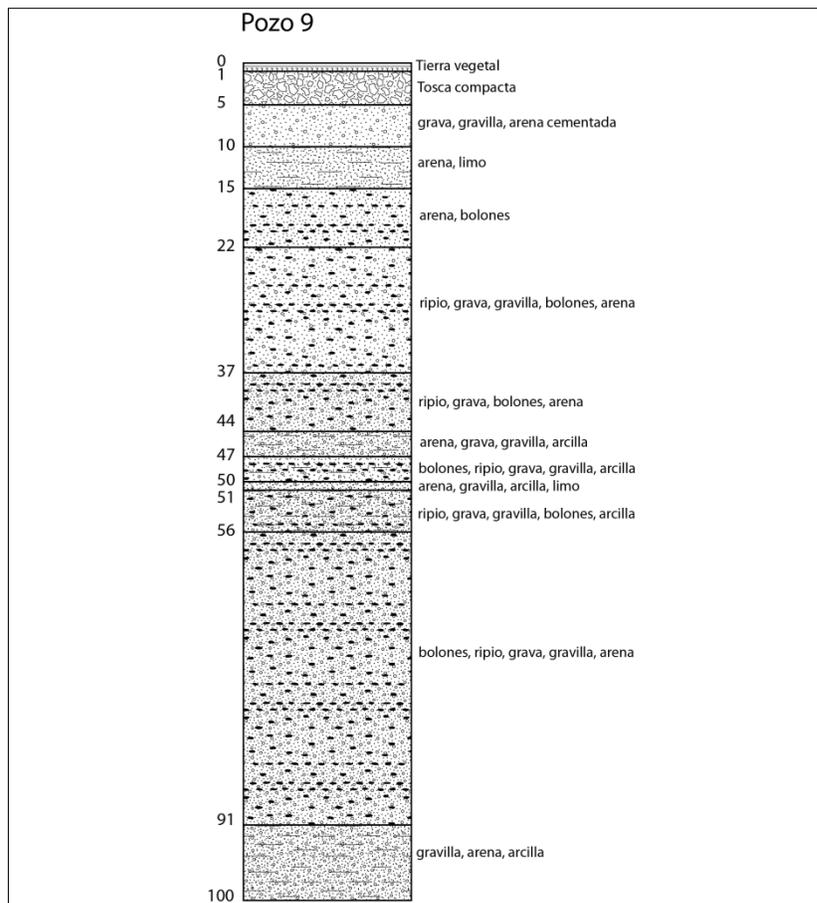


Figura 31: Columna estratigráfica del Pozo 9. Fuente: modificado de DGA (2010).

5.2 Determinación de subsectores

De acuerdo a las distintas permeabilidades asignadas por Espinoza (2005), a las unidades hidrogeológicas presentes en el sector S4, se ha subdividido este sector en tres subsectores: SS4.1 (permeable), SS4.2 (semipermeable) y SS4.3 (impermeable) (Figura 32).

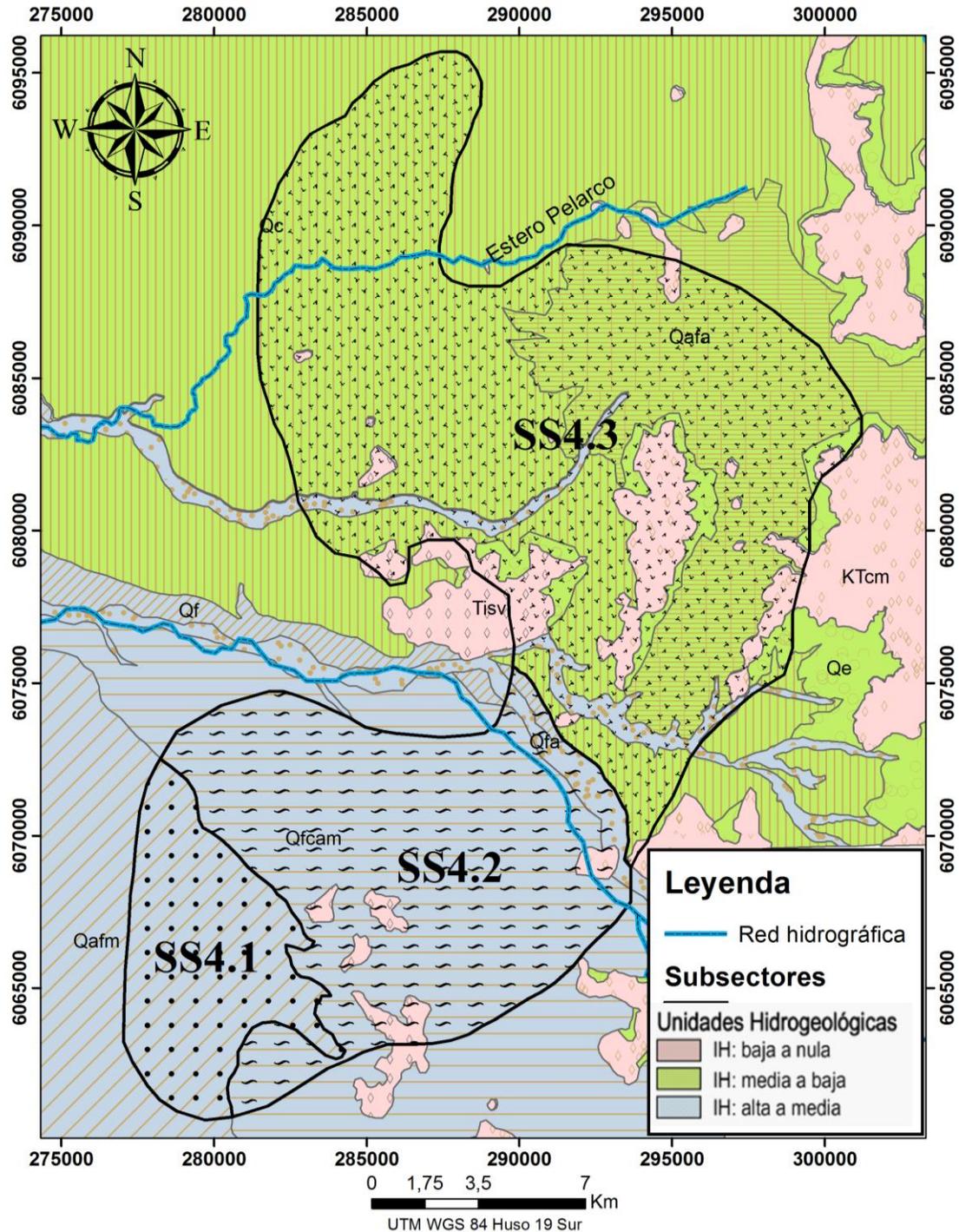


Figura 32: Subsectores SS4.1, SS4.2 y SS4.3, obtenidos según las distintas permeabilidades de las unidades hidrogeológicas presentes, asignadas por Espinoza (2005). Fuente: elaboración propia.

De estos 3 subsectores, solo se han analizado los 2 primeros (SS4.1 y SS4.2), ya que el subsector SS4.3, posee permeabilidades muy bajas, razón por la cual, no lo haría candidato a ser una alternativa de recarga.

5.2.1 Subsector SS4.1

Dentro del sector S4, se ha delimitado un área de aproximadamente 46,54 km² (ver Figura 32), la cual enmarca, únicamente, depósitos de la Unidad A (ver Figura 10). Estos depósitos poseen una alta permeabilidad, la que va desde los 10⁰ a 10⁻² cm/s, y presentan materiales de granulometrías gruesas, con muy poca presencia de finos. Se tienen acuíferos libres, y las vulnerabilidades son de altas a moderadas.

5.2.1.1 Volumen de almacenamiento

El volumen de almacenamiento correspondiente al subsector SS4.1 es de 111.696.000 m³ (Tabla 7).

Tabla 7: Datos para el cálculo del volumen de almacenamiento.

Área (km ²)	Coefficiente de almacenamiento "S"	Espacio disponible para almacenamiento (m)	Volumen de almacenamiento (m ³)
46,54	0,1	24	111.696.000

5.2.1.2 Fuentes de agua

Las fuentes de agua más predecibles, con respecto a los volúmenes de recarga disponibles, corresponden a aguas superficiales, agua residual y agua potable (ver Capítulo 2.5.1). Sin embargo, de acuerdo a la necesidad de tratamiento, el agua residual encarecería los costos de un proyecto de recarga; por otro lado, el recargar agua potable encarecería, también, los costos de efectuar una recarga, debido a los tratamientos ya aplicados. De lo anterior, se desprende que la fuente de agua contemplada en este estudio, correspondería a agua superficial natural.

Debido a que este sector se encuentra alejado de cursos permanentes de agua natural, que podrían entregar estimaciones de caudales confiables, como lo son el río Lircay (a más de 7 km) y el río Maule (a unos 5 km), se deben considerar otras alternativas para la distribución del agua, ya sea mediante canalización hacia instalaciones de recarga lejanas (UNESCO, 2005), o aprovechando canales de regadío (Jiménez, 2013). En su defecto, se podría estimar una fuente de agua para la recarga, a partir de aguas lluvias. A continuación, se presentan algunas consideraciones respecto a las alternativas mencionadas anteriormente.

Canales de riego del Sistema Maule Norte. Se tienen antecedentes de la existencia de una densa red de canales de regadío en este sector (Figura 33), los cuales derivan las aguas del embalse Colbún para su distribución a las comunas de San Clemente, Pelarco, Río Claro y San Rafael.

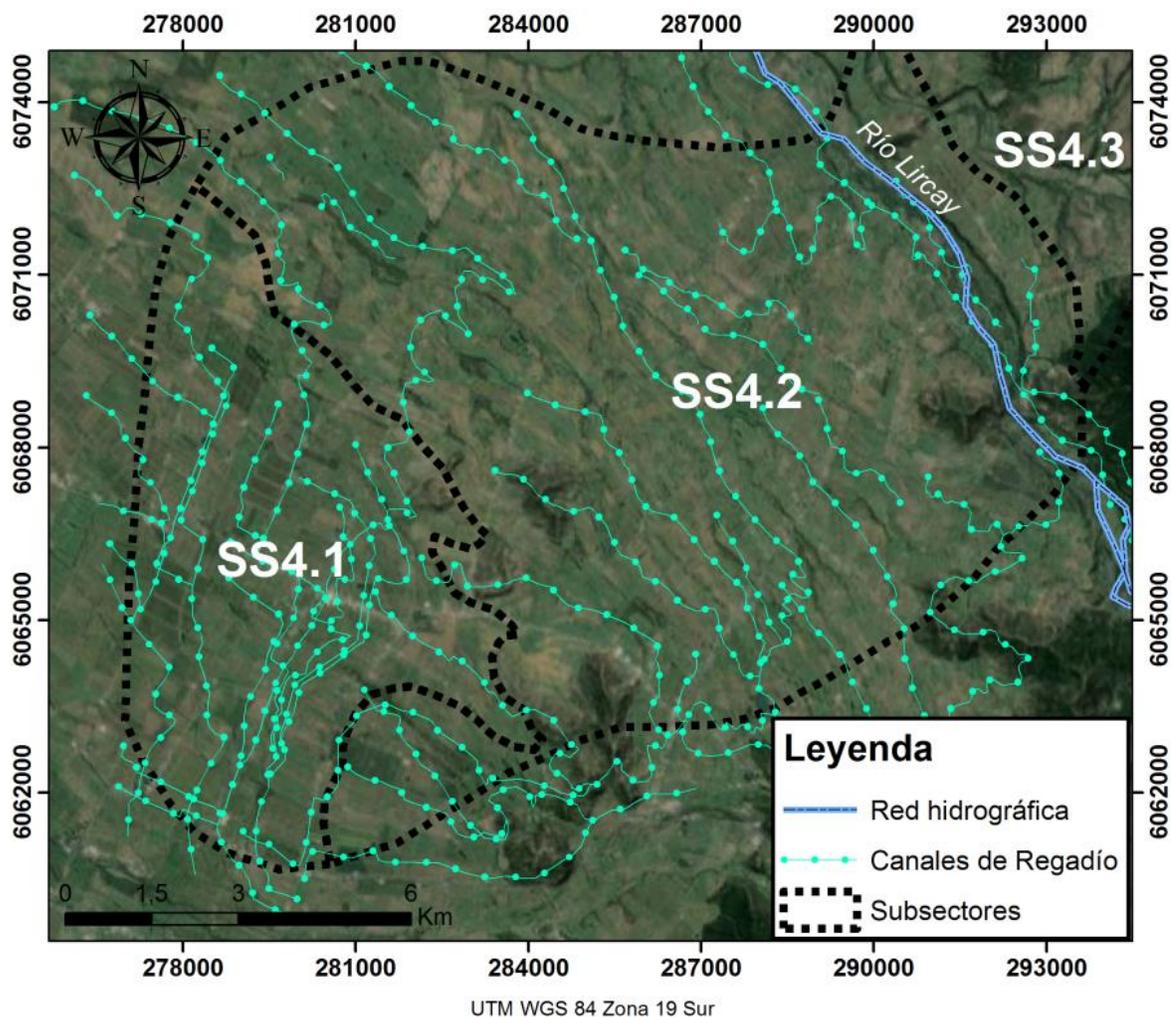


Figura 33: Red de canales de riego en los subsectores SS4. 1 y SS4.2. Fuente: elaboración propia a partir de imagen de IDE-Chile.

Si se considerase esta alternativa, se debería estar al tanto de que las aguas provenientes del embalse Colbún, contienen cantidades no despreciables de sólidos en suspensión, dada la turbidez del agua mostrada en la Figura 34. Esta fotografía está tomada desde el puente que se encuentra sobre el canal que une los embalses Machicura-Colbún.

Aguas de escorrentía de tormentas. Para esto sería conveniente realizar un detallado estudio hidrológico en el sector, considerando que la precipitación media anual, allí, es del orden de 1.000 mm.



Figura 34: Fotografía tomada desde el puente bajo el cual se encuentra el canal que une los embalses Colbún y Machicura. En este es posible apreciar la turbiedad del agua proveniente desde el embalse Colbún. Fecha de la fotografía: agosto 2014. Coordenadas en UTM, WGS84, zona 19S. Fuente: gentileza Carlos Parraguez Decker.

5.2.1.3 Mecanismos de recarga

Dependiendo de la fuente de agua a infiltrar considerada para este subsector, los mecanismos de recarga propuestos son los siguientes:

- Mecanismos de infiltración superficial, en el caso de infiltrar aguas provenientes de canales de regadío. Este mecanismo hace uso de la capacidad permeable del sector, además, de la propiedad depurativa del suelo, necesaria para infiltrar aguas que probablemente no sean de excelente calidad.
- Mecanismos de infiltración profunda, en el caso de utilizar aguas lluvias, las cuales probablemente son de mejor calidad que las de regadío.

Sin embargo, para cualquiera de los dos casos, resulta conveniente y necesario realizar un control de calidad de las aguas, y un posible tratamiento de estas, previamente a su infiltración.

5.2.2 Subsector SS4.2

Dentro del sector S4, se ha delimitado un área de aproximadamente 125,17 km² (ver Figura 32), la cual enmarca únicamente depósitos de la unidad hidrogeológica local B (ver Figura 10). Estos depósitos poseen una permeabilidad media, la que va desde los 10⁻² a 10⁻⁶ cm/s, y presentan materiales semipermeables de tipos ripio, grava y arenas, con cantidades variables de limo y arcilla. Según Espinoza (2005) este subsector desarrollaría, principalmente, acuíferos libres, y la vulnerabilidad del acuífero sería de carácter moderado a alto.

5.2.2.1 Volumen de almacenamiento

El volumen de almacenamiento correspondiente al subsector SS4.2 es de 300.408.000 m³ (Tabla 8).

Tabla 8: Datos para el cálculo del volumen de almacenamiento del subsector SS4.2.

Área (km ²)	Coefficiente de almacenamiento "S"	Espacio disponible para almacenamiento (m)	Volumen de almacenamiento (m ³)
125,17	0,1	24	300.408.000

5.2.2.2 Fuentes de agua

Adyacente a este subsector, se tiene la estación fluviométrica Río Lircay en puente Las Rastras, la cual pertenece a la DGA (ver Figura 26). Esta estación entrega mediciones de los caudales del río Lircay.

5.2.2.2.1 Caudales

La fuente de agua que dispone de mediciones de caudales disponibles, en el sector 4, corresponde al río Lircay, el cual es un curso fluvial permanente, afluente del río Claro, de régimen pluvial; se origina al NE de la ciudad de Talca a 277 m.s.n.m. tiene un recorrido de NW a W.

Los caudales disponibles del río Lircay, en el sector 4, registrados en la estación fluviométrica Río Lircay en Puente La Rastras, están evaluados anual, estacional y mensualmente, para distintas probabilidades de excedencia.

La Tabla 9 y la Figura 35, muestran los caudales a distintas probabilidades de excedencia para periodos estacionales y anuales

La serie de caudales completa de la estación Río Lircay en puente Las Rastras se encuentra en anexo D.

Tabla 9: Caudales (m³/s) en estación Río Lircay en puente Las Rastras, a distintas probabilidades de excedencia, para períodos anual (abril-marzo) y estacional (abril-septiembre; octubre-marzo). Fuente: DGA, 1992.

PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)	Q (m ³ /s) ANUAL		Q (m ³ /s) ESTACIONAL	
	ABR-MAR	ABR-SEP	ABR-SEP	OCT-MAR
5	30,66	46,61	46,61	17,71
10	25,23	37,54	37,54	14,60
20	19,93	28,89	28,89	11,55
30	16,81	23,91	23,91	9,76
40	14,54	20,35	20,35	8,45
50	12,69	17,50	17,50	7,38
60	11,08	15,05	15,05	6,45
70	9,58	12,81	12,81	5,59
80	8,08	10,60	10,60	4,72
85	7,28	9,44	9,44	4,26
90	6,38	8,16	8,16	3,73

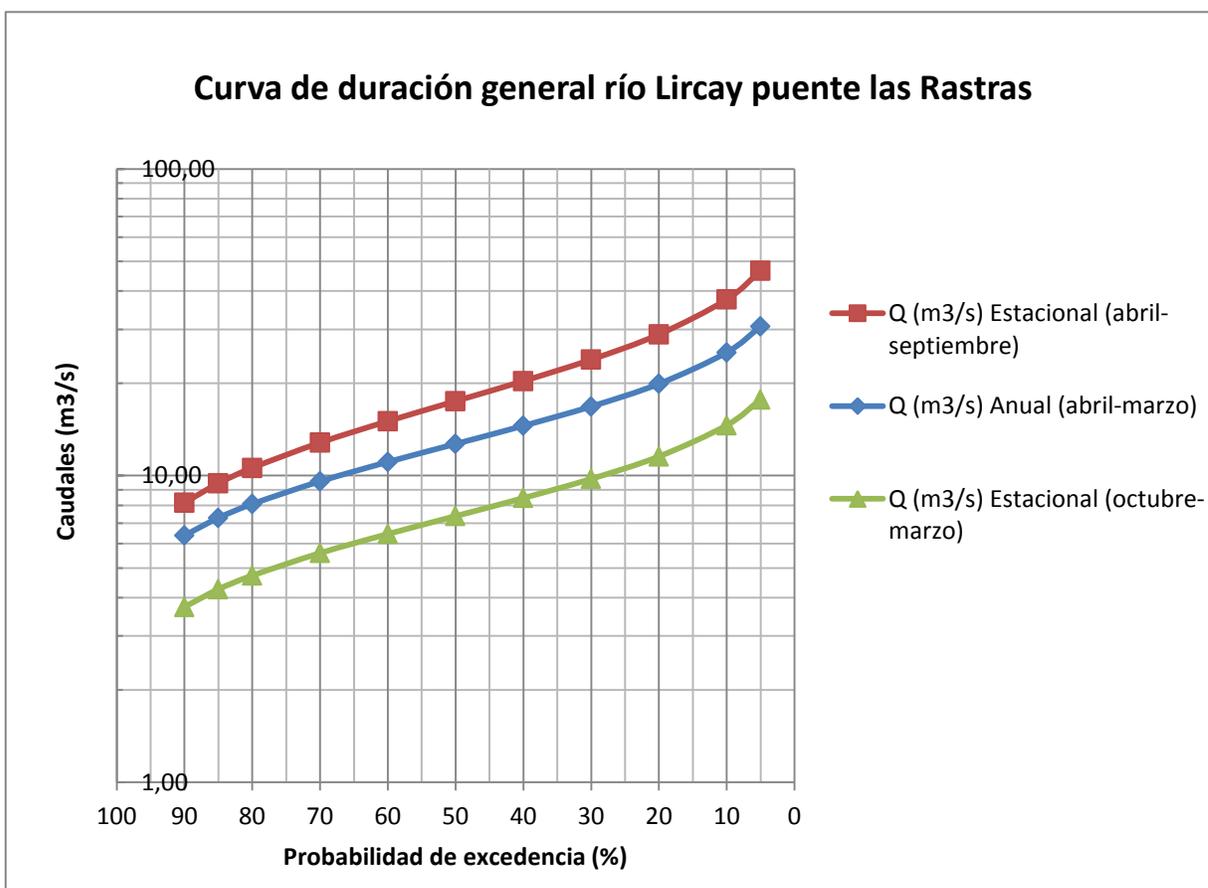


Figura 35: Caudales (m³/s) anuales y estacionales para distintas probabilidades de excedencia en estación Río Lircay en puente Las Rastras. Fuente: elaboración propia a partir de datos de DGA, 1992.

La Tabla 10 y la Figura 36, muestran los caudales a distintas probabilidades de excedencia para cada mes del año.

Si bien los caudales disponibles para este sector son bastante considerables, se debe mencionar que solo el 80 por ciento de su valor puede ser utilizado para la recarga, ya que el restante 20 por ciento del caudal debe permanecer en el curso del río, aguas abajo, para cumplir con lo denominado Caudal Ecológico Mínimo, reglamento aprobado el año 2012 por el Ministerio del Medio Ambiente, República de Chile.

Tabla 10: Caudales mensuales (m³/s) en estación Río Lircay en puente Las Rastras, a distintas probabilidades de excedencia. Fuente: DGA, 1992.

P Ex%	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
5	15,18	37,50	85,66	67,41	61,38	55,28	35,15	36,52	20,75	13,93	16,07	10,45
10	10,80	25,65	58,95	66,36	49,16	42,66	27,56	28,71	16,25	10,92	11,36	7,74
20	7,16	16,20	37,49	47,53	37,57	31,17	20,52	20,10	12,08	8,14	7,46	5,38
30	5,32	11,62	27,04	37,35	30,94	24,95	16,59	15,55	9,76	6,58	5,51	4,14
40	4,13	8,76	20,46	30,41	26,22	20,48	13,84	12,48	8,13	5,48	4,26	3,31
50	3,26	6,72	15,77	25,10	22,46	17,10	11,68	10,17	6,86	4,63	3,34	2,69
60	2,57	5,16	12,16	20,72	19,24	14,28	9,96	8,29	5,79	3,91	2,63	2,18
70	1,99	4,00	9,20	16,97	16,31	11,77	8,22	6,65	4,82	3,26	2,03	1,74
90	1,48	2,79	6,64	13,26	13,43	9,38	6,65	5,15	3,89	2,63	1,50	1,34
85	1,24	2,28	5,43	11,44	11,93	8,17	5,84	4,40	3,42	2,31	1,24	1,14
90	0,98	1,76	4,22	9,49	10,26	6,85	4,95	3,60	2,89	1,96	0,98	0,93

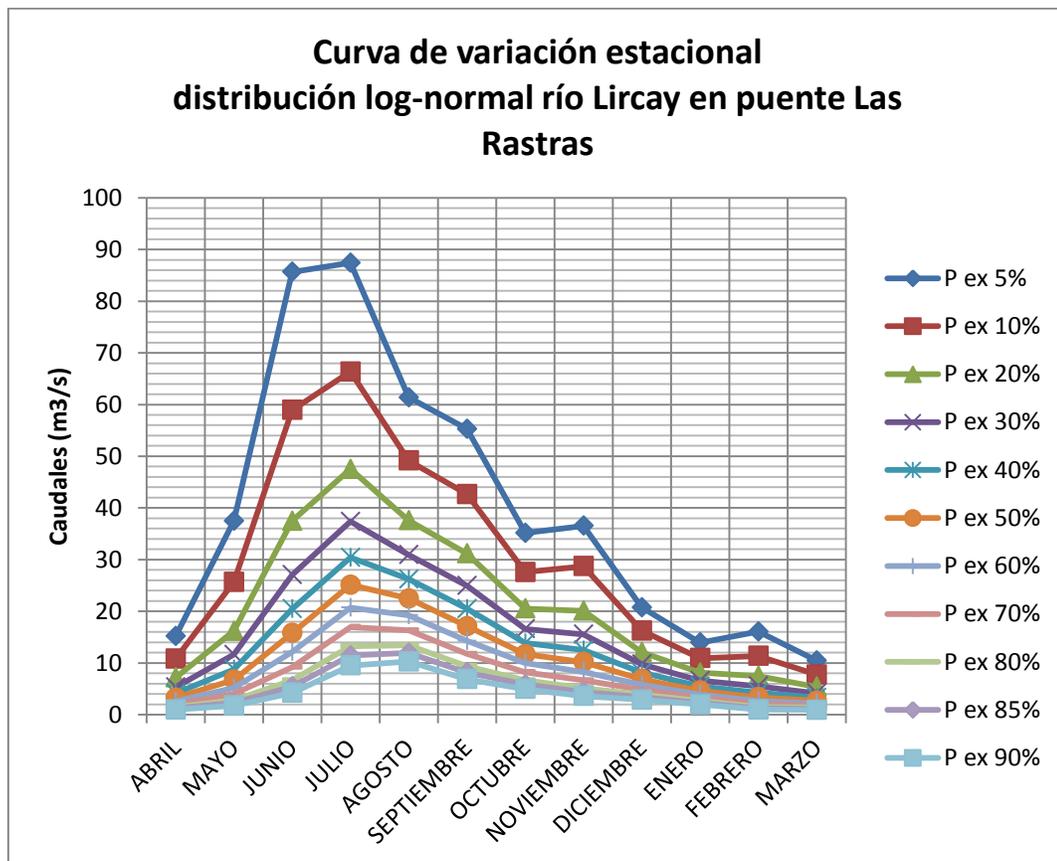


Figura 36: Curva de variación estacional, caudales (m³/s) a diferentes probabilidades de excedencia, en estación Río Lircay en puente Las Rastras. Fuente: elaboración propia a partir de datos de DGA, 1992.

5.2.2.2.2 Calidad

Uno de los objetivos de este estudio es conocer la calidad de la fuente de escurrimiento superficial (en este caso, río Lircay) susceptible a ser incorporada al acuífero. Dicha calidad debe ser superior o igual a aquella existente en el acuífero (Cabrera, 2013), contemplando, en otras palabras, el no deterioro de este. Además, es importante considerar que los principales usos del agua superficial, en esta cuenca, corresponden a riego, generación de energía hidroeléctrica y, en mucha menor medida, para consumo humano (DGA, 1997). Por otro lado, es relevante conocer los principales factores, naturales y antrópicos, que influyen en la calidad del agua del río Lircay (Tabla 11).

Tabla 11: Posibles factores incidentes en la calidad del agua del río Lircay. DBO5: Demanda Bioquímica de Oxígeno, CF: coliformes fecales, CT: coliformes totales. Fuente: DGA, 2004a.

Factores		Parámetros que pueden verse afectados	Caracterización del factor
Naturales	Antropogénicos		
Lixiviación superficial y subterránea de formaciones geológicas Arrastre de sedimentos ricos en aluminosilicatos	Contaminación difusa por plaguicidas y fertilizantes Contaminación difusa por aguas servidas	Cu, Mn, Mo, Al Posiblemente, DBO5, CF, CT	Geología: Formaciones geológicas de rocas de tipo volcánicas Centros Poblados: Ciudad de Pelarco (sin cobertura de tratamiento de aguas servidas) Descargas: Descarga de Empresa concesionaria de Servicios Sanitarios de la Región del Maule (ESSAM)

Los factores antrópicos, influyentes en la calidad del agua del río Lircay, son aquellos relacionados a la descarga de aguas servidas provenientes de los centros poblados de este sector (DGA, 2004a). La calidad del agua de un sistema hídrico, se determina a partir de análisis realizados a una muestra de agua recogida, adecuadamente, y se cuantifica por medio de la concentración de cada constituyente analizado. Aunque son muchos los constituyentes y propiedades del agua natural que pueden encontrarse cuantificados en análisis físico-químicos, solo algunos de ellos son capaces de determinar la calidad del recurso (García, 2012). Dado lo anterior, es que, a nivel internacional, se ha propuesto estimar la calidad del agua superficial a través de un índice que contempla los parámetros más representativos de cada sistema de cuenca. Este índice es conocido como el Índice de Calidad de Aguas Superficiales (ICAS).

En Chile, la consultora CADE IDEPE, en el estudio DGA (2004a), definió un ICAS representativo a la situación del país, basado en el método del índice de calidad de agua WQI de la NSF de los Estados Unidos. Este índice incluye parámetros “Obligatorios”, los de mayor ponderación en la metodología del WQI, y su elección se basa en que ellos son susceptibles a la contaminación antrópica. Adicionalmente, se seleccionan parámetros “Principales”, los cuales presentan excedencia con respecto a la clase de excepción definida en la Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas (CONAMA, 2004). El ICAS de la cuenca del río Maule, está compuesto por 6 parámetros obligatorios: Conductividad Eléctrica, DBO5, Oxígeno Disuelto, pH, Sólidos Suspendidos y Coliformes Fecales. Además, de otros 6 parámetros principales seleccionados para esta cuenca, los cuales son: cobre, cromo, hierro, manganeso, molibdeno y aluminio. Este índice, para el río Lircay, resulta ser de 96, valor que califica como aguas de excelente a muy buena calidad (DGA, 2004a).

Por otro lado, para establecer si la calidad del agua superficial del río Lircay, se ajusta a las normas NCh1333 y NCh409, para aguas de riego y potable, respectivamente, se deben comparar parámetros medidos en dicho cauce, con aquellos que las anteriores normas establecen como límites máximos. Para lograr lo anterior, se ha utilizado la información de medición de parámetros físico-químicos en la estación Río Lircay en Panamericana, cuya ubicación se encuentra a 33 km aguas abajo de la estación Río Lircay en puente Las Rastras (ver Figura 26). Estas mediciones se realizaron durante un periodo de 9 años (2005-2014).

La comparación resultante entre parámetros medidos en el cauce con aquella establecida por las normas NCh409 y NCh1333, se presenta en las Tablas 12 y 13, respectivamente.

Tabla 12: Comparación de valores medidos de parámetros físico-químicos, en estación Río Lircay en Panamericana, con valores límites máximos establecidos por la Norma NCh409, requisito de agua potable.

Parámetro	Valor medido	unidad	Límite máximo Norma NCh409	unidad
Arsénico	0,001	mg/l	0,01	mg/l
Cadmio	0,010	mg/l	0,01	mg/l
Cloruro	11,440	mg/l	400	mg/l
Cobre	0,014	mg/l	2	mg/l
Cromo total	0,033	mg/l	0,05	mg/l
Hierro	0,372	mg/l	0,3	mg/l
Magnesio	6,281	mg/l	125	mg/l
Manganeso	0,028	mg/l	0,1	mg/l
Mercurio	0,001	mg/l	0,001	mg/l
Nitrato	1,129	mg/l	50	mg/l
pH	7,851		6,5<pH<8,5	
Plomo	0,042	mg/l	0,05	mg/l
Selenio	0,001	mg/l	0,01	mg/l
Zinc	0,014	mg/l	3	mg/l

Tabla 13: Comparación de valores medidos de parámetros físico-químicos, en estación Río Lircay en Panamericana, con valores límites máximos establecidos por la Norma NCh1333, requisito de agua para riego.

Parámetro	Valor medido	unidad	Límite máximo Norma NCh1333	unidad
Aluminio (Al)	0,566	mg/l	5	mg/l
Arsénico (As)	0,001	mg/l	0,1	mg/l
Boro (B)	0,958	mg/l	0,75	mg/l
Cadmio (Cd)	0,010	mg/l	0,01	mg/l
Cloruro (Cl ⁻)	11,440	mg/l	200	mg/l
Cobalto (Co)	0,010	mg/l	0,05	mg/l
Cobre (Cu)	0,014	mg/l	0,2	mg/l
Cromo (Cr)	0,033	mg/l	0,1	mg/l
Hierro (Fe)	0,372	mg/l	5	mg/l
Manganeso (Mn)	0,028	mg/l	0,2	mg/l
Mercurio (Hg)	0,001	mg/l	0,001	mg/l
Molibdeno (Mo)	0,041	mg/l	0,01	mg/l
Níquel (Ni)	0,020	mg/l	0,2	mg/l
pH	7,851		5,5-9	
Plata (Ag)	0,010	mg/l	0,2	mg/l
Plomo (Pb)	0,042	mg/l	5	mg/l
Selenio (Se)	0,001	mg/l	0,02	mg/l
Sulfato (SO ₄ ⁼)	19,472	mg/l	250	mg/l
Zinc (Zn)	0,014	mg/l	2	mg/l

De la comparación resultante, entre valores de los límites máximos permitidos por las Normas NCh1333 y NCh409, y los valores de parámetros disponibles, medidos en dicha estación, se puede concluir que de los elementos presentes en este curso de agua, solo el hierro excede los requisitos para consumo de agua potable; y solo el boro y el molibdeno exceden los requisitos de agua para riego.

Cabe mencionar, que no se dispone, en este trabajo, de información de contaminantes bacteriológicos, como por ejemplo, coliformes fecales, ni tampoco de medición de sólidos suspendidos.

5.2.2.3 Mecanismos de recarga

Se sugiere, en el caso de que la disponibilidad del terreno fuese alta, y en el caso de que estos sitios estuviesen aledaños al río Lircay, utilizar mecanismos de infiltración superficial, cercanos o en el mismo cauce del río, ya que allí se cuenta con altas tasas de infiltración, el grado de depuración del agua es alto, debido a que atravesaría toda la zona no saturada del acuífero, el riesgo de colmatación es moderado con opción a mantención manual o mecánica y el caudal de recarga podría llegar a ser alto.

Por otro lado, en los casos en que la disponibilidad del terreno fuese baja, o en que la oferta de estos sitios estuviese alejada del río, se sugiere la utilización de mecanismos de infiltración subsuperficial, o mecanismos de infiltración profunda. Estos últimos se estiman convenientes, debido a la estratigrafía reconocida en el Pozo 1, la cual indica que existen capas de baja permeabilidad, inmediatamente bajo la superficie del suelo (Figura 27).

Si se utilizan mecanismos de infiltración subsuperficial, debe considerarse que el agua a recargar, requiere de un tratamiento secundario, ya que la capacidad de depuración del suelo es baja. En el caso de utilizar mecanismos de infiltración profunda, esta requerirá un tratamiento, a lo menos, terciario, ya que no existe una opción de depuración del suelo, debido a que la recarga al acuífero es directa.

5.2.2.4 Tasas de infiltración

A partir de la distribución de las tasas de infiltración del suelo (CIREN, 2012), en el subsector SS4.2, se han destacado aquellas áreas que superan los 6 m/día (Figura 37 y Figura 38). Son en estas áreas en donde sería recomendable realizar proyectos de recarga.

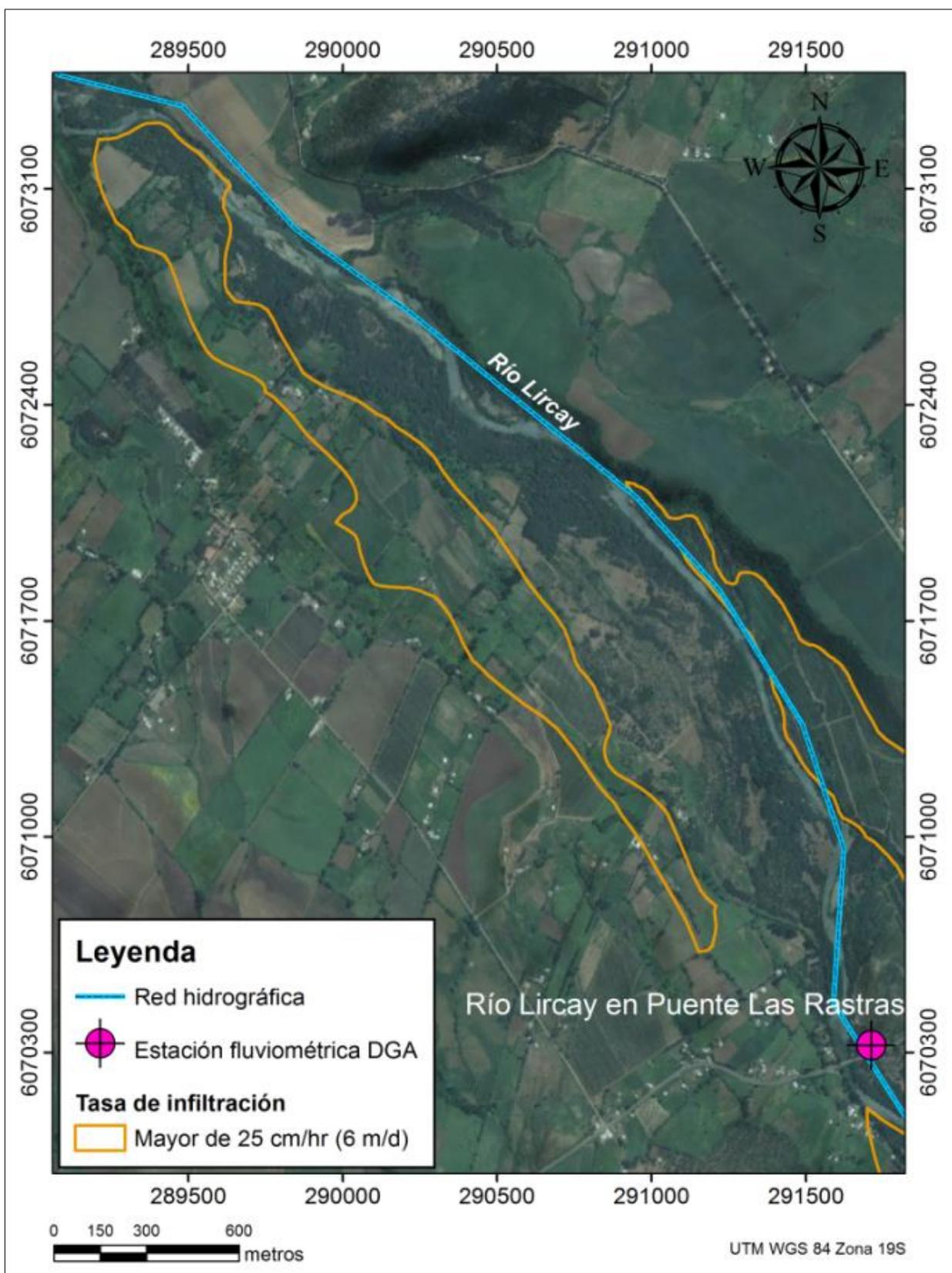


Figura 37: Áreas que poseen tasas de infiltración superiores a 6 m/día, según CIREN, 2012. Fuente: modificado de CIREN, 2012.

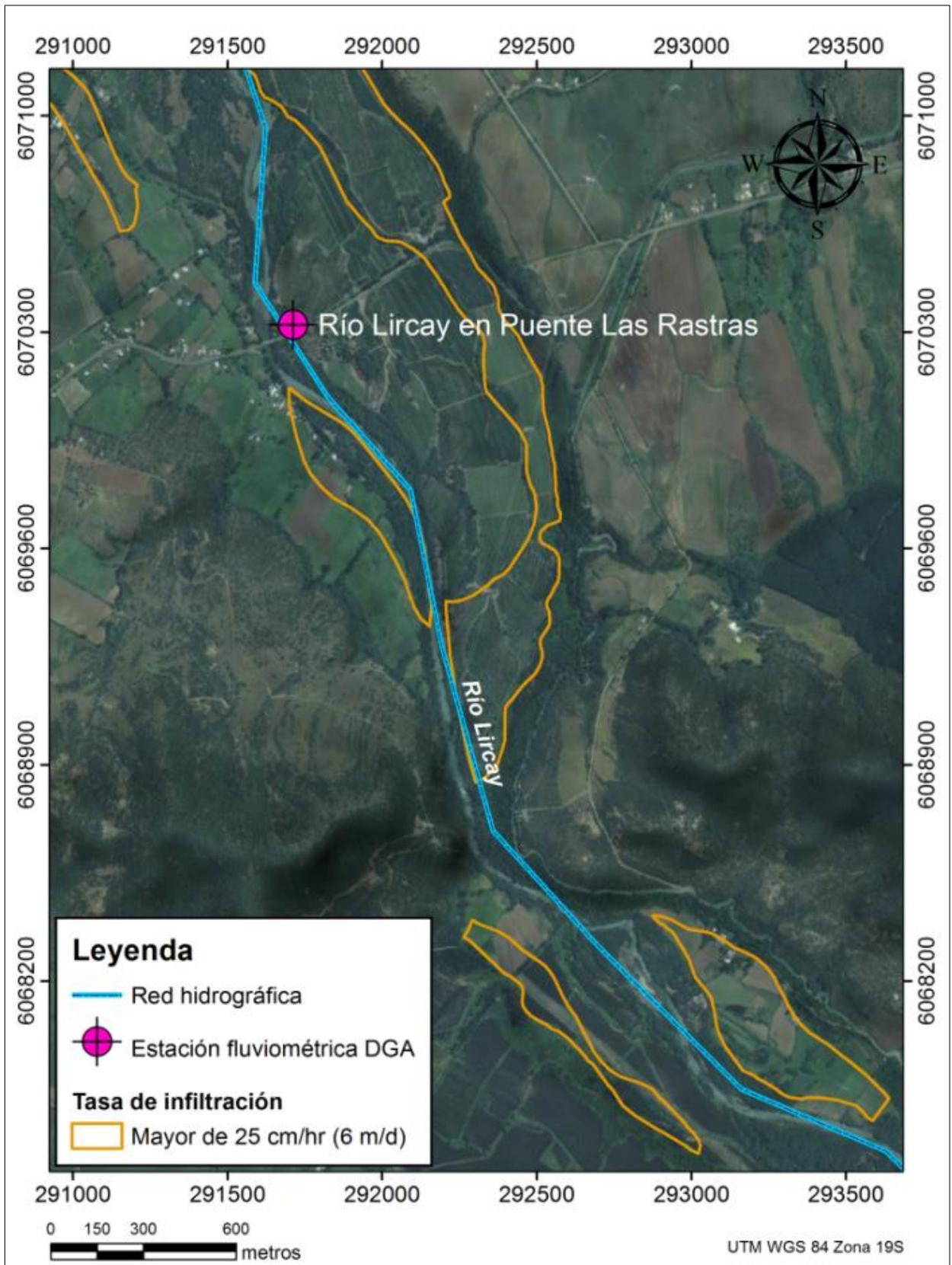


Figura 38: Áreas que poseen tasas de infiltración superiores a 6 m/día, según CIREN, 2012. Fuente: modificado de CIREN, 2012.

5.3 Evaluación económica subsector SS4.2

5.3.1 Antecedentes relevantes

En la Tabla 14, se muestran los datos generales que caracterizan al subsector SS4.2, así como también aquellos datos de referencia utilizados en la evaluación económica posterior.

Tabla 14: Datos y valores referenciales para la evaluación económica de métodos de infiltración en el subsector SS4.2. Fuente: elaboración propia.

Datos	Valor	Unidad	Referencia
Características del subsector			
Área del subsector SS4.2	125,17	km ²	Resultado de este estudio
Espesor disponible para almacenamiento	24	m	Resultado de este estudio
Coefficiente de almacenamiento	10	%	DGA, 2008b
Volumen de almacenamiento	300.408.000	m ³	Resultado de este estudio
Tasa de infiltración	6	m/día	CIREN, 2012
Costos generales			
Costo del terreno	\$ 10.000.000	pesos/ha	Avisos económicos publicados
Costo del agua potable en San Clemente	\$ 1.374	pesos/m ³	Aguas Nuevo Sur, Maule
Caudales considerados			
Caudal estacional (Abr-Sep) a P. Exc. = 30%	23.910	l/s	DGA, 1992
Derechos de agua superficial en Lircay concedidos al Fisco Dirección de Obras Públicas.	7.900	l/s	DGA (en línea)

5.3.2 Caudal de infiltración susceptible

El caudal estacional de 23.910 l/s, indicado en la Tabla 14, corresponde a aquel caudal que atravesaría la sección del río, en la estación fluviométrica Río Lircay en puente Las Rastras, durante los meses de abril a septiembre, a una probabilidad de excedencia del 30%, es decir, para un año lluvioso y con un período de retorno de, aproximadamente, 3 años. Este caudal, por lo tanto, corresponde al monto total de agua, por unidad de tiempo, que atraviesa la sección fluvial en la estación Río Lircay en puente Las Rastras. Sin embargo, no todo este caudal podría ser utilizado para llevar a cabo un proyecto de recarga artificial. Lo anterior se debe a que existen derechos superficiales de agua concedidos, en el río Lircay, de ejercicio permanente y continuo, que deben ser entregados prioritariamente ante nuevos derechos pedidos. En otras palabras, lo anterior significa que se debe dejar pasar un caudal mínimo por la sección de la estación fluviométrica en cuestión, para asegurar que dichos montos de agua sean entregados a los derechos permanentes ya existentes que se encuentren aguas abajo de la estación.

Como dato referencial, provisto por la DGA, se tiene un derecho de aprovechamiento superficial consuntivo, de ejercicio permanente y continuo, concedido al Fisco, correspondiente a

7.900 l/s, que se encuentra a unos 28 km aguas abajo de la estación fluviométrica Río Lircay en puente Las Rastras (ver Figura 26). Luego, para asegurar su otorgamiento, y considerando que dos puntos, dentro de un mismo cauce, con caudales proporcionales, encierran áreas proporcionales (Ecuación 3), se procede a determinar el caudal necesario, mínimo, que debe atravesar la sección en el Punto 1 (Estación Río Lircay en puente Las Rastras) (Figura 39), para que en el Punto 2 (Derecho concedido al Fisco), se perciba un caudal de mínimo 7.900 l/s. Además, se debe considerar que aplicando el caudal ecológico mínimo que este derecho de aprovechamiento debe dejar pasar aguas abajo de la captación, correspondiente a un 20%, el caudal que debe percibir el Punto 2 asciende a un mínimo de 9.875 l/s.

Ecuación 3: Expresión que relaciona caudales y áreas proporcionales entre dos puntos en un mismo cauce. Q1 y Q2, son los caudales que perciben dos puntos, en un mismo cauce, y A1 y A2 son las áreas que encierran las cuencas que determinan aquellos puntos 1 y 2, respectivamente.

$$\frac{Q1}{Q2} = \frac{A1}{A2}$$

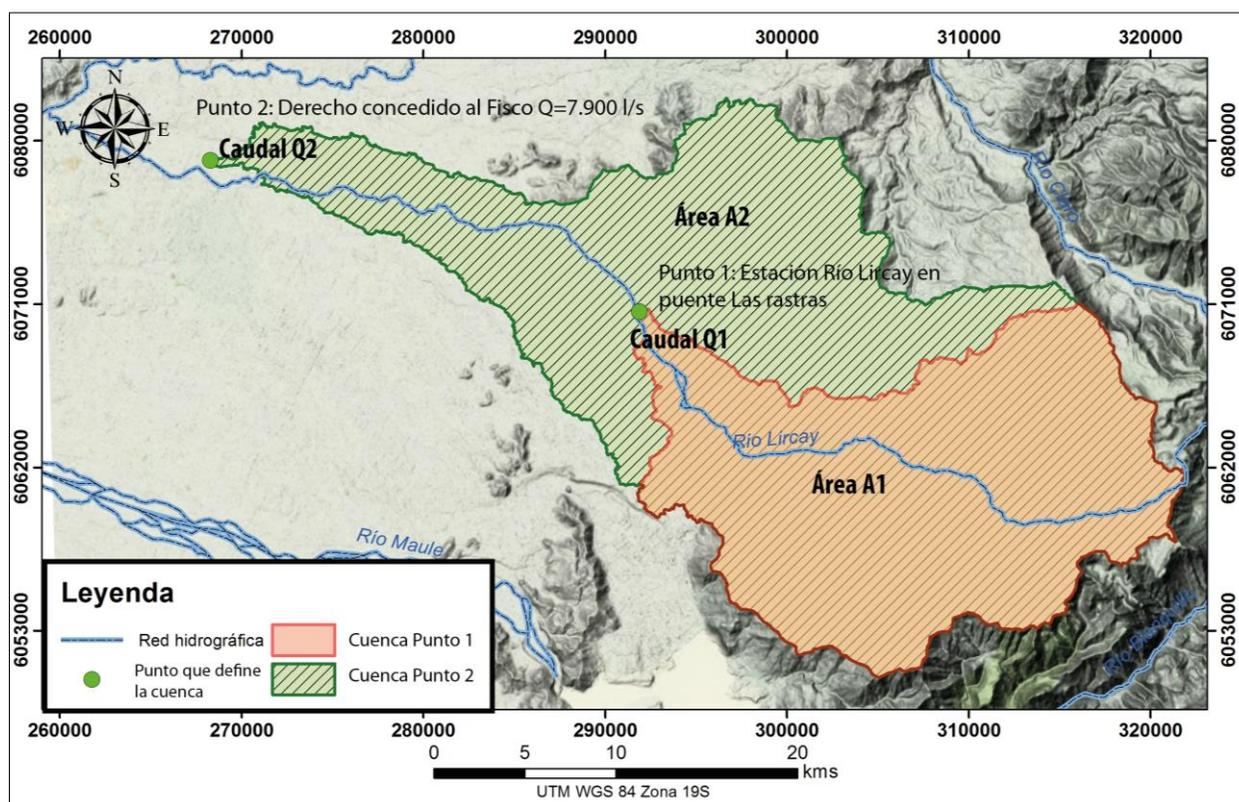


Figura 39: Cuencas delimitadas sobre el río Lircay, definidas a partir de dos puntos en el cauce (Punto 1 y 2), mediante herramienta Watersheed con Software Arcgis. Notar que el límite de cabecera de ambas cuencas es coincidente. Fuente: elaboración propia.

Utilizando la ecuación anterior, se obtiene, finalmente, que el caudal necesario pasante por el Punto 1, debe ser de mínimo 4.863,8 l/s (Tabla 15).

Tabla 15: Cálculo del caudal mínimo para el Punto 1, y datos utilizados. Fuente: elaboración propia.

Caudal Q1 (l/s)	Caudal Q2 (l/s)	Área A1 (km ²)	Área A2 (km ²)
4.863,8	9.875	366,39	743,89

Luego, y considerando que el caudal estacional, entre abril y septiembre, en la Estación Río Lircay en puente Las Rastras es de 23.910 l/s, el caudal que podría ser aprovechado para la infiltración es de máximo el 80% (aplicando caudal ecológico mínimo) del caudal estacional menos el caudal pasante mínimo. Por lo tanto, el caudal que es susceptible de ser utilizado en un proyecto de recarga artificial, para un 30% de probabilidad de excedencia, es de 15.236,96 l/s, en la estación Río Lircay en puente Las Rastras.

5.3.3 Métodos de infiltración

5.3.3.1 Método 1: zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración son estructuras excavadas, suficientemente profundas para penetrar las capas de baja permeabilidad que sobreyacen al acuífero. En muchas de estas estructuras, la mayoría de la infiltración ocurre lateralmente a través de las paredes de la fosa, ya que, en general, en capas sedimentarias o materiales aluviales, la conductividad hidráulica lateral es considerablemente más alta que la conductividad hidráulica vertical (Government of India, 2007). Las zanjas de recarga, típicamente, son de menos de 1 m de ancho y hasta de 5 m de profundidad. Ellas se rellenan con arena gruesa o grava fina. El agua, normalmente, es suministrada mediante una tubería perforada sobre la superficie del relleno, y la zanja se cubre para mimetizarla con los alrededores (Bouwer, 2002). Para las zanjas, el pre-tratamiento se realiza en la zanja misma colocando un filtro de arena con, posiblemente, un geotextil encima del relleno. Sin embargo, este filtro reduciría demasiado el flujo en el relleno, para lo cual la zanja debería ser ampliada en la parte superior para crear una zanja en forma de “T” con una gran área filtrante (Bouwer, 2002).

Los siguientes requerimientos están citados del documento Government of India (2007): “la capacidad de recarga de la fosa incrementa con el área de la sección transversal, por lo tanto, siempre es recomendable construir una fosa tan larga como sea posible; la fuente de agua para la recarga debería estar tan libre de limo, como sea posible; las fosas de recarga pueden ser usadas como estanques para almacenamiento e infiltración de agua, o ellas pueden ser rellenas con un material de filtro de arena y grava, sobre una capa de bolones en el fondo, incluso cuando las fosas sean ocupadas como estanques, es deseable proveer de una capa delgada de arena, al fondo de la fosa, para evitar que el limo obstruya los estratos permeables; el fondo de las fosas y la capa superior de arena de filtro, puede requerir periódica limpieza para asegurar una apropiada recarga”.

La expresión que permite estimar el caudal infiltrado por cada zanja es la siguiente:

Ecuación 4: Fórmula para calcular el caudal infiltrado (Q) en una zanja de infiltración. Fuente: MINVU (1996).

$$Q = 0,001 * Cs * f * A$$

En donde:

- Q: Caudal infiltrado en una zanja (m³/hr).
- Cs: factor de seguridad (Azzout *et al.* 1994).

- f: tasa de infiltración (mm/hr).
- A: área total de percolación de la zanja (m²).

El área de percolación (A) de la zanja está dada por las siguientes ecuaciones (según sea el caso: con decantador o sin decantador, respectivamente):

Ecuación 5: Expresión que calcula el área de percolación de una zanja de infiltración, en el caso de que las aguas son limpias o hay elemento decantador. Fuente: extraída de MINVU (1996).

$$A = 2 * H(L + W) + 0,5 * L * W$$

Ecuación 6: Expresión que calcula el área de percolación de una zanja de infiltración, en el caso de la no existencia de un elemento decantador. El área de percolación de la zanja no considera el fondo ya que se colmata rápidamente (MINVU, 1996). Fuente: Extraída de MINVU (1996).

$$A = 2 * H(L + W)$$

En donde:

- A: área de percolación de la zanja (m²).
- L: largo de la zanja (m).
- H: altura del agua en la zanja (m).
- W: ancho de la zanja (m).

El factor de seguridad (Cs), según Azzout et al. (1994), se define respondiendo a las siguientes preguntas, hasta obtener un coeficiente determinado (Figura 40).

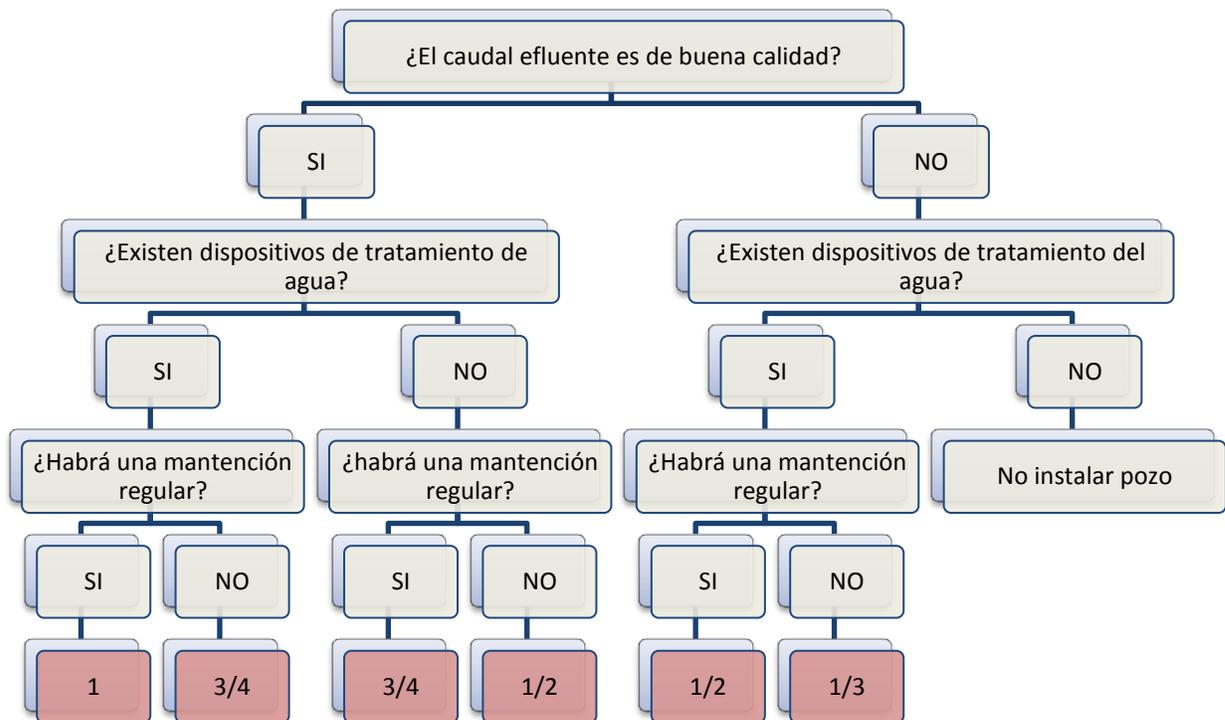


Figura 40: Factores de seguridad (Cs). Fuente: modificado de Azzout *et al.* 1994.

Para el caso de una zanja de infiltración se ha estimado considerar un factor de seguridad de 0,75, correspondiente a un efluente de buena calidad, a la no existencia de dispositivos de tratamiento del agua, y a una mantención regular. Si se implementaran zanjas de infiltración de 25 m de largo, 2 m de ancho y 5 m de profundidad, los costos estimados para su construcción serían los indicados en la Tabla 16.

Tabla 16: Cubicación y presupuesto para zanjas de infiltración de 25 m de largo, 2 m de ancho y 5 m de profundidad. Valor de la UF considerado al 11/03/2015: \$ 24.559,44. Fuente: Precios de referencia en UF según “Lista Oficial de Precios de Obras de Pavimentación para Cobro por Gastos de Inspección año 1995”, MINVU y el “Boletín de Precios N° 276 de Mayo-Junio de 1996” del SERVIU Metropolitano. MINVU (1996).

Servicio	Unidad	Precio unitario (UF)	Cantidad	Precio total
Excavación, en terreno blando, hecha a mano, sin agotamiento ni entibación, incluye el descepe y limpieza del terreno, así como el emparejamiento, nivelación y limpieza de fondo.	m ³	0,252	250	\$ 1.547.245
Transporte de excedentes de la excavación incluyendo carguío y depósito, a distancia menor a 10 km.	m ³	0,063	250	\$ 386.811
Suministro y colocación de geotextil.	m ²	0,096	320	\$ 754.466
Suministro y colocación de material de filtro granular de grava, tamaño medio 1 cm, colocado en una capa de 10 cm sobre el filtro geotextil de la cubierta superior.	m ³	0,118	5	\$ 14.490
Costo total Zanja				\$ 2.703.012

Finalmente, de acuerdo a los datos expuestos anteriormente, para una zanja de infiltración propuesta, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 17. Allí, se observa que el caudal infiltrado por zanja es de 21,01 l/s.

Tabla 17: Caudal infiltrado (Q) por una zanja de 25x2x5 m³. Se indica el costo estimado de una zanja de infiltración, además de, el número de zanjas necesarias para infiltrar el 100, 80, 50, 20 y 10 % del caudal susceptible de 15.236,96 l/s.

Caudal infiltrado (l/s)	Costo	N° de zanjas necesarias para captar el caudal susceptible en un:				
		100%	80%	50%	20%	10%
21,01	\$ 2.703.012	725	580	363	145	73

5.3.3.2 Método 2: pozos secos en la zona no saturada

Los pozos secos en la zona no saturada son, normalmente, de 1 m de diámetro, y a lo más de 60 m de profundidad (Bouwer, 2002). Estos pueden estar o no rellenos con materiales como: arena gruesa o grava fina, bolones, ripios o gravas, procurando obtener una porosidad mayor a 30 %, y evitando los materiales finos. Sin embargo, es conveniente rellenos para evitar un desmoronamiento de las paredes de este (Bouwer, 2002; MINVU, 1996). Se recomienda usar un geotextil de una permeabilidad mayor a 10 veces la del terreno (MINVU, 1996). Condiciones generales que debe cumplir un sitio para la aplicación de pozos son las siguientes: no se debe tener un estrato impermeable a menos de 1 m bajo el fondo del pozo, y debe haber una distancia mínima de 1 m entre el fondo del pozo y el nivel estático (MINVU, 1996). El funcionamiento hidráulico de estas estructuras, es el siguiente: primero, ingresa el agua,

luego, se almacena temporalmente, para finalmente ser evacuada para su infiltración, como se ilustra en la Figura 41 (MINVU, 1996).

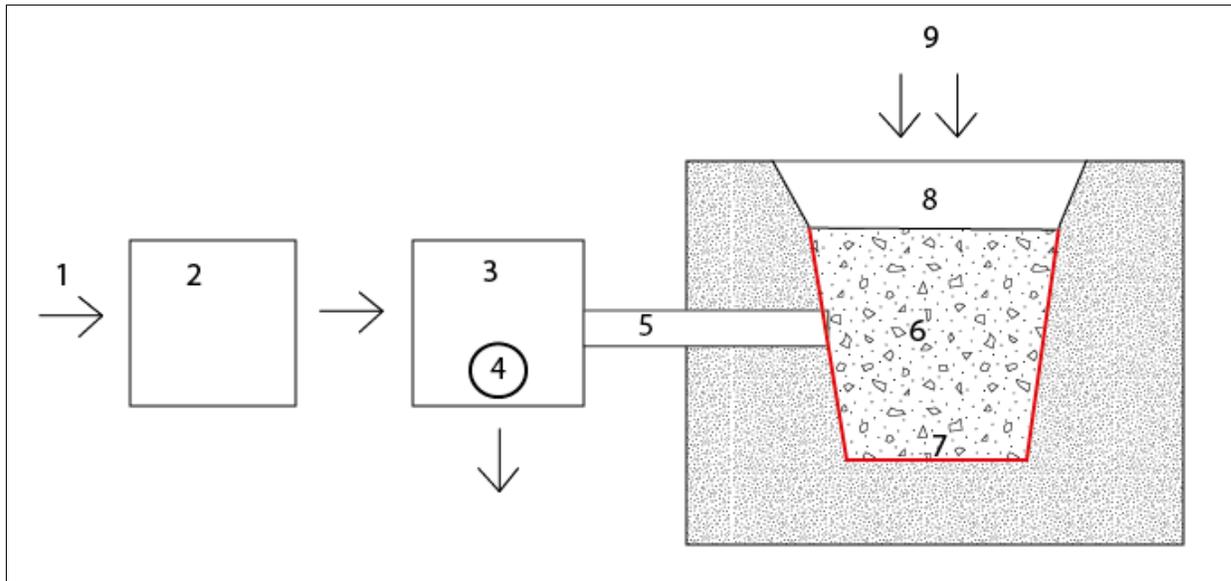


Figura 41: Esquema de los elementos principales de un pozo de infiltración. 1) Alimentación, 2) Decantador (opcional), 3) Cámara de rebalse (opcional), 4) Rebase, 5) Tubería de conexión, 6) Pozo, 7) Geotextil, 8) Cubierta, 9) Alimentación superficial (opcional). Fuente: modificado de MINVU, 1996.

Las siguientes figuras esquematizan algunas disposiciones utilizadas para pozos de infiltración.

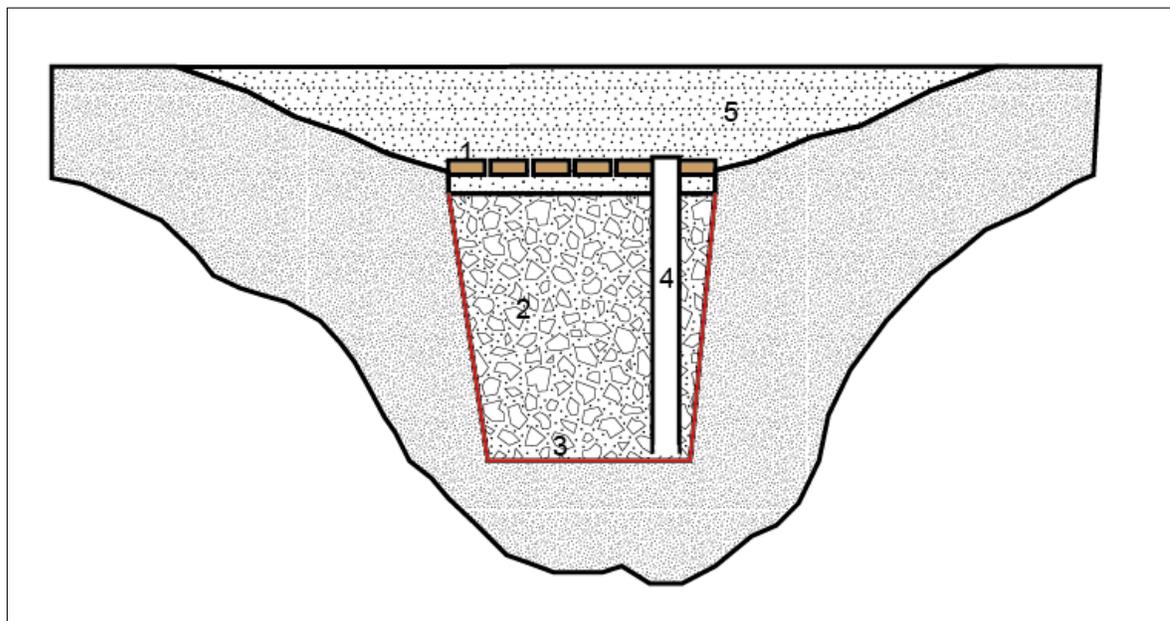


Figura 42: Pozo de infiltración simple alimentado desde la superficie. 1) Cubierta permeable, 2) Relleno, 3) Geotextil (línea roja), 4) Piezómetro, 5) Almacenamiento superficial. Fuente: modificado de MINVU, 1996.

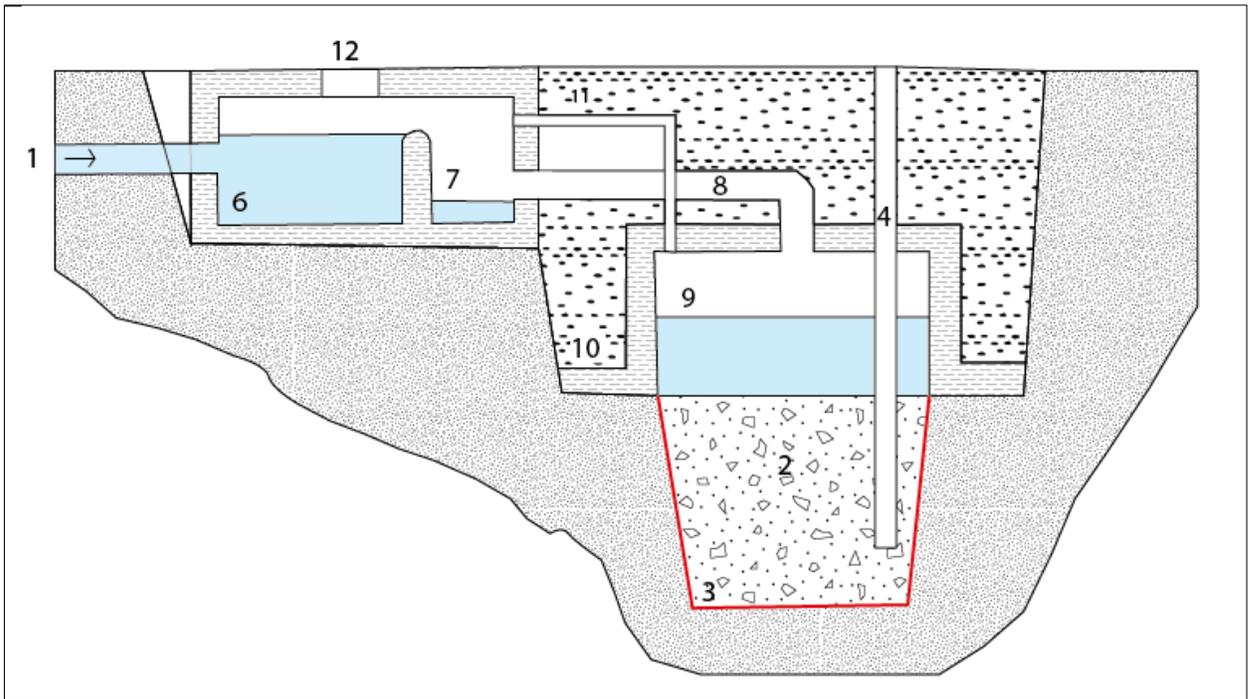


Figura 43: Pozo de infiltración con decantador y volumen parcial sin relleno. 1) Cubierta permeable, 2) Relleno, 3) Geotextil (línea roja), 4) Piezómetro, 5) Almacenamiento superficial 6) Decantador, 7) Cámara rebase, 8) Tubería alimentación, 9) Volumen sin relleno, 10) Antepozo de hormigón armado, 11) Tubo ventilación, 12) Tapa cámara. Fuente: modificado de MINVU, 1996.

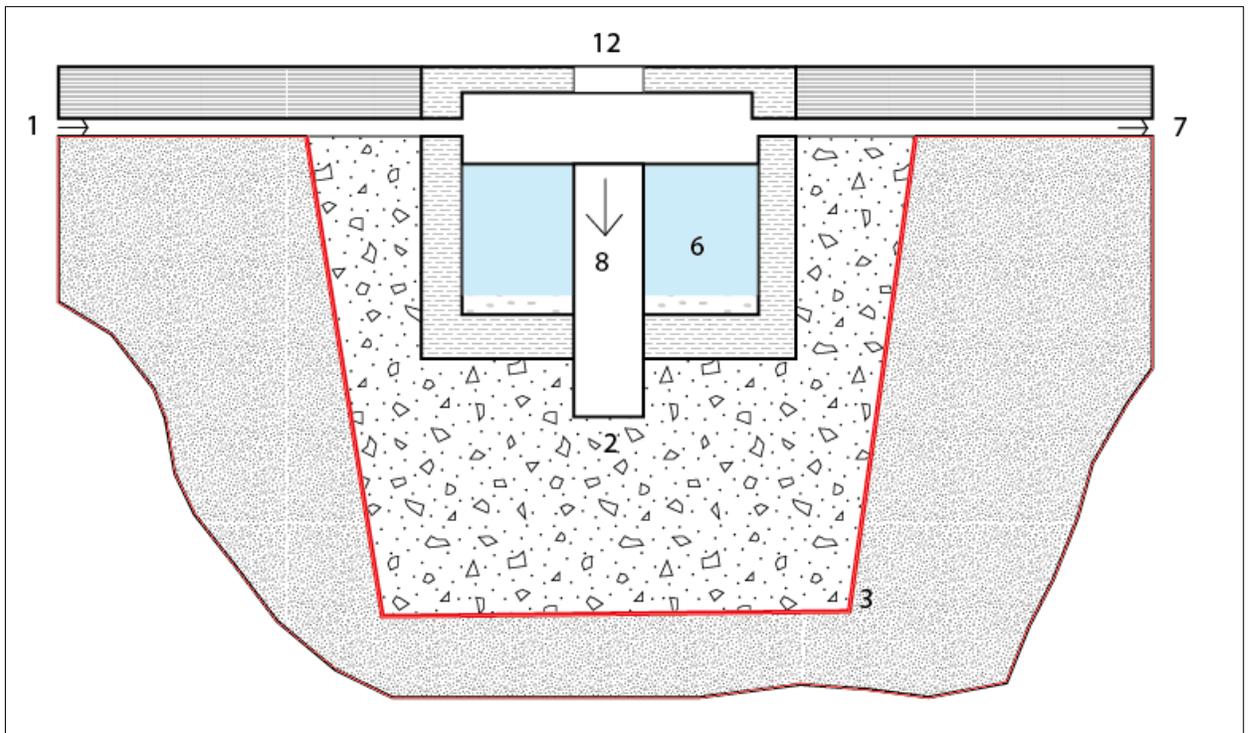


Figura 44: Pozo de infiltración con decantador y rebase sobre el mismo pozo. 1) a 12) mismo que en Figuras 38 y 39. Fuente: modificado de MINVU, 1996.

La expresión que permite estimar el caudal infiltrado por cada pozo seco en la zona no saturada es la siguiente:

Ecuación 7: Fórmula para calcular el caudal infiltrado (Q) en un pozo seco en la zona no saturada. Fuente: MINVU (1996).

$$Q = 0,001 * C_s * f * S$$

En donde,

- C_s , corresponde al factor de seguridad (Azzout *et al.* 1994);
- f , corresponde a la tasa de infiltración en mm/hr;
- S , es la superficie interior del pozo en m^2 (sin considerar el fondo de este, ya que se colmata rápidamente).

Ecuación 8: Superficie filtrante (S) de un pozo en la zona no saturada. Fuente: MINVU, 1996.

$$S = \pi * D * H$$

En donde:

- S : superficie filtrante del pozo (m^2).
- D : diámetro medio del pozo (m).
- H : altura de agua en el interior del pozo (m).

Para el caso de pozos secos en la zona no saturada, se considera un factor de seguridad (C_s), de 0,5, dado para un efluente de buena calidad, la no existencia de dispositivos de tratamiento de aguas, y no existencia de mantención regular (ver Figura 40). Si se implementaran pozos de recarga en la zona no saturada, de 20 m de profundidad y de 2 m de diámetro, el costo de cada pozo de infiltración en la zona no saturada sería el indicado en la Tabla 18.

Tabla 18: Cubicación y presupuesto para pozos de infiltración en la zona no saturada, de 20 m de profundidad y 2 m de diámetro. Valor de la UF considerado al 11/03/2015: \$ 24.559,44. Fuente: Precios de referencia en UF según “Lista Oficial de Precios de Obras de Pavimentación para Cobro por Gastos de Inspección año 1995”, MINVU y el “Boletín de Precios N° 276 de Mayo-Junio de 1996” del SERVIU Metropolitano. MINVU (1996).

Servicio	Unidad	Precio unitario (UF)	Cantidad	Precio total
Excavación en terreno blando, hecha a mano, sin agotamiento ni entibación, incluye el descepe y limpieza del terreno, a profundidad menor de 2 m.	m^3	0,252	62,80	\$ 388.668
Transporte de excedentes de la excavación incluyendo carguío y depósito, a distancia menor a 10 km.	m^3	0,063	62,80	\$ 97.167
Suministro y colocación de una capa de arena sin contenido de arcilla de 10 cm compactada.	m^3	1,081	0,31	\$ 8.336
Suministro y colocación de geotextil.	m^2	0,096	128,74	\$ 303.531
Suministro y colocación de material de filtro granular de grava, tamaño medio 1 cm, colocado en una capa de 20 cm sobre el filtro geotextil.	m^3	0,188	0,63	\$ 2.900
Suministro y colocación a mano de bolones para relleno. Tamaño medio 15 cm, limpio, sin material fino.	m^3	0,294	61,86	\$ 446.644

Tubo PVC, 50 mm para piezómetro.	m	0,130	20,00	\$ 63.855
Costo total Pozo en la zona no saturada				\$ 1.311.101

Finalmente, de acuerdo a los datos expuestos anteriormente, para un pozo en la zona no saturada propuesto, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 19. Allí, se observa que el caudal infiltrado por pozo es de 4,36 l/s.

Tabla 19: Caudal infiltrado (Q) por un pozo en la zona no saturada de 20 m de profundidad y 2 m de diámetro. Se indica el costo estimado de un pozo en la zona no saturada, además de, el número de zanjas necesarias para infiltrar el 100, 80, 50, 20 y 10 % del caudal susceptible de 15.236,96 l/s.

Caudal infiltrado (l/s)	Costo	N° de estructuras necesarias para captar el caudal susceptible en un:				
		100%	80%	50%	20%	10%
4,36	\$ 1.311.101	3.494	2.795	1.747	699	349

5.3.3.3 Método 3: pozos en la zona saturada

Son estructuras profundas que suministran agua al acuífero por gravedad o bajo presión (Bouwer, 2002). El principal problema es que se colmatan con facilidad, reduciendo las tasas de inyección. La minimización de esta problemática está dada por: un apropiado tratamiento y remoción del material suspendido en la fuente de agua; una estabilización química; y un control bacteriano del agua. El tratamiento ácido ayuda en la remoción de precipitados de carbonato de calcio del acuífero (Government of India, 2007).

La expresión que permite estimar el caudal infiltrado por cada pozo en la zona saturada es la siguiente:

Ecuación 9: Fórmula que permite calcular el caudal infiltrado (Q) por un pozo en la zona saturada. Fuente: Método de LeFranc.

$$Q = K * C * H$$

En donde:

- Q: caudal infiltrado por un pozo en la zona saturada (m³/d).
- H: altura de agua por sobre el nivel estático (m).
- K: conductividad hidráulica (m/d).
- C: factor de forma.

El factor de forma C, se determina según la siguiente ecuación:

Ecuación 10: Fórmula para determinar el Factor de forma C.

$$C = \frac{(2 * \pi * L)}{(\ln(2 * \frac{L}{d}))}$$

En donde:

- L: longitud del tramo filtrante (m).
- d: diámetro del pozo (m).

La Figura 45 muestra el diseño propuesto para un pozo de infiltración en la zona saturada. En este diseño se ha considerado dejar un espacio de 5 m (tubería ciega), inmediatamente bajo el nivel estático, debido a posibles bajas del nivel estático, producto al bombeo del pozo bajo obras de mantención. Además, se ha considerado un espacio para la ubicación de la bomba. Finalmente, también se ha considerado un margen de espacio para la trampa de arena del pozo.

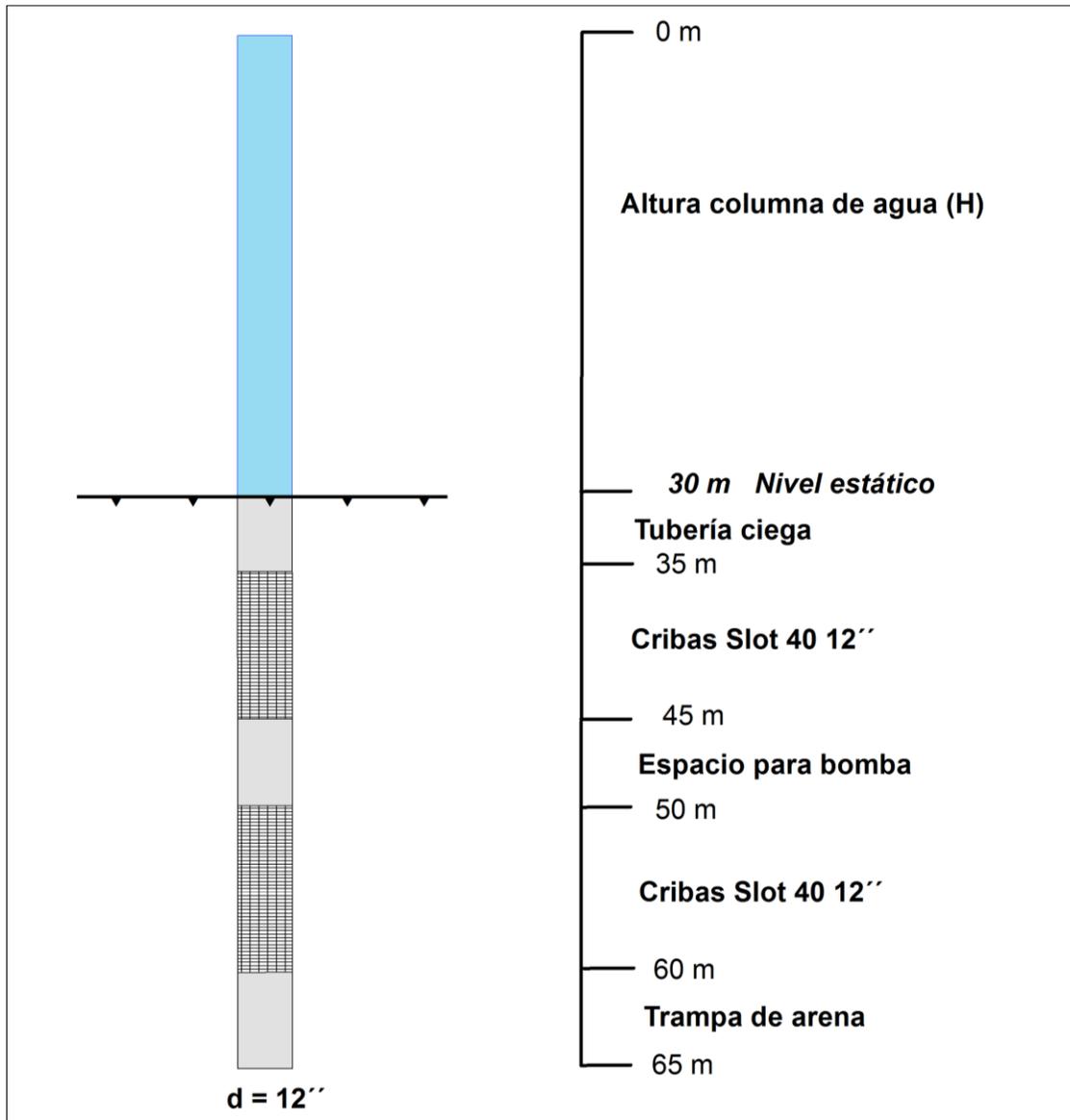


Figura 45: Diseño propuesto de un pozo en la zona saturada y los parámetros que permiten calcular el caudal infiltrado mediante el método de LeFranc. Fuente: elaboración propia.

Si se implementaran pozos de infiltración en la zona saturada de 65 m de profundidad, habilitados con cribas en 20 m, y con un diámetro de 12" (ver Figura 45), el costo por pozo sería el indicado en la Tabla 20.

Tabla 20: Cubicaciones y estimación de costos para la construcción de un pozo de infiltración en la zona saturada, de 65 m de profundidad habilitado con cribas en 20 m. Fuente: modificado de CNR, 2013.

Servicio	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio total
A. Instalación y levante de faenas				
Instalación y levante de faenas	gl	\$ 1.200.000	1	\$ 1.200.000
B. Construcción del sondaje				
Perforación Dmin = 16"	m	\$ 280.000	65	\$ 18.200.000
Entubación cañería acero D =12", e =6,3 mm.	m	\$ 80.000	45	\$ 3.600.000
Cribas acero al carbono, Slot 40, D = 12"	m	\$ 220.000	20	\$ 4.400.000
Suministro y colocación de filtro granular	m	\$ 46.700	65	\$ 3.035.500
Sello y brocal de hormigón	gl	\$ 225.000	1	\$ 225.000
Tapa del pozo según plano del proyecto	gl	\$ 50.000	1	\$ 50.000
C. Obra de captación y filtro, y caseta				
Obra de captación, bomba y obra de arte para tratamiento	gl	\$ 2.000.000	1	\$ 2.000.000
Recinto sólido y seguro de 3x6 m, metálico	gl	\$ 3.000.000	1	\$ 3.000.000
D. Interrupción de faenas				
Interrupción de faenas	hr	\$ 40.000	24	\$ 960.000
E. Plano de construcción e informe final				
Plano de construcción e informe final	gl	\$ 300.000	1	\$ 300.000
Subtotal por pozo				\$ 36.970.500
Gastos generales, imprevistos y utilidades (45%)				\$ 16.636.725
Total Neto				\$ 53.607.225
I.V.A. (19%)				\$ 10.185.373
Total				\$ 63.792.598

Finalmente, de acuerdo a los datos expuestos anteriormente, para un pozo de infiltración en la zona saturada, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 21. Allí, se observa que el caudal infiltrado por pozo es de 21,4 l/s.

Tabla 21: Caudal infiltrado (Q) por un pozo en la zona saturada de 65 m de profundidad y 12" de diámetro, habilitado con cribas en 20 m. Se indica el costo estimado de un pozo en la zona saturada, además de, el número de pozos necesarios para infiltrar el 100, 80, 50, 20 y 10 % del caudal susceptible de 15.236,96 l/s.

Caudal infiltrado (l/s)	Costo	Nº de estructuras necesarias para captar el caudal susceptible en un:				
		100%	80%	50%	20%	10%
21,40	\$ 63.792.598	712	570	356	142	71

5.3.4 Alternativas de recarga

Para la evaluación económica de las cuatro alternativas de recarga siguientes, se han considerado, en general, los siguientes datos (Tabla 22).

Tabla 22: Datos generales de la evaluación económica. Fuente: elaboración propia.

Caudal a infiltrar	761,85 l/s (5% del caudal susceptible)
Tiempo de infiltración	4 meses
Valor venta de agua	\$ 500/m ³ .
Porcentaje de agua vendida	50 % del volumen infiltrado total
Tasa de interés anual	6 %
Costos anuales de mantención y operación	10 % de la inversión.

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación económica, preliminar, de una implementación supuesta de las cuatro siguientes alternativas de recarga. Cabe mencionar, que la configuración espacial de estas alternativas es solo esquemática.

5.3.4.1 Alternativa 1: zanjas de infiltración

En la implementación de un proyecto que pretenda infiltrar un caudal de 761,85 l/s, correspondiente al 5% del caudal susceptible a infiltrar, podría resultar conveniente instalar un total de 36 zanjas, como se muestra en la Figura 46. Este proyecto contemplaría la utilización de una superficie del orden de 60.000 m².

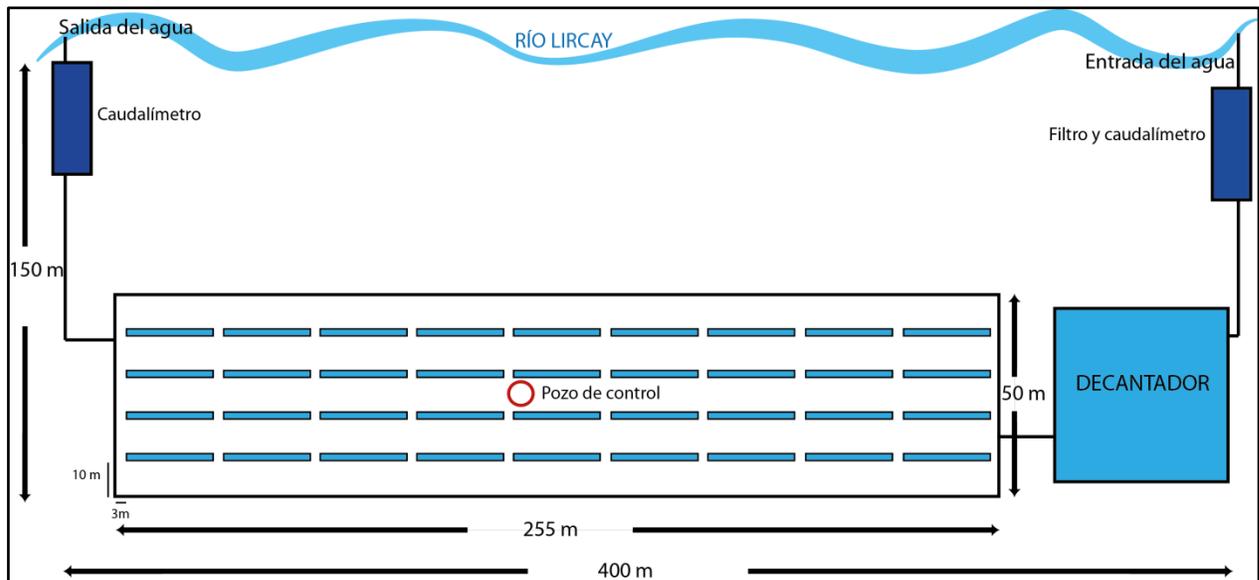


Figura 46: Diseño esquemático de 36 zanjas de infiltración en un área de 60.000 m². Fuente: elaboración propia.

La realización de un proyecto de tales características, llevaría, probablemente, a: costos de inversión, costos anuales estimados (10% de la inversión) de mantención y operación, e ingresos anuales, como los indicados en la Tabla 23. La inversión contempla los costos de 36 zanjas, más el costo del terreno ocupado. Los ingresos anuales corresponden a lo recaudado, en el supuesto de

que se vende solo el 50 % de lo infiltrado, y además, de que el precio del agua sea de \$500/m³, valor inferior a lo cobrado por las actuales empresas de agua potable en el Maule.

Tabla 23: Valores económicos estimados y calculados involucrados en la implementación de un proyecto de recarga artificial que infiltra aproximadamente 781,85 l/s, mediante 36 zanjas de infiltración. Fuente: elaboración propia.

Nº de Zanjas	Área utilizada (m ²)	Inversión	Costo estimado anual	Caudal infiltrado total (l/s)	Volumen infiltrado total (m ³)	Ingresos anuales
36	60.000	\$ 157.308.431	\$ 15.730.843	756,25	7.840.800	\$ 1.960.200.000

Debido a que la realización de un proyecto de recarga artificial conlleva altos costos de inversión, se ha realizado una estimación del Valor Actual Neto (V.A.N.) de un tentativo proyecto de recarga mediante 36 zanjas de infiltración, cuyo resultado se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24: Valor Actual Neto (V.A.N.) estimado en un proyecto de recarga con 36 zanjas de infiltración. Fuente: elaboración propia.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		\$ 1.960.200.000	\$ 1.960.200.000	\$ 1.960.200.000	\$ 1.960.200.000	\$ 1.960.200.000
Costos		\$ 15.730.843	\$ 15.730.843	\$ 15.730.843	\$ 15.730.843	\$ 15.730.843
Inversión	\$ 157.308.431					
Total	\$ 157.308.431	\$ 1.944.469.157	\$ 1.944.469.157	\$ 1.944.469.157	\$ 1.944.469.157	\$ 1.944.469.157
VAN (6%)	\$ 8.033.503.028					

5.3.4.2 Alternativa 2: pozos secos en la zona no saturada

En la implementación de un proyecto que pretenda infiltrar un caudal de 761,85 l/s, correspondiente al 5% del caudal susceptible a infiltrar, podría resultar conveniente instalar un total de 174 pozos secos en la zona no saturada, como se muestra en la Figura 47.

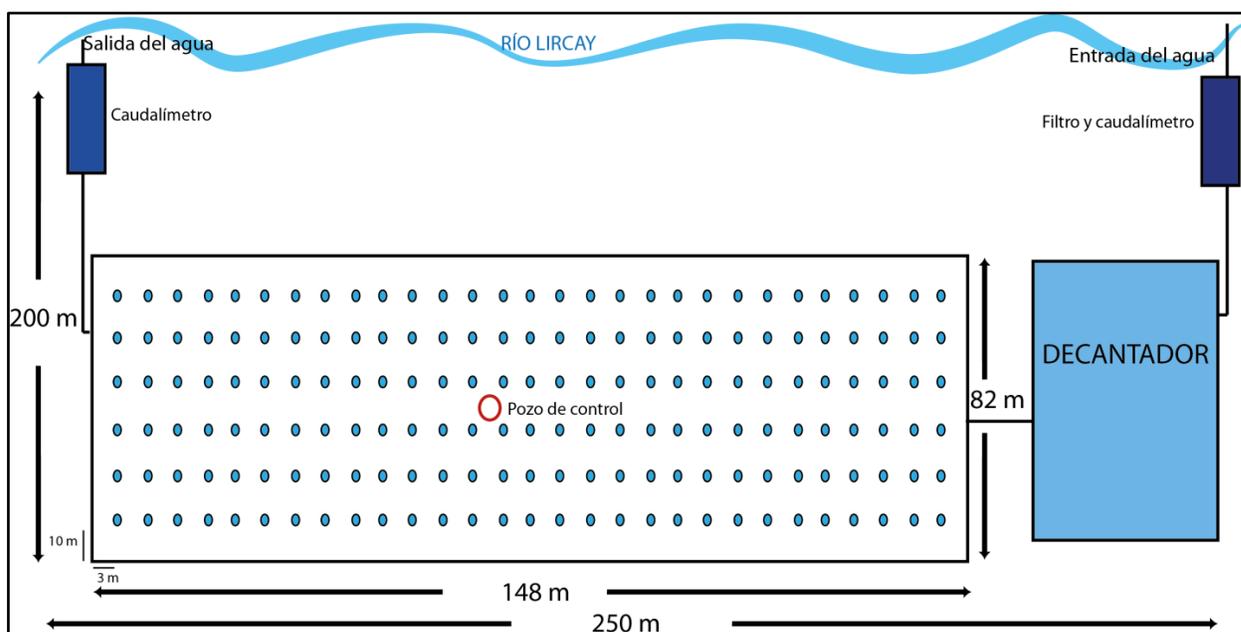


Figura 47: Diseño esquemático de 174 pozos de infiltración en la zona no saturada en un área de 50.000 m². Fuente: elaboración propia.

La realización de un proyecto de tales características, llevaría, probablemente, a: costos de inversión, costos anuales estimados (10% de la inversión) de mantenimiento y operación, e ingresos anuales, como los indicados en la Tabla 25.

Tabla 25: Valores económicos estimados y calculados involucrados en la implementación de un proyecto de recarga artificial mediante 174 pozos de infiltración en la zona no saturada. Fuente: elaboración propia.

Nº de Pozos en ZNS	Área utilizada (m ²)	Inversión	Costo estimado anual	Caudal infiltrado total (l/s)	Volumen infiltrado total (m ³)	Ingresos anuales
174	50.000	\$ 278.131.495	\$ 27.813.150	758,83	7.867.584	\$ 1.966.896.000

La inversión contempla los costos de 174 pozos secos, más el costo del terreno ocupado. Los ingresos anuales corresponden a lo recaudado, en el supuesto de que se vende solo el 50 % de lo infiltrado, y además, de que el precio del agua sea de \$500/m³, valor inferior a lo cobrado por las actuales empresas de agua potable en el Maule.

Tabla 26: Valor Actual Neto (V.A.N.) estimado en un proyecto de recarga con 174 pozos de infiltración en la zona no saturada. Fuente: elaboración propia.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		\$ 1.966.896.000	\$ 1.966.896.000	\$ 1.966.896.000	\$ 1.966.896.000	\$ 1.966.896.000
Costos		\$ 27.813.150	\$ 27.813.150	\$ 27.813.150	\$ 27.813.150	\$ 27.813.150
Inversión	\$ 278.131.495					
Total	\$ 278.131.495	\$ 1.939.082.850	\$ 1.939.082.850	\$ 1.939.082.850	\$ 1.939.082.850	\$ 1.939.082.850
VAN (6%)	\$ 7.889.990.881					

Debido a que la realización de un proyecto de recarga artificial conlleva altos costos de inversión, se ha realizado una estimación del Valor Actual Neto (V.A.N.) de un tentativo proyecto de recarga mediante 174 pozos secos de infiltración en la zona no saturada, cuyo resultado se muestra en la Tabla 26.

5.3.4.3 Alternativa 3: pozos en la zona saturada

En la implementación de un proyecto que pretenda infiltrar un caudal de 761,85 l/s, correspondiente al 5% del caudal susceptible a infiltrar, podría resultar conveniente instalar un total de 36 pozos de infiltración en la zona saturada, como se muestra en la Figura 48. Este proyecto contemplaría la utilización de una superficie aproximada de 22.500 m².

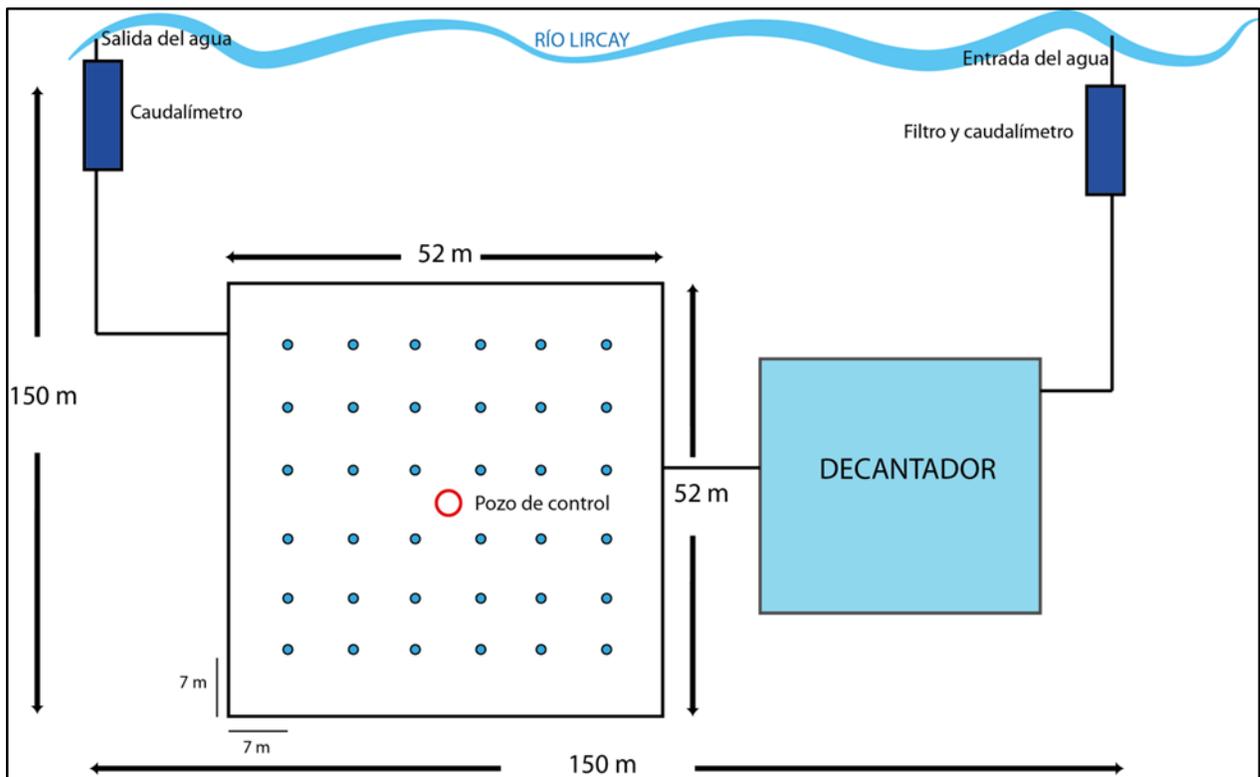


Figura 48: Diseño esquemático de 36 pozos de infiltración en la zona saturada, en una superficie de 22.500 m². Fuente: elaboración propia.

La realización de un proyecto de tales características, llevaría, probablemente, a: costos de inversión, costos anuales estimados (10% de la inversión) de mantenimiento y operación, e ingresos anuales, como los indicados en la Tabla 27.

Tabla 27: Valores económicos estimados y calculados involucrados en la implementación de un proyecto de recarga artificial mediante 36 pozos de infiltración en la zona saturada. Fuente: elaboración propia.

Nº de Pozos en ZS	Área utilizada (m ²)	Inversión	Costo estimado anual	Caudal infiltrado total (l/s)	Volumen infiltrado total (m ³)	Ingresos anuales
36	22.500	\$ 2.319.033.519	\$ 231.903.352	769,79	7.981.154,41	\$ 1.995.288.602

La inversión contempla los costos de 36 pozos de infiltración en la zona saturada, más el costo del terreno ocupado. Los ingresos anuales involucran lo recaudado en el supuesto de que se vende solo el 50 % de lo infiltrado, y además, de que el precio del agua correspondería solo a \$500/m³, valor inferior a lo cobrado por las actuales empresas de agua potable en el Maule.

Debido a que la realización de un proyecto de recarga artificial conlleva altos costos de inversión, se ha realizado una estimación del Valor Actual Neto (V.A.N.) de un tentativo proyecto de recarga mediante 36 pozos de infiltración en la zona saturada, cuyo resultado se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28: Valor Actual Neto (V.A.N.) estimado en un proyecto de recarga con 36 pozos de infiltración en la zona saturada. Fuente: elaboración propia.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		\$ 1.995.288.602	\$ 1.995.288.602	\$ 1.995.288.602	\$ 1.995.288.602	\$ 1.995.288.602
Costos		\$ 231.903.352	\$ 231.903.352	\$ 231.903.352	\$ 231.903.352	\$ 231.903.352
Inversión	\$ 2.319.033.519					
Total	\$ 2.319.033.519	\$ 1.763.385.250	\$ 1.763.385.250	\$ 1.763.385.250	\$ 1.763.385.250	\$ 1.763.385.250
VAN (6%)	\$ 5.108.986.650					

5.3.4.4 Alternativa 4: zanjas y pozos en la zona saturada

En la implementación de un proyecto que pretenda infiltrar un caudal de 761,85 l/s, correspondiente al 5 % del caudal susceptible a infiltrar, podría resultar conveniente instalar un total de 12 pozos de infiltración en la zona saturada más 24 zanjas de infiltración (Figura 49). Este proyecto requeriría de una superficie estimada de 43.200 m².

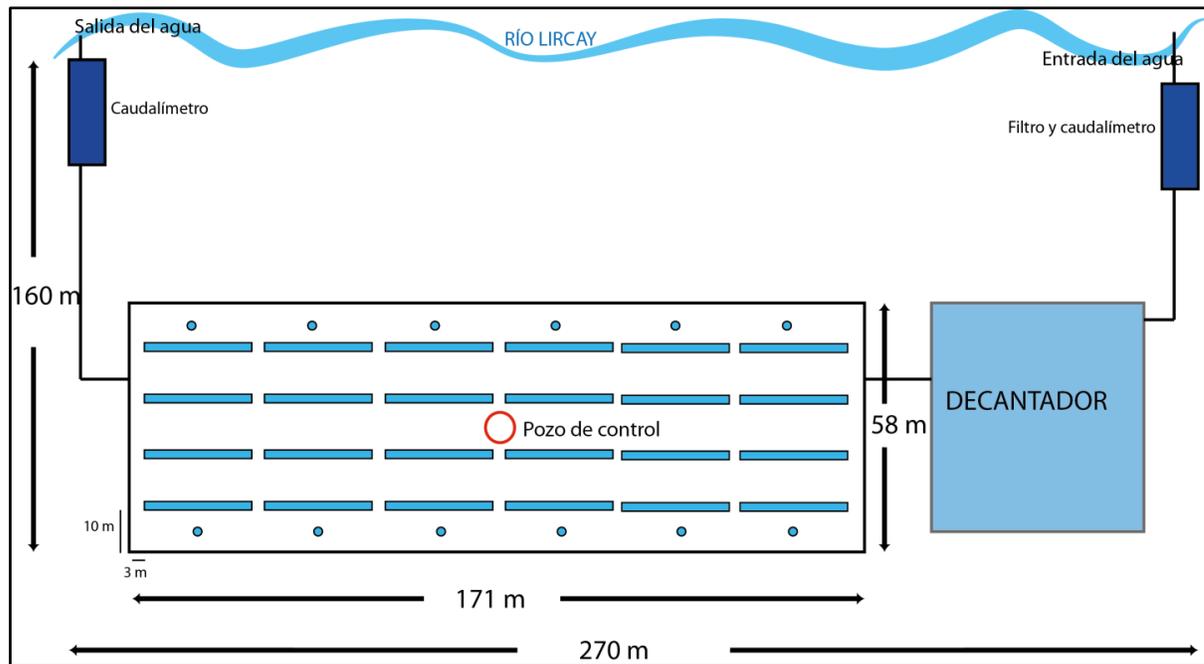


Figura 49: Diseño esquemático de 24 zanjas y 12 pozos de infiltración en la zona saturada, en un área aproximada de 43.200 m². Fuente: elaboración propia.

La realización de un proyecto de tales características, llevaría, probablemente, a: costos de inversión, costos anuales estimados (10% de la inversión) de mantención y operación, e ingresos anuales, como los indicados en la Tabla 29. La inversión contempla los costos de 24 zanjas y 12 pozos de infiltración en la zona saturada, más el costo del terreno ocupado. Los ingresos anuales involucran lo recaudado en el supuesto de que se vende solo el 50 % de lo infiltrado, y además, de que el precio del agua correspondería solo a \$500/m³, valor inferior a lo cobrado por las actuales empresas de agua potable en el Maule.

Tabla 29: Valores económicos estimados y calculados involucrados en la implementación de un proyecto de recarga artificial mediante 24 zanjas y 12 pozos de infiltración en la zona saturada. Fuente: elaboración propia.

N° de Zanjas	N° de Pozos	Área utilizada (m ²)	Inversión	Costo estimado anual	Caudal infiltrado total (l/s)	Volumen infiltrado total (m ³)	Ingresos anuales
24	12	43.200	\$ 873.583.460	\$ 87.358.346	760,97	7.889.702,4	\$ 1.972.425.600

Se ha realizado una estimación del Valor Actual Neto (V.A.N.) de un tentativo proyecto de recarga mediante 12 pozos y 24 zanjas, cuyo resultado se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30: Valor Actual Neto (V.A.N.) estimado en un proyecto de recarga con 24 zanjas y 12 pozos de infiltración en la zona saturada. Fuente: elaboración propia.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		\$ 1.972.425.600	\$ 1.972.425.600	\$ 1.972.425.600	\$ 1.972.425.600	\$ 1.972.425.600
Costos		\$ 93.816.927	\$ 93.816.927	\$ 93.816.927	\$ 93.816.927	\$ 93.816.927
Inversión	\$ 873.583.460					
Total	\$ 873.583.460	\$ 1.878.608.673	\$ 1.878.608.673	\$ 1.878.608.673	\$ 1.878.608.673	\$ 1.878.608.673
VAN (6%)	\$ 7.039.799.680					

5.3.5 Implicancias en la recarga

Al recargar un volumen total medio anual de 7.850.000 m³, correspondiente a cerca del 5 % del caudal susceptible, y considerando un área de recarga de 6 km² (Figura 50), la subida del nivel freático, resultante del proceso de recarga, se ha estimado según la siguiente expresión:

$$\Delta H = \frac{\text{Volumen saturado}}{\text{Área de recarga}}$$

En donde:

- ΔH: subida del nivel freático (m).
- Volumen saturado: volumen de agua y sedimento (m³).
- Área de recarga: área considerada para almacenamiento (m²).

A su vez, el volumen saturado se obtiene de la siguiente expresión:

$$\text{Volumen saturado} = \frac{\text{volumen de agua total}}{S}$$

En donde:

- Volumen de agua total: corresponde al volumen de agua considerado a infiltrar (m^3).
- S: coeficiente de almacenamiento.

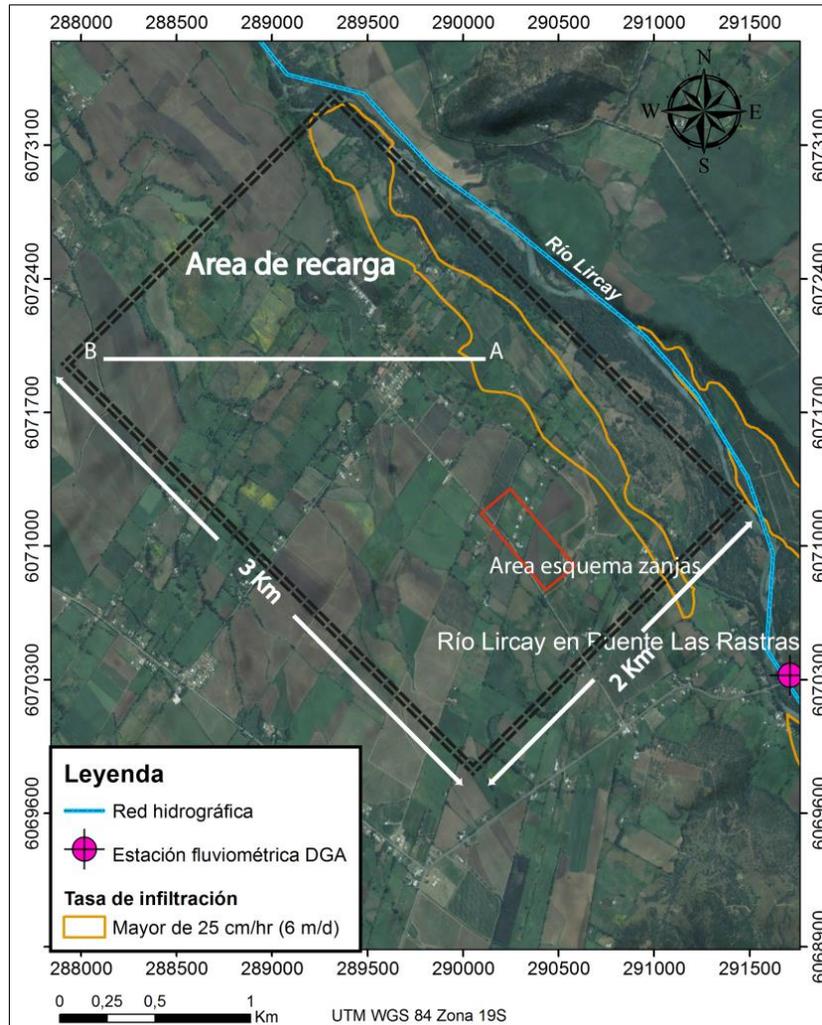


Figura 50: Área de recarga estimada de 6 km^2 (doble línea punteada negra). Se indica, en rojo, el área de esquema de zanjas, correspondiente a una superficie estimada de 60.000 m^2 , perteneciente a la alternativa 1. El trazo A-B es de aproximadamente 2.000 m , y se ha dibujado con el fin de estimar el tiempo que tardaría el flujo subterráneo en desplazarse desde A hasta B.

Como el volumen de agua considerado para la recarga es de $7.850.000 \text{ m}^3$, el volumen saturado, por lo tanto, es de $78.500.000 \text{ m}^3$. Por otro lado, como el área de recarga estimada es de 6 km^2 , la subida del nivel freático, finalmente, correspondería a $13,08 \text{ m}$. El área de esquema de zanjas, indicado en la Figura 50, corresponde a la superficie probablemente necesaria para el emplazamiento de 36 zanjas (alternativa 1) (ver Capítulo 5.3.5). Dicha alternativa es la que requeriría, probablemente, la mayor superficie. La ubicación espacial de las zanjas, así como

también de las otras tres alternativas, como se ha mencionado anteriormente, es solo esquemática, y se ha trazado para estimar la superficie necesaria de un posible proyecto. Sin perjuicio de lo anterior, se propone, como una alternativa conveniente, distribuir el emplazamiento de las estructuras de recarga escogidas a lo largo del área ubicada en el flanco sur del río Lircay, la cual encierra las mayores tasas de infiltración (> 6 m/d) del subsector SS4.2.

Es importante, finalmente, conocer la velocidad con que el agua subterránea se desplaza en sub-superficie, debido a que se pretende utilizar la capacidad de transmisión del acuífero, y no una distribución mediante cañerías.

De acuerdo a la Ley de Darcy, la velocidad del flujo subterráneo se define como:

$$v = K * i$$

En donde:

- v: velocidad de Darcy (m/d).
- K: es la conductividad hidráulica (m/d).
- i: gradiente hidráulico (adimensional).

Por otro lado, la velocidad real del flujo subterráneo está dada por:

$$velocidad\ real = \frac{velocidad\ Darcy}{porosidad\ eficaz}$$

Para una conductividad hidráulica de 6 m/d, un gradiente hidráulico de 10% (que podría generarse a consecuencia de la recarga), una porosidad eficaz de 26 % (para arenas gruesas (Custudio y Llamas, 1983)), la velocidad real del flujo subterráneo sería de 2,3 m/d. Finalmente, el tiempo que tardaría el flujo en recorrer, aproximadamente, 2 km, desde A hasta B (ver Figura 50), sería de aproximadamente 2 años. Lo anterior, es un factor importante a considerar, ya que permite determinar los alcances del proyecto.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la cuenca del Maule, existen al menos ocho sectores favorables a la recarga, considerando una profundidad mínima de nivel estático de 30 m. De estos sectores, existe uno, en particular, denominado sector S4, que, debido a su extensión y profundidad del nivel estático, posee las características más atractivas, para efectuar proyectos de recarga artificial. Por otro lado, las distintas permeabilidades asignadas a las unidades hidrogeológicas del sector S4 permiten identificar tres subsectores, de los cuales solo uno, el SS4.2, posee una fuente cercana de agua, el río Lircay, que además dispone de mediciones de caudales.

Para el subsector SS4.2 se concluye que todas las alternativas propuestas presentarían un VAN positivo, lo que convertiría todas las alternativas, a modo preliminar, en proyectos viables. Cabe mencionar, sin embargo, que la evaluación económica realizada en este estudio, no ha considerado factores como depreciaciones, impuestos, costos de inversión de decantadores, filtros, pozos de observación, etc. La distribución del agua no constituiría un gasto para el proyecto, ya que se utilizaría la capacidad de transmisión del acuífero. Por otra parte, la extracción del recurso desde el acuífero sería responsabilidad de los consumidores.

La elección de la mejor alternativa de recarga, para el subsector SS4.2, estaría sujeta a la disponibilidad real del terreno, a un mejor conocimiento de la estratigrafía del sector, y a los tiempos de puesta en marcha del proyecto. Sin embargo, la mejor alternativa parece ser la utilización de pozos de infiltración en la zona saturada, ya que poseen un alto caudal de recarga (21,4 l/s), y una posibilidad factible de mantención mediante bombeo. Las zanjas, por otra parte, poseen un alto caudal de recarga también (21,01 l/s), pero ocupan una superficie considerable en comparación a los pozos de recarga directa. Además, debido a que las zanjas requieren que en la zona vadosa no existan capas impermeables que obstruyan el flujo hacia el acuífero, su implementación podría, eventualmente, verse afectada por los contenidos de arcilla observados en pozos del sector. Los pozos secos en la zona vadosa son las estructuras que presentarían las mayores desventajas, ya que poseen un bajo caudal de recarga (4,36 l/s) y además son difíciles de mantener.

Antes de ejecutar cualquier proyecto, se recomienda estudiar, con mayor detalle los antecedentes históricos y, la correlación entre los niveles estáticos y las precipitaciones, para proyectar posibles variaciones de los niveles estáticos a consecuencia del cambio climático, para mediados de siglo. Con los cálculos realizados, se ha previsto una subida del nivel estático de 13,08 m asociado a un volumen de recarga anual de 7.850.000 m³ en un área de recarga de 6 km². El nivel freático pasaría así a tener una profundidad de 16,92 m.

Se recomienda, para la obtención de cálculos más certeros, realizar mediciones en terreno de las reales tasas de infiltración del suelo, para la profundidad a la que se realizaría la recarga. Además, se estima conveniente la necesidad de realizar un estudio más detallado de la estratigrafía de la zona vadosa, realizando perfiles geofísicos TEM para conocer con mayor exactitud la profundidad del nivel freático y la estratigrafía. Por otro lado, se recomienda realizar mediciones de la calidad del agua que se infiltraría al acuífero, debido a las exigencias legales al respecto. De los análisis preliminares obtenidos de la calidad de aguas, en este trabajo, se puede observar que existen elementos que superan la norma establecida, como el hierro, boro y

molibdeno, por lo que se recomienda tomar medidas para su control y tratamiento. Adicionalmente, en el caso de efectuar proyectos de recarga, se recomienda crear una red de monitoreo que controle el comportamiento del acuífero (niveles freáticos y calidad), instalando pozos de observación aguas abajo, con el fin de prevenir inundaciones no deseadas.

También se recomienda que previamente a efectuar proyectos de recarga, se implementen proyectos piloto, que evalúen el real comportamiento hidrogeológico del sector escogido. Finalmente, se sugiere que la planificación y ejecución de proyectos de recarga, dentro de la cuenca del Maule, se incorporen a la gestión de los recursos hídricos a nivel nacional, debido a las inminentes consecuencias que el cambio climático global depara. Ante esto, cabe mencionar que la inviabilidad económica de un proyecto de recarga, no debiese significar un impedimento para la realización de dichas iniciativas, ya que el recurso hídrico constituye un bien imprescindible para la vida, y del cual, por lo tanto, el Estado debiera, en última instancia, hacerse cargo.

BIBLIOGRAFÍA

- ABEDINI, M. J., NASSERI, M., y ANSARI, A. 2008. Cluster-based ordinary kriging of piezometric head in West Texas/New Mexico-Testing of hypothesis. *Journal of Hydrology*, 351(3-4), 360-367.
- ACREMAN, M. 2000. Hidrología de los humedales. Medwet nº 10. Conservación de humedales mediterráneos. Tour du Valat, Arlés, Francia.
- AHMADI, S., y SEDGHAMIZ, A. 2007. Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129(1), 277-294.
- ALBERS, C. 2012. Coberturas SIG para la enseñanza de la Geografía en Chile [en línea] Universidad de La Frontera, Temuco <www.rulamahue.cl/mapoteca> [consulta: 04 agosto 2014]
- ALEXSON, J. 2013. Artificial groundwater recharge – is it possible in Mozambique? *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 369, 22 pp., 15 hp (15 ECTS credits).
- ARDILES, M. 2013. Recarga artificial de acuíferos en el valle del Aconcagua. [Diapositiva]. DOH, Dirección de Obras Hidráulicas.
- AZZOUT, Y., S. BARRAUD, E. ALFAKIH Y F. N. CRES. 1994 *Techniques Alternatives en Assainissement Pluvial. Technique et Documentation*, Lavoisier, París.
- BOUWER, H. 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hidrogeology Journal*, volume 10, nº2, abril 2002.
- CABRERA, G. 2013. Aspectos generales de la recarga artificial de acuíferos en Chile. Tercera Jornada Técnica 2013. Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (ALHSUD). [Diapositiva] Santiago, Chile.
- CECH, T. V. 2003: *Principles of water resources: history, development, management, and policy*. Wiley. XIV, 446 s., [420] s. med var. pag. pp.
- CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). 1994. Ingreso cartografía y base datos de zonas hidrogeológicas homogéneas (ZHH) de las regiones IV, RM-VII y IX.
- CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). 2012. Actualización cartográfica de suelos en la VII Región. Escala 1:100.000.
- CHILE. Ministerio de justicia. 1981. Decreto con Fuerza de Ley 1122: Código de Aguas, 29 de agosto de 1981. 71p.
- CHILE. Ministerio del Medio Ambiente. 2012. Decreto N°14: Reglamento para la Determinación del Caudal Ecológico Mínimo. 22 mayo 2012. 5p.

- CHILE. Ministerio Secretaria General de la Presidencia. 2003. Decreto 46: Establece Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas. 17 de enero del 2003. 21p.
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (CEPAL). 2009. La Economía del Cambio Climático en Chile. Santiago.
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (CEPAL). 2012. La Economía del Cambio Climático en Chile. Documento de proyecto. Santiago.
- COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA (CONICYT – CHILE) [sin año]. El sector frutícola en Chile Capacidades de investigación y áreas de desarrollo científico-tecnológico.
- COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO (CNR). 2013. Estudio diagnóstico de zonas potenciales de recarga de acuíferos en las regiones de Arica y Parinacota a la región del Maule. Realizado por GCF Ingenieros Ltda.
- COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA). 2004. Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas. Gobierno de Chile. Chile. [En línea]. <http://www.bcn.cl/carpeta_temas/temas_portada.2005-1227.4449440028/GuiaNormaPract.pdf> [Consulta: Marzo, 2012].
- CONAMA, 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica.
- CUSTODIO, E y LLAMAS, M. R. 1983. Hidrogeología subterránea. Barcelona. Ed Omega. 2 vols: 1-2450.
- DASH, J., SARANGI, A., y SINGH, D. 2010. Spatial variability of groundwater depth and quality parameters in the national capital territory of Delhi. *Environmental Management*, 45(3), 640–650.
- DAVIS, S. N. y DE WIEST, R. 1971. Hidrogeología. Ediciones Ariel, 583 p. Barcelona.
- DESBARATS, A. J., LOGAN, C. E., HINTON, M. J., y SHARPE, D. R. 2002. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. *Journal of Hydrology*, 255(1–4), 25–38.
- DÍAZ-MARTA, M. 1989. Esquema histórico de la ingeniería y la gestión del agua en España. *Revista de OP* n° 13, España y el Agua I. Otoño 1989 pg.8-23.
- DILLON, P., 2005. Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal* 13, 313 – 316.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 1988. Balance Hídrico de Chile.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 1992. Análisis estadístico de caudales en los ríos de Chile.

- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 1997. Modelo de simulación hidrológico operacional cuenca del río Maule, VII Región. Volumen N°1. Informe Final. Realizado por CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda. Santiago.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2004a. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Maule. Realizado por CADE-IDEPE Consultores en Ingeniería.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2004b. Manual para la aplicación del concepto de vulnerabilidad de acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a aguas subterráneas. Decreto Supremo N° 46 de 2002. Realizado por el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2008a. Plan Director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del río Maule. Fase II actualización del modelo de operación del sistema y formulación del plan. Realizado por Luis Arrau del Canto, Consultores en Ingeniería Hidráulica y de Riego.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2008b. Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos. Santiago. 417p.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2010. Levantamiento de información hidrogeológica para modelación cuenca del río Maule. Santiago. Realizado por GCF Ingenieros Limitada Consultores en Ingeniería.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2011. Modelación Hidrogeológica Cuenca río Maule. Realizado por División de Estudios y Planificación.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2014. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea [en línea] <<http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>> [consulta: 01 septiembre 2014]
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA). 2015. Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA, VII Región del Maule [en línea] <http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspxlt.aspx> [consulta: 01 junio 2015]
- DRAKE, R.E.; CHARRIER, R.; THIELE, R.; MUNIZAGA, F.; PADILLA, H.; VERGARA, M. 1982. Distribución y edades K/Ar de volcánicas post-Neocomianas en la Cordillera Principal entre 32° y 36° Lat. S: Implicancias estratigráficas y tectónicas para el Meso-Cenozoico de Chile Central. In Congreso Geológico Chileno, No. 3, Actas, p.D41-D78, Concepción.
- ESCOBAR et al. 1977. Avance Geológico de las Hojas Rancagua-Curicó, Talca-Linares y Concepción-Chillán (inédito). Instituto de Investigaciones Geológicas, 20 p. Santiago, Chile.
- ESPINOZA, M. 2005. Vulnerabilidad de los acuíferos en los ríos Limarí y Maule mediante las metodologías GOD y BGR. Memoria para optar al Título de Geólogo. Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 183p.

- FERNÁNDEZ, A., GARCÍA M. y VILLARROYA F. 2005. Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo.
- FEWSTER, E. 2010. Resilient techniques to improve water availability, with a focus on drought-prone areas.
- FRYCKLUND, C. 1992: Artificial groundwater recharge: state of the art. VA-Forsk Report No 1992-04. 55 pp.
- GANNA, P. y HERVÉ, F. 1983. Geología del Basamento Cristalino en la Cordillera de la Costa entre los ríos Mataquito y Maule, VII Región. Revista Geológica de Chile, No. 19-20, p.37-56.
- GARCÍA, T. 2012. Propuesta de índices de calidad de agua para ecosistemas hídricos de Chile. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 157p.
- GOVERNMENT OF INDIA. 2007. Manual in artificial recharge of ground water. Ministry of water resources.
- HAUSER, A. 1986. Rodados multicolores; su distribución y características en el sur de Chile. Revista Geológica de Chile, No. 27, p. 69-83.
- HAUSER, A. 1995. Carta Hidrogeológica de Chile, Hoja Talca. Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.
- INFRAESTRUCTURA DE DATOS GEOESPACIALES (IDE-CHILE) [en línea] <www.geoportal.cl> [consulta: 15 junio 2015]
- INN, Instituto Nacional de Normalización. 1987. Norma Chilena Oficial NCh1333 Of78, Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.15p.
- INN, Instituto Nacional de Normalización. 2005. Norma Chilena Oficial NCh409/1. Of2005, Requisitos de calidad del agua potable.12p.
- JIMÉNEZ, G. 2013. Caracterización de la cuenca del río San José en Arica para la evaluación a nivel de perfil de un sistema de recarga artificial de acuíferos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- KARZULOVIC, J.; HAUSER, A. y VERGARA, M. 1979. Edades K/Ar en rocas volcánicas e intrusivas del área de los Proyectos Hidroeléctricos Colbún-Machicura-Melado, ENDESA, VII Región. In Congreso Geológico Chileno, No. 2, Actas, p. 1127-1135. Arica.
- KHOLGHI, M., y HOSSEINI, S. 2009. Comparison of groundwater level estimation using neuro-fuzzy and ordinary kriging. Environmental Modeling and Assessment, 14(6), 729–737.
- KLOHN, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, provincias de Santiago – O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile, Boletín No. 8, 95p. Santiago.

- KUMAR, V. y REMADEVI. 2006. Kriging of Groundwater Levels – A Case Study. [en línea] Journal of Spatial Hydrology Vol.6, No.1 Spring 2006 <<http://www.spatialhydrology.net/index.php/JOSH/article/view/48/47>> [consulta: 12 enero 2015]
- MARTÍN-ALONSO, J. 2003. Combined Use of Surface Water and Groundwater for Drinking Water Production in the Barcelona Metropolitan Area. Riverbank filtration: the future is now! En: PROCEEDINGS OF the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO (MINVU). 1996. Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos, guía de diseño. Santiago. Realizado por DICTUC Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE (MMA). 2011. Segunda comunicación nacional de Chile ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático.
- MURRAY, E. C. y TREDoux, G. 1998. Artificial recharge: A technology for sustainable water resource development. Water Research Commission Report No 842/1/98, Pretoria, ISBN 1 86845 450 9.
- MURRAY, R. 2009. A check-list for implementing successful artificial recharge projects. Department of Water Affairs, Republic of South Africa.
- NASI, C. y THIELE, R. 1982. Estratigrafía del Jurásico y el Cretácico de la Cordillera de la Costa, al sur del río Maipo, entre Melipilla y Laguna de Aculeo (Chile Central). Revista Geológica de Chile, No. 16, p. 81-99.
- NIKROO, L., KOMPANI-ZARE, M., SEPASKHAH, A., y FALLAH SHAMSI, S. 2009. Groundwater depth and elevation interpolation by kriging methods in Mohr Basin of Fars province in Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 166(1–4), 387–407.
- OLEA, R. & DAVIS, J. C. 1999. Optimizing the High Plains aquifer water-level observation network. Open File Report 1999-15, Kansas Geological Survey.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA (UNESCO). 2005. Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas semiáridas. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, International Hydrological Programme (IHP).
- PRAKASH, M. R., y SINGH, V. S. 2000. Network design for groundwater monitoring. A case study. Environmental Geology, 39(6), 628–632.
- PYNE, D.G. 1998. Aquifer storage recovery: Recent developments in the United States. Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Amsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.

- SÁNCHEZ, F. [sin año]. Conceptos fundamentales de hidrogeología [en línea] España Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca <<http://hidrologia.usal.es/hidro.htm>> [consulta: agosto 2014]
- SUN, Y., KANG, S., LI, F., y ZHANG, L. 2009. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. *Environmental Modelling and Software*, 24(10), 1163–1170.
- THEODOSSIOU, N., y LATINOPOULOS, P. 2006. Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the kriging methodology. *Environmental Modelling and Software*, 21(7), 991–1000.
- THOMAS, H. 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de la Ligua y la Cuesta de Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile, Boletín, No. 2, 86 p. Santiago.
- TUINHOF, A y HEEDERIK, J.P. EDS. 2002. Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. Making Better Use of Our Largest Reservoir. Papers of Seminar Wageningen. 18 - 19 December 2002. Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- TUINHOF, A, OLSTHOORN, T., HEEDERIK, J.P. y DE VRIES, J. 2004. Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. A promising option to cope with increasing needs. Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- VALDÉS, J.L. 1992. Experiencias de recarga artificial en los acuíferos del Río Llobregat y Río Besòs. Aguas de Barcelona (AGBAR), Barcelona.
- VARELA, J. B. y MORENO, R.H. 1982. Los depósitos de relleno de la Depresión Central de Chile, entre los ríos Lontué y Bio-Bío. In Congreso Geológico de Chile, No. 3, Actas, Tomo III, p. F280-F300. Concepción.
- VICUÑA, S.; MEZA, F. J. 2013. Los nuevos desafíos para la gestión de los recursos hídricos en Chile en el marco del Cambio Global [en línea] Centro de Políticas Públicas UC. Año 7 / No 55 / noviembre 2012. <http://politicaspublicas.uc.cl/publicaciones/ver_publicacion/112> [consulta: 30 diciembre 2014]
- YANG, F-G, CAO, S-Y, XING-NIAN, L., y YANG, K-J. 2008. Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 20(3), 339–346.

ANEXO A: NIVELES ESTÁTICOS Y PARÁMETROS ELÁSTICOS

Tabla A.1: Catastro de profundidad de niveles estáticos, en 204 captaciones, dentro de la cuenca del Maule. Coordenadas en Proyección UTM, Datum PSAD 56 huso 19S. Fuente: DGA, 2010.

N°	Coordenadas UTM		Propietario	Ubicación	Comuna	Cota (msn m)	NE (m)	Fecha
	Este (m)	Norte (m)						
1	310059	6091252	Carabineros de Chile Retén Agua Fría	Las Trancas	Molina	575	11,11	05-10-2010
2	302745	6097933	Rosa Aguayo Urzua	Fuente de Agua	Molina	369	5,88	05-10-2010
3	298828	6103541	Comité APR. La Palmilla	La Palmilla	Molina	310	4,25	05-10-2010
4	295856	6105818	Comité APR. Buena Fe	Buena Fe	Molina	284	9,24	05-10-2010
5	292650	6109047	Comité APR. El Cóndor Dos Esquinas	Dos Esquinas N°128	Molina	245	2,21	06-10-2010
6	292476	6104331	Agrícola Porvenir Ltda.	Porvenir	Río Claro	288	34,30	06-10-2010
7	297474	6103366	Afrusan Ltda.	San Gerardo	Río Claro	327	58,28	06-10-2010
8	295940	6102033	Vicente Larraín Bascuñan	San Gerardo	Río Claro	328	10,71	06-10-2010
9	292619	6099493	Vicente Larraín Bascuñan	Santa Teresa	Río Blanco	298	49,84	06-10-2010
10	284675	6108434	Comité APR. Itahue	Itahue	Molina	190	0,28	06-10-2010
11	280003	6100119	Comité APR. Camarico	Camarico	Río Claro	176	4,36	06-10-2010
12	293383	6093987	Agrícola Don Luciano Ltda.	Cumpeo	Río Claro	280	5,36	07-10-2010
13	285926	6089380	Agropecuaria Waprisa	La Chispa	Río Claro	249	55,35	07-10-2010
14	275331	6085107	Comité APR. Pangué Abajo y Pangué Arriba	Pangué Abajo	San Rafael	150	10,51	07-10-2010
15	278499	6091896	Comité APR El Milagro Sta. Victoria	El Milagro	San Rafael	173	14,65	07-10-2010
16	273611	6094597	Oscar Concha Alburquenque	San Rafael Norte Palo Blanco	San Rafael	159	14,56	08-10-2010
17	274033	6095240	Comité APR San Rafael Norte Palo Blanco	San Rafael Norte Palo Blanco	San Rafael	161	s/i	08-10-2010
18	291322	6085096	Agrícola Chorombo S.A.	Huencuecho	Pelarco	264	92,05	08-10-2010
19	291761	6081874	Forestal Celco	Auquíl	Pelarco	262	78,75	08-10-2010
20	283171	6081181	Comité APR Quesería	Quesería	Pelarco	219	28,05	08-10-2010
21	276192	6082447	Celso Salas Muñoz	Lo Patricio	Pelarco	159	4,10	08-10-2010
22	271611	6084015	Viña Lomas del Pangal	Santa Rita	Pelarco	127	2,72	08-10-2010
23	266134	6085443	Cooperativa APR Alto Pangué	Alto Pangué	San Rafael	142	20,08	08-10-2010
24	277539	6080005	Comité APR Sta. Margarita Los Goreros	Santa Margarita	Pelarco	163	18,02	08-10-2010
25	287919	6075895	Comité APR La Isla	La Isla	San Clemente	198	5,23	09-10-2010
26	299907	6070470	Comité APR Las Lomas	Las Lomas	San Clemente	342	11,34	09-10-2010
27	280260	6066005	Cooperar Ltda.	Mariposa	San Clemente	241	57,12	09-10-2010
28	280492	6071464	Comité APR Peumo Negro Las Delicias	Las Delicias	San Clemente	207	40,81	09-10-2010
29	276770	6076021	Comité APR San Francisco Los Largos	San Francisco	San Clemente	182	20,52	09-10-2010
30	292010	6057792	Comité APR Bramadero	Bramadero	San Clemente	384	33,65	09-10-2010
31	294229	6061957	Comité APR Los Montes	Los Montes	San Clemente	402	4,76	10-10-2010
32	309591	6047152	Comité APR Armerillo	Armerillo	San Clemente	476	9,85	10-10-2010
33	301406	6045238	Comité APR Paso Nevado	Paso Nevado	San Clemente	444	20,12	10-10-2010
34	280039	6059317	Cooperativa Queri Ltda.	Queri	San Clemente	254	24,91	10-10-2010
35	272199	6090146	Patricio Gutiérrez Vásquez	San Rafael del Bajo	San Rafael	152	8,26	10-10-2010
36	273611	6094597	Frutícola Agrichile S.A. Fundo	San Sebastián de Raras	San Rafael	159	2,02	12-10-2010
37	276742	6061197	Cooperativa Agua del Valle Ltda.	San Diego Norte	San Clemente	174	26,42	12-10-2010
38	271299	6066544	Miguel Arancibia Reyes	Flor del Llano	San Clemente	167	2,50	12-10-2010
39	266240	6062144	Cooperativa APR Duao Tres Esquinas	Población Villa Tres Esquinas	Maule	168	5,29	12-10-2010
40	264091	6069675	Comité APR Palmira	Palmira	Talca	138	1,38	12-10-2010
41	270598	6069675	Cooperativa Escorpión Ltda.	Aurora	San Clemente	153	4,39	13-10-2010
42	268117	6072052	Cooperativa APR Mercedes Ltda.	Mercedes	Talca	159	4,28	13-10-2010
43	267450	6077238	Comité APR Ramadilla Del Lircay	La Rastra	Talca	189	11,42	13-10-2010
44	240319	6074288	Cooperativa APR Corinto Ltda.	Corinto	Pencahue	43	5,00	13-10-2010
45	262798	6080775	Comité Santa Corina Panguilemo Sur	Sta. Corina	Talca	93	0,00	13-10-2010

46	233386	6072434	Comité APR Curtiduría Magdalena Muñoz	Curtiduría	Pencahue	39	5,39	14-10-2010
47	239595	6076920	Comité APR El Estero	El Estero	Pencahue	53	1,09	14-10-2010
48	245185	6083067	Adriana González	Las Doscientas	Pencahue	59	2,02	14-10-2010
49	247420	6092500	Comité APR Botalcura	Botalcura	Pencahue	64	5,15	14-10-2010
50	247847	6072930	Cooperativa APR Pencahue Ltda.	Rauquen	Pencahue	53	3,99	14-10-2010
51	242979	6081740	Cooperativa APR Pencahue Ltda.	Estero Los Puercos	Pencahue	55	3,36	14-10-2010
52	266562	6072573	Comité APR Huilquilemo	Huilquilemo	Talca	132	0,98	15-10-2010
53	263564	6074869	Tres Montes Luchetti AgroIndustrial S.A.	Talca	Talca	127	12,94	15-10-2010
54	259033	6071280	Cooperativa APR Chacarillas Caivan	Chacarillo	Maule	129	10,48	15-10-2010
55	256747	6066167	Cooperativa de Servicio Sanitario Maule	Maule	Maule	118	1,39	15-10-2010
56	254173	6069392	Comité APR Numpay	Numpay	Maule	109	13,05	16-10-2010
57	254173	6069392	Cooperativa de Servicio Sanitario Colin	Colin	Maule	109	4,35	16-10-2010
58	249005	6070948	Cooperativa de Servicio Sanitario Colin	La Villa	Maule	60	4,80	16-10-2010
59	241262	6069622	Comité APR Unión Maule Claro	Linares de Perales	Maule	39	4,70	16-10-2010
60	250868	6062746	Comité Sta. Rosa de Lavadero	Sta. Rosa de Lavadero	Maule	65	5,04	16-10-2010
61	256594	6060497	Cooperativa de Servicio AP Bobadilla Norte	Los Aromos N°746	San Javier	111	3,26	17-10-2010
62	254850	6059870	Cooperativa de Servicio AP Bobadilla Norte	La Palma	San Javier	107	3,54	17-10-2010
63	261597	6059549	Comité San Pablo Orilla de Maule	San Pablo	San Javier	131	4,82	17-10-2010
64	265479	6057983	Comité APR Puente Pando Marinico	Puente Pando	San Javier	160	6,69	17-10-2010
65	261758	6052233	Com. AP Alcantarillado Patagua	San Manuel Patagua	Villa Alegre	162	3,03	17-10-2010
66	265562	6048125	Comité APR Esperanza	Esperanza	Yerbas Buena	155	1,80	17-10-2010
67	272654	6055545	Cooperativa APR Flor María Ltda.	Orilla de Maule Km. 18	Yerbas Buena	211	11,24	18-10-2010
68	276704	6055536	Comité APR Sta. Ana de Queri	Sta. Ana de Queri	Yerbas Buena	233	9,54	18-10-2010
69	282397	6054101	Cooperativa Queraus Ltda.	Maule Sur	Colbún	276	29,23	18-10-2010
70	282854	6051415	Comité APR Basaez	Basaez	Colbún	273	38,79	18-10-2010
71	275750	6045890	Comité APR La Floresta	La Floresta	Colbún	201	9,53	18-10-2010
72	277433	6044142	Agrisouth Chile S.A	La Floresta	Colbún	188	8,57	18-10-2010
73	277433	6044141	Agrisouth Chile S.A	La Floresta	Colbún	187	6,98	18-10-2010
74	274390	6040729	Comité APR San Juan El Sauce y San José	San Juan de Sauce Sauce	Colbún	180	0,77	19-10-2010
75	275104	6029512	Cooperativa AP Alcantarillado Las Encinas	San Antonio Encina	Linares	187	4,10	19-10-2010
76	274259	6029954	Municipalidad de Linares	San Antonio Encina	Linares	195	3,61	19-10-2010
77	276553	6030683	Hugo Parada Loyola	El Nany	Linares	184	2,10	19-10-2010
78	297759	6029531	Municipalidad de Linares (Chupallar)	Chupallar	Linares	502	2,80	19-10-2010
79	295674	6029513	Terreno Fiscal (Roblería)	Roblería	Linares	501	8,10	19-10-2010
80	280079	6031563	Comité APR Los Colihues Los Rabones	Rabones	Colbún	314	4,42	19-10-2010
81	270944	6034004	Comité APR Los Batros	Los Batros	Linares	151	2,56	20-10-2010
82	278617	6033106	Comité APR Lomas de Putagan	Lomas de Putagan	Colbún	198	22,67	20-10-2010
83	283190	6038550	Cooperativa AP Rari	Rari	Colbún	197	2,68	20-10-2010
84	283190	6038550	Cooperativa La Chiripa Ltda.	Panimávida	Colbún	197	7,85	20-10-2010
85	266478	6035771	Comité APR Puente Alto	Puente Alto	Linares	139	1,86	20-10-2010
86	268563	6041745	Oscar Bonilla Menchaca	Camino Abranquil Km 2	Yerbas Buena	138	1,96	20-10-2010
87	271112	6041192	Cooperativa AP Abranquil Puipuyen	Abranquil	Yerbas Buena	161	0,69	21-10-2010
88	273040	6042815	Agrícola Puipuyen S.A.	Puipuyen	Yerbas Buena	159	2,30	21-10-2010
89	251712	6054646	Com. AP Serv. Sanit. Lomas de Las Tortillas	Lomas de Las Tortillas	Villa Alegre	87	3,14	21-10-2010
90	249825	6054547	Comité APR Alquihue y Vaquería	Loncomilla	San Javier	81	6,73	21-10-2010
91	249825	6054546	Cooperativa Melozal Ltda.	Melozal	San Javier	88	11,69	21-10-2010
92	240440	6045690	Comité APR Carrizal	Carrizal	San Javier	111	62,36	21-10-2010
93	282692	6048917	Cooperativa Rau Ltda.	Int. Cmno. Manuel Rodríguez	Colbún	262	3,27	22-10-2010
94	276704	6055536	Cooperativa Rau Ltda.	Int. Cmno. Manuel Rodríguez	Colbún	233	24,91	22-10-2010
95	224176	6060003	Comité APR La Pitigua	La Pitigua	San Javier	174	11,59	22-10-2010
96	219468	6062914	Cooperativa de AP Nirivilo Ltda.	Nirivilo	San Javier	178	3,13	22-10-2010
97	217436	6059870	Miguel Valdés	Rastrojo	San Javier	142	2,98	22-10-2010
98	217616	6061805	Comité APR El Llano	Ruta 2000	San Javier	194	6,70	22-10-2010

99	210500	6065705	Comité APR Nueva Esperanza	Las Corrientes	Constitución	195	3,66	23-10-2010
100	199262	6080132	Aguas Nuevo Sur	Piedra de Lobo	Constitución	20	10,32	23-10-2010
101	196710	6075920	Comité APR San Ramón	San Ramón	Constitución	385	4,86	23-10-2010
102	220000	6066643	Manuel Luna Rojas	Barrancas	San Javier		5,21	23-10-2010
103	222888	6066965	Claudio Vega Palmilla	(Nirivilo)	San Javier	319	1,31	24-10-2010
104	219058	6055182	DOH	Codelilla	San Javier	196	0,67	24-10-2010
105	218222	6043526	Cooperativa de Servicio AP Sauzal Ltda.	Sauzal	Cauquenes		0,18	24-10-2010
106	226042	6051641	Junta de Vecino	Orilla de Purapel	San Javier	132	2,86	25-10-2010
107	258944	6054398	Comité APR El Sauce Pangal	Calle Larga S/N	Villa Alegre	124	2,05	25-10-2010
108	257837	6053513	Villa El Sauce	El Sauce	Villa Alegre	125	1,97	25-10-2010
109	261292	6055890	Comité Sta. Cecilia Gabriela Mistral	Gabriela Mistral	San Javier	126	2,13	25-10-2010
110	257488	6046824	Inia Raihuen	Estación Villa Alegre	Villa Alegre	112	1,85	25-10-2010
111	251766	6050033	Comité APR El Trapiche Loncomilla	Trapiche	Villa Alegre	104	3,60	26-10-2010
112	255031	6050049	Comité APR Huaraculen	Huaraculen	Villa Alegre	114	1,54	26-10-2010
113	256109	6041375	Comité APR Cunaco Viznaga	Cunaco Chico	Villa Alegre	116	0,99	26-10-2010
114	259081	6039306	Comité APR Putagan	Putagan	Villa Alegre	124	4,48	26-10-2010
115	259027	6039242	Comité APR Putagan	Putagan	Villa Alegre	122	4,91	26-10-2010
116	258872	6035239	Comité APR Las Hornillas	Las Toscas	Linares	127	2,78	26-10-2010
117	259883	6035319	Comité APR Las Hornillas	Las Hornillas	Linares	126	2,28	26-10-2010
118	256383	6036618	Comité APR Las Toscas	Las Toscas	Linares	120	3,82	27-10-2010
119	260626	6036115	Comité APR Guadantun	Guadantun	Linares	127	1,41	27-10-2010
120	259437	6031105	Comité APR Sta. Rosa de Maitenes	Maitenes	Linares	129	2,81	28-10-2010
121	255652	6032598	Comité APR Palmilla Norte	Callejon Las Mercedes	Linares	108	1,39	28-10-2010
122	252822	6033967	Cooperativa AP Palmilla Ltda.	Palmilla	Linares	113	4,52	28-10-2010
123	247248	6033731	Comité APR Bodega	Bodega	Longaví	113	15,82	28-10-2010
124	251686	6025231	Comité APR Poso Cuñado	Paso Cuñado	Longaví	120	10,92	28-10-2010
125	260522	6026447	Comité APR San Gabriel La Aguada	San Gabriel	Longaví	171	3,48	29-10-2010
126	262100	6021908	Coop. de Servicio AP de Miraflores Ltda.	Miraflores	Longaví	155	1,98	29-10-2010
127	262079	6021881	Coop. de Servicio AP de Miraflores Ltda.	Miraflores	Longaví	153	2,08	29-10-2010
128	263442	6021919	Comité APR Punta de Monte	Punta de Monte	Longaví	156	0,96	29-10-2010
129	264636	6023450	Comité APR San Luis San Raúl Las Motas	Las Motas	Longaví	146	3,11	29-10-2010
130	261361	6018896	Comité APR San Luis San Raúl	Las Motas La Granja	Longaví		1,39	30-10-2010
131	266408	6016161	Comité APR La Caña	La Caña	Longaví	164	2,49	30-10-2010
132	268556	6015895	Comité APR Mesamavida La Cuarta	La Cuarta	Longaví	175	2,77	30-10-2010
133	270136	6011240	Comité APR Polcura	Polcura	Longaví	170	3,10	02-11-2010
134	268877	6007369	Comité APR La Quinta - El Tránsito	La Quinta	Longaví	192	3,07	02-11-2010
135	263981	6003419	Comité APR El Encanto	Llano Las Piedras	Longaví	206	20,05	02-11-2010
136	270241	5994804	Com. APR Esperanza Plan San José La Sexta	Esperanza Plan	Longaví	299	3,70	02-11-2010
137	265533	6010116	Comité APR La Tercera Chalet Quemado	Chalet Quemado	Longaví	171	3,45	02-11-2010
138	260597	6011817	Comité APR Los Cristales	Los Cristales	Longaví	154	2,92	02-11-2010
139	261354	6011438	Comité APR Los Cristales	Los Cristales	Longaví	155	2,32	02-11-2010
140	258873	6007860	Comité APR Las Mercedes Paihuen	Las Mercedes	Longaví	164	2,06	03-11-2010
141	256384	6011392	Comité APR Paine	La Conquista Paine	Longaví	168	5,11	03-11-2010
142	276239	6026234	Comité APR San Víctor Lara	San Víctor Lara	Linares	149	3,71	03-11-2010
143	288217	6022797	Comité APR Vega Ancoa	Vega Ancoa	Linares	349	8,43	03-11-2010
144	293629	6024376	Comité APR Embalse Ancoa	Embalse Ancoa	Linares	429	5,43	03-11-2010
145	284913	6015750	Comité APR El Llano	El Llano	Linares	377	9,92	03-11-2010
146	273436	6024438	Comité APR Llancanao	Llancanao	Linares	376	5,14	03-11-2010
147	270720	6026915	Comité APR San Antonio	San Antonio	Linares	196	3,43	04-11-2010
148	258116	6016752	Municipalidad de Longaví	Longaví Urbano (Plaza)	Longaví	127	7,10	04-11-2010
149	258285	6016536	Municipalidad de Longaví	Estadio Municipal	Longaví	130	6,87	04-11-2010
150	250424	6015611	Comité APR Piguchen	Piguchen	Retiro	148	7,84	04-11-2010
151	246397	6026291	Comité APR Bureo-Mantul	Mantul	Retiro	117	9,48	04-11-2010
152	238287	5985688	Municipalidad de Parral	Renaico	Parral	164	4,46	04-11-2010
153	243384	6021757	Comité APR Higuierillas	Higuierillas	Retiro	125	10,87	04-11-2010
154	244189	6011788	Municipalidad de Retiro	San Ramón	Retiro	141	8,82	04-11-2010
155	246191	6005870	Comité APR San Nicolás	San Nicolás	Retiro	158	12,57	05-11-2010
156	253946	5995160	Cooperativa APR El Ajjal	El Ajjal	Retiro	194	3,46	05-11-2010
157	248505	6002494	Cooperativa AP y Alcantarillado Copihue	Copihue	Retiro	167	12,33	05-11-2010

158	254892	5992538	Comité APR Carmen Oriente San Marco	Carmen Oriente	Retiro	197	6,46	05-11-2010
159	256149	5996358	Comité APR El Triunfo Sta. Cecilia	Santa Cecilia	Retiro	202	15,22	05-11-2010
160	256454	5996195	Comité APR El Triunfo Sta. Cecilia	Santa Cecilia	Retiro	217	9,31	05-11-2010
161	252162	6000045	Comité APR Sta. Isabel	Santa Isabel	Retiro	176	7,63	05-11-2010
162	256340	6001520	Comité APR Sta. Inés	La Capilla	Retiro	187	7,36	05-11-2010
163	261005	5997178	Comité APR Sta. Delfina	Santa Delfina	Retiro	224	4,19	06-11-2010
164	273258	5987016	Cooperativa AP Alcantarillado San Alejo	San Alejo	Parral	368	13,63	06-11-2010
165	254584	5987635	Comité APR Los Carros Villa Rosa	Los Carros	Parral	218	4,27	06-11-2010
166	258160	5984309	Comité APR Remulcao	Remulcao	Parral	192	4,67	06-11-2010
167	262083	5981403	Cooperativa AP Catillo Ltda.	Catillo	Parral	277	53,74	06-11-2010
168	259923	5978730	Comité APR Lomas de San Alberto	Lomas de San Alberto	Parral	268	9,03	06-11-2010
169	250811	5989405	Comité APR Villa Reina	Villa Reina	Parral	186	0,38	06-11-2010
170	247794	5986416	Comité APR Talquita	Talquita	Parral	127	5,57	08-11-2010
171	241507	5980786	Comité APR Estación Ñiquen	San Pedro	Ñiquen	147	0,20	08-11-2010
172	252018	5977922	Comité APR Colvindo	Colvindo	Ñiquen	192	4,03	08-11-2010
173	247465	5981053	Cooperativa Servicio APR San Gregorio Ltda.	San Gregorio	San Gregorio	181	2,17	08-11-2010
174	244086	6027921	Cooperativa AP Villaseca	Villaseca	Retiro	122	10,47	08-11-2010
175	241961	6002425	Comité APR Palma Rosa La Florida	Palma Rosa	Parral	154	8,59	08-11-2010
176	237702	6014301	José Retamal Aravena	4 Esquinas	Retiro	136	3,64	08-11-2010
177	222917	6003363	Municipalidad de Parral	Perquilauquén Unicavén	Parral	128	5,43	08-11-2010
178	227932	5993980	Municipalidad de Parral	Fuerte Viejo	Parral	140	2,11	08-11-2010
179	213183	5996729	Municipalidad de Cauquenes	La Patagua	Cauquenes	146	8,87	09-11-2010
180	210346	5992847	Cooperativa APR Pocillas	Pocillas	Cauquenes	151	11,35	09-11-2010
181	203859	5995284	Comité APR Tres Esquinas	Tres Esquinas	Cauquenes	174	15,70	09-11-2010
182	203858	5995278	Municipalidad de Cauquenes	Tres Esquinas	Cauquenes	173	11,83	09-11-2010
183	200318	5998354	Comité APR Tequel	Tequel	Cauquenes	163	16,63	09-11-2010
184	238681	5999056	Comité APR San Lorenzo	San Lorenzo	Parral	150	4,81	09-11-2010
185	221272	6005662	Comité APR Quella	Quella	Cauquenes	119	5,74	09-11-2010
186	221676	6005428	Comité APR Quella	Quella	Cauquenes	122	6,97	09-11-2010
187	222465	6009463	Agrícola Sainte Agustine	Quella Norte	Cauquenes	122	5,68	09-11-2010
188	218586	6011437	Soc. Agrofoilsud Ltda. Capellanía	Cauquenes	Cauquenes	s/i	7,01	09-11-2010
189	215069	6012667	Soc. Agrícola Robles del Maule	Km 16 Cauquenes - Parral	Cauquenes	137	15,65	10-11-2010
190	200817	6012602	Municipalidad de Cauquenes	Barrio Estación	Cauquenes	144	22,27	10-11-2010
191	198631	6010365	Municipalidad de Cauquenes	La Posada Camino Quirihue	Cauquenes	175	19,49	10-11-2010
192	188849	6004758	Coop. AP Doctor Luis Humberto Zoroni	Coronel de Maule	Cauquenes	146	1,83	10-11-2010
193	189836	6006368	Coop. AP Doctor Luis Humberto Zoroni	Coronel de Maule	Cauquenes	149	2,38	10-11-2010
194	193941	6004298	Comité APR Cancha Alegre	Cancha Alegre	Cauquenes	156	17,82	10-11-2010
195	192169	5998443	Fuad Rizik Jarade	Talcacura	Cauquenes	176	2,63	10-11-2010
196	192514	5998280	Fuad Rizik Jarade	Talcacura	Cauquenes	176	2,96	10-11-2010
197	204908	6016285	Comité APR Monte Redondo	Monte Redondo	Cauquenes	171	40,44	10-11-2010
198	207226	6016225	Comité APR Monte Redondo	Monte Redondo	Cauquenes	162	12,00	10-11-2010
199	210607	6014228	Aquiles Rodríguez	Km 12 Cauquenes - Parral	Cauquenes	151	21,45	11-11-2010
200	208838	6016645	Amilcar Viviani Salgado	Culenco	Cauquenes	153	19,46	11-11-2010
201	209213	6016688	Amilcar Viviani Salgado	Culenco	Cauquenes	148	19,97	11-11-2010
202	210089	6016234	Amilcar Viviani Salgado	Culenco	Cauquenes	134	5,93	11-11-2010
203	202537	6026885	Municipalidad de Cauquenes	El Hilochehua	Cauquenes	190	13,28	11-11-2010
204	200685	6019389	Carmen Gloria Valdés	Km 4 Chanco - Cauquenes	Cauquenes	180	9,54	11-11-2010

Tabla A.2: Registro de niveles estáticos y parámetros elásticos (transmisibilidad y permeabilidad) en 205 captaciones dentro de la cuenca del Maule. Coordenadas en Proyección UTM, Datum PSAD 56 huso 19S. Fuente: DGA, 2010.

N° Pozo	Coordenadas UTM		Ubicación	Prof. (m)	N.E. (m)	Q (l/s)	N.D. (m)	Espesor (m)	T (m ² /d)	K (m/s)
	Norte (m)	Este (m)								
1	6037500	279600	Paso Rari	40,0	6,2	21,0	29,0	33,8	89	3,04E-05

2	6011101	261129	Los Cristales	40,0	2,2	15,0	9,2	37,8	208	6,37E-05
3	6033405	278670	Lomas de Putagan	47,0	20,7	7,0	28,1	26,3	91	3,99E-05
4	6007050	264650	Fundo El Guindo Longaví	70,0	9,1	30,0	32,4	60,9	124	2,36E-05
5	6075409	262102	San Miguel	50,0	10,8	57,0	28,7	38,3	307	9,29E-05
6	6090139	271096	San Rafael	60,0	20,5	25,0	26,0	12,5	438	4,05E-04
7	5992320	255240	San Marcos Retiro	40,0	6,9	12,0	9,0	29,1	547	2,18E-04
8	6046180	275990	La Floresta Colbún	40,0	7,3	20,0	9,0	20,0	1100	6,37E-04
9	6056600	257820	Santa Cecilia	30,0	1,9	20,0	4,4	28,2	764	3,14E-04
10	6098200	259800	Santa Rosa Cumpeo	31,0	12,9	10,0	16,6	18,2	260	1,66E-04
11	6058870	285110	Buenos Aires	49,5	12,8	3,0	32,7	36,7	15	4,57E-06
12	6072920	255780	El Culenar	30,0	3,1	15,0	15,4	26,9	118	5,07E-05
13	6022030	262010	Punta de Monte	40,0	0,7	3,8	16,6	39,3	23	6,75E-06
14	6081900	278550	Pelarco	50,0	11,7	25,0	26,0	14,0	168	1,39E-04
15	6081750	278600	Pelarco	47,0	13,6	25,0	25,0	33,4	211	7,32E-05
16	6014379	200536	Cauquenes	50,0	6,8	73,0	17,3	33,6	669	2,31E-04
17	6014452	201062	Cauquenes	50,0	1,1	55,0	25,3	33,0	218	7,66E-05
18	6014435	200793	Cauquenes	50,0	2,1	60,0	17,5	30,3	375	1,43E-04
19	6085500	265800	Panguilemu	50,0	15,0	9,5	31,1	35,0	57	1,88E-05
20	6014180	200708	Cauquenes	50,0	7,5	70,0	17,8	39,1	653	1,93E-04
21	6032410	274780	Vara Gruesa	45,0	1,2	6,8	2,8	11,0	404	4,25E-04
22	5993789	209705	Pocillas	40,3	4,0	0,6	26,4	36,3	3	8,23E-07
23	5993779	209704	Pocillas	43,2	3,9	0,7	26,1	39,3	3	8,95E-07
24	6070540	300100	Las Lomas	40,0	8,8	6,4	28,4	31,2	31	1,17E-05
25	6060220	284590	Buenos Aires	60,0	13,2	17,5	18,3	46,8	336	8,30E-05
26	6072780	233240	Curtiduría Pencahue	30,0	4,8	19,4	6,0	25,2	1667	7,67E-04
27	6092680	247690	Botalcura Pencahue	60,0	5,3	4,5	31,2	30,0	17	6,47E-06
28	6028080	244090	Villaseca	29,7	11,6	19,3	20,0	17,7	220	1,44E-04
29	6060200	259500	Orilla del Maule	24,0	3,6	10,0	5,0	21,4	688	3,72E-04
30	6074660	239860	Corinto	30,0	1,5	12,0	14,7	19,4	88	5,22E-05
31	6041306	267456	Yerbas Buenas	30,0	1,7	65,6	20,4	25,0	338	1,57E-04
32	6090187	271129	San Rafael	60,0	20,5	25,0	26,0	12,5	438	4,05E-04
33	6045850	253450	Villa Alegre	55,2	8,6	70,0	19,5	46,6	618	1,54E-04
34	6046969	258001	Villa Alegre	40,0	1,3	12,4	22,0	38,7	58	1,72E-05
35	6046903	258047	Villa Alegre	45,0	1,5	21,7	4,3	18,5	746	4,67E-04
36	6006950	251100	Retiro	105,0	5,5	22,0	33,3	66,5	76	1,33E-05
37	6029700	267300	Linares	164,6	10,2	40,0	33,0	35,4	169	5,52E-05
38	6029700	267300	Linares	170,0	11,3	40,0	38,0	72,7	144	2,30E-05
39	6029700	267300	Linares	164,6	10,2	40,0	33,0	108,4	169	1,80E-05
40	5995950	245950	Parral	190,0	7,2	37,5	75,0	112,8	53	5,46E-06
41	5995980	246448	Parral	195,0	10,0	85,0	30,6	173,9	397	2,64E-05
42	5995835	246537	Parral	125,0	11,8	90,0	31,3	86,6	443	5,92E-05
43	5996100	246550	Parral	198,0	8,0	50,0	15,7	98,0	625	7,38E-05

44	6029700	267300	Linares	175,0	31,6	90,0	40,1	123,0	1014	9,55E-05
45	6076969	262410	Pozo San Luis	45,0	11,0	55,0	38,0	34,0	196	6,69E-05
46	6077073	262498	Planta Elevadora San Luis	44,6	9,0	50,0	15,5	35,6	740	2,41E-04
47	6077250	262750	Planta Elevadora San Luis	49,5	12,5	55,5	35,5	19,0	232	1,41E-04
48	6077100	262950	Planta Elevadora San Luis	35,2	12,5	55,5	25,0	19,0	427	2,60E-04
49	6077050	259800	Planta Elevadora San Luis	57,0	12,5	41,0	28,5	30,5	247	9,36E-05
50	6076814	262641	Planta Elevadora San Luis	60,0	18,5	123,0	25,0	41,5	1819	5,07E-04
51	6077199	262314	Planta Elevadora San Luis	55,0	10,5	25,0	42,8	26,0	75	3,32E-05
52	6077093	262124	Planta Elevadora San Luis	55,0	8,7	55,0	18,6	26,0	535	2,38E-04
53	6077100	262533	Planta Elevadora San Luis	53,0	14,0	120,0	17,4	39,0	3397	1,01E-03
54	6016134	258202	Longaví	60,0	6,0	33,0	47,3	19,0	77	4,68E-05
55	6016550	257850	Longaví	39,5	5,8	18,0	12,0	33,7	278	9,54E-05
56	6016750	258000	Longaví	30,0	6,7	13,0	25,4	23,3	67	3,33E-05
57	6075092	261885	San Miguel	50,0	12,3	65,0	34,0	35,0	288	9,53E-05
58	6074885	261767	San Miguel	50,0	11,0	60,0	37,0	39,0	222	6,59E-05
59	6075163	262108	San Miguel	50,0	10,7	63,0	34,0	38,3	260	7,87E-05
60	6075409	262102	San Miguel	50,0	10,3	50,0	25,3	39,5	320	9,38E-05
61	6075199	261181	San Miguel	62,5	7,3	60,0	15,7	49,2	688	1,62E-04
62	6075077	259905	Paso Moya	45,0	1,3	55,0	32,0	43,7	172	4,57E-05
63	6075086	259153	Pozo Sur	59,0	4,8	72,0	19,7	22,1	465	2,44E-04
64	6078400	258800	Pozo Norte	55,0	4,0	51,0	34,7	48,0	160	3,86E-05
65	6074377	259769	Tabaco I	55,0	9,1	70,0	22,5	46,0	501	1,26E-04
66	6077600	256900	Río Claro	30,7	0,0	80,0	17,0	25,5	453	2,06E-04
67	6078100	257150	Río Claro	32,0	0,0	67,0	17,0	26,0	379	1,69E-04
68	6077850	257450	Río Claro	32,0	0,0	75,0	15,1	24,5	478	2,26E-04
69	6077400	257300	Río Claro	32,0	0,0	75,0	14,0	25,5	516	2,34E-04
70	6077297	256951	Río Claro	35,0	0,0	25,0	46,0	35,0	52	1,73E-05
71	6077481	256782	Río Claro	35,0	0,8	21,0	22,0	26,0	95	4,24E-05
72	6077599	257327	Río Claro	45,0	0,0	115,0	19,2	29,0	576	2,30E-04
73	6074620	261598	San Miguel	60,0	11,6	60,0	43,7	39,0	180	5,34E-05
74	6076200	262650	San Miguel	60,2	11,9	47,0	21,5	41,3	471	1,32E-04
75	6075603	261392	San Miguel	50,0	10,6	40,0	32,4	49,4	177	4,15E-05
76	6062000	294700	APR Los Montes	40,3	4,3	12,0	26,8	30,3	51	1,96E-05
77	6057828	253702	San Javier	60,0	11,5	100,0	19,9	45,5	1145	2,91E-04
78	6063906	275267	San Clemente	50,0	17,6	85,0	22,0	32,4	1847	6,60E-04
79	6064600	274200	San Clemente	50,0	12,9	20,0	14,5	34,0	1167	3,97E-04
80	6074177	259769	El Tabaco	50,0	0,8	50,0	6,7	45,5	816	2,08E-04
81	6074577	259569	El Tabaco	50,0	1,5	58,7	15,4	47,5	407	9,91E-05
82	6074577	259969	El Tabaco	60,0	6,0	59,0	25,0	41,0	299	8,44E-05
83	6097700	293600	Los Montes	60,0	3,8	12,0	14,7	56,2	106	2,19E-05
84	6032650	255650	Palmilla Norte	40,0	3,8	10,0	20,3	15,0	59	4,52E-05
85	6016595	266740	La Caña	40,0	2,6	10,8	3,5	22,1	1155	6,06E-04

86	6012150	261650	Fundo Las Flores	60,0	3,2	57,0	25,4	56,8	247	5,04E-05
87	5991750	262600	Retiro	45,0	8,4	28,0	29,2	36,6	130	4,11E-05
88	5992100	261700	El Álamo	50,0	10,4	60,0	17,6	39,6	804	2,35E-04
89	6005000	251300	Retiro	60,0	4,6	36,0	17,4	52,4	269	5,94E-05
90	6008650	259050	Las Mercedes Paihuen	45,0	2,3	20,0	8,7	35,0	300	9,93E-05
91	5991750	261800	Retiro	50,0	2,2	30,0	21,4	47,8	150	3,64E-05
92	6033360	270640	San Juan	40,0	3,0	6,0	26,6	18,0	24	1,57E-05
93	5994800	254150	Sector El Ajial Retiro	45,0	4,6	40,0	28,1	35,0	164	5,42E-05
94	6025400	272300	Llancaño	42,2	5,6	12,0	6,4	36,6	1359	4,30E-04
95	6003850	248950	Copihue	68,0	8,5	40,0	35,8	59,6	141	2,74E-05
96	5984200	258200	Remulcao	20,0	4,3	13,0	8,0	15,7	337	2,48E-04
97	6046450	281650	San Dionisio	40,2	21,9	15,0	24,2	18,2	633	4,02E-04
98	5999800	252400	Santa Isabel	40,0	7,5	20,0	10,3	32,5	698	2,48E-04
99	6008165	200698	Fundo Villa Flora Cauquenes	14,0	4,6	0,5	13,5	9,4	5	6,23E-06
100	6097000	255500	El Triunfo	76,0	10,7	13,0	15,4	65,4	264	4,68E-05
101	6002900	248400	Copihue	35,0	12,0	19,0	19,0	21,0	261	1,44E-04
102	6102800	291050	Porvenir	64,0	24,5	14,0	48,8	7,3	55	8,79E-05
103	6066100	256800	Pueblecillo	33,0	1,2	14,0	5,1	31,8	349	1,27E-04
104	6050000	276000	Maitencillo	40,0	2,7	14,0	7,0	37,3	313	9,72E-05
105	6055750	275500	Santa Ana de Queri	40,0	8,8	20,0	11,2	31,2	792	2,94E-04
106	6049800	277200	Semillero	40,0	12,9	18,0	19,2	27,1	279	1,19E-04
108	6026700	264100	Predio Los Robles	35,0	2,1	24,0	23,0	32,9	111	3,89E-05
109	6010870	295050	San Gerardo	57,0	45,1	7,0	46,8	11,9	401	3,89E-04
110	6088960	288880	La Chiripa	25,5	5,6	5,9	20,4	19,5	38	2,28E-05
111	5995470	253430	Ajial	28,0	1,6	14,0	4,8	14,1	425	3,49E-04
112	6013360	271400	Lomas de Polcura	50,0	2,4	5,0	8,0	47,6	86	2,09E-05
113	6057600	238110	Sector Luis Cruz Martínez	40,0	3,0	3,0	35,1	37,0	9	2,81E-06
114	6067700	276200	Quebrada de Agua	50,0	16,0	19,0	25,6	34,0	191	6,51E-05
115	6065800	280300	Mariposas	80,0	56,7	15,0	59,6	23,4	491	2,43E-04
116	6092840	297570	Casas Viejas Río Claro	25,0	2,3	4,7	17,4	21,7	30	1,60E-05
117	6069750	290000	Bajos de Lircay San Clemente	80,0	55,6	2,1	73,7	24,4	11	5,38E-06
118	6041530	270200	Abranquil Puipuyen	30,0	0,0	10,5	20,0	23,5	51	2,49E-05
119	6076500	270200	Purísima Ranquimili	40,0	13,0	8,6	20,3	17,4	114	7,60E-05
120	6015610	250460	Piguchén	45,0	7,5	12,0	15,9	12,5	138	1,28E-04
121	6045100	267150	Llano Blanco	40,0	1,1	12,5	2,1	34,0	1203	4,10E-04
122	6040300	279250	Santos RosaRafaelBlancaSebastián	40,0	4,0	18,0	28,6	36,0	70	2,26E-05
123	6036300	280000	Quinamávida	38,0	3,6	4,0	33,0	8,0	13	1,89E-05
124	6009840	257030	PaineLa Conquista	40,0	5,1	22,0	12,5	34,9	287	9,52E-05
125	6034500	278000	Capilla Palacio	28,0	4,4	17,5	19,5	23,6	112	5,47E-05
126	6060450	256700	Bobadilla Norte San Javier	25,0	2,9	20,0	7,6	20,8	404	2,25E-04
127	5996380	253550	Pozo Ajial Manzano	45,0	3,2	54,0	9,9	41,8	779	2,16E-04
128	6007100	254750	Retiro	65,0	4,8	53,0	20,3	35,1	330	1,09E-04

129	6050700	267200	Peñuelas	40,0	2,0	30,0	4,3	38,0	1256	3,82E-04
130	6006170	256110	Maitenes	40,0	4,3	20,0	15,4	35,7	173	5,60E-05
131	6006400	256090	Maitenes	50,0	6,9	45,0	14,4	39,6	578	1,69E-04
132	6014240	200875	Cauquenes	50,0	10,4	60,0	19,6	41,6	629	1,75E-04
133	6029500	267450	Linares	170,0	31,9	56,0	73,0	35,0	131	4,34E-05
134	6029300	267400	Linares	170,0	23,2	57,5	64,9	78,0	133	1,97E-05
135	6029229	267382	Linares	110,0	14,6	77,3	83,0	40,0	109	3,15E-05
136	6076200	262650	San Miguel	60,2	12,0	47,0	21,5	31,1	476	1,77E-04
137	6036050	260000	Guadantún	40,0	1,8	16,0	6,3	15,2	343	2,61E-04
138	6026300	252280	Paso Cuñao	46,0	10,2	22,0	30,4	29,0	105	4,19E-05
139	6052800	245250	Alquihue	70,0	3,5	0,5	46,3	16,0	1	8,15E-07
140	6056200	244800	Vaquería	55,0	2,4	1,5	29,0	16,0	5	3,93E-06
141	6048900	225020	Orilla de Purapel	50,0	5,1	1,4	24,4	12,9	7	6,14E-06
142	6033500	234600	Pillay	100,0	7,7	8,0	15,1	16,0	105	7,58E-05
143	5999300	265850	Llanos Las Piedras	50,0	21,8	9,0	23,1	28,2	699	2,87E-04
144	6081960	263580	Santa Corina	40,0	0,0	18,0	0,4	40,0	4332	1,25E-03
145	6065100	271300	San Valeriano	30,0	3,3	15,0	3,7	26,8	3358	1,45E-03
146	6070750	241650	Linares de Perales	50,0	5,6	8,5	13,6	44,4	102	2,65E-05
147	6059800	270700	San Manuel	40,0	3,1	17,0	3,4	36,9	5643	1,77E-03
148	6060313	258157	San Pablo Orilla de Maule	50,0	3,3	25,0	18,5	34,0	159	5,40E-05
149	6061969	294270	Los Montes	50,0	5,7	18,0	19,4	19,0	126	7,69E-05
150	6105988	288170	Paso Ancho	50,0	26,6	8,0	39,9	20,0	58	3,34E-05
151	6083119	264782	Panguilemo Unido	55,0	17,5	18,5	30,8	23,0	134	6,74E-05
152	6029872	275158	San Antonio de Encina	109,0	8,7	5,1	85,8	62,3	6	1,18E-06
153	6039833	281606	La Chiripa	40,0	10,8	12,1	30,2	11,0	60	6,29E-05
154	6058589	238066	Luis Cruz Martínez	40,0	2,8	4,0	18,4	20,8	25	1,38E-05
155	6034636	280398	Quinamávida	60,0	12,8	12,1	46,0	24,0	35	1,69E-05
156	6027925	244087	Villaseca	65,0	10,3	20,0	14,2	52,1	505	1,12E-04
157	5996191	256453	El Triunfo Santa Cecilia	120,0	11,1	28,0	52,5	59,0	65	1,28E-05
158	6018687	257779	Cerrillos Recreo	54,0	2,4	45,0	7,2	51,7	893	2,00E-04
159	6021916	262102	Miraflores	60,0	2,6	10,9	32,7	50,4	35	8,00E-06
160	6011825	260602	Los Cristales	60,0	2,7	21,0	15,4	27,3	160	6,77E-05
161	6056584	252584	Vaquería	94,0	8,8	60,0	20,5	34,0	495	1,68E-04
162	6076928	239600	Pencahue	34,0	2,7	4,5	8,5	9,0	75	9,60E-05
163	6032300	269428	La Posada	60,0	5,0	18,3	23,4	25,6	95	4,31E-05
164	6062747	250870	Santa Rosa de Lavadero	50,0	4,0	23,0	5,9	28,8	1135	4,56E-04
165	6012935	208755	Fundo El Boldo	82,0	5,0	120,0	17,4	65,5	926	1,64E-04
166	6095000	288100	Fundo La Cachimba	100,0	34,7	126,0	46,2	65,3	1056	1,87E-04
167	6094800	288100	Fundo La Cachimba	100,0	34,8	90,0	52,5	65,2	489	8,69E-05
168	6000592	244158	Parral	120,0	5,5	45,0	25,9	86,5	212	2,84E-05
169	5989516	257900	Parral	70,0	11,6	96,3	21,4	57,0	950	1,93E-04
170	6011550	264300	Longaví	38,0	1,9	33,0	9,0	25,1	445	2,05E-04

171	6034250	253950	Linares	29,8	3,9	15,0	4,5	20,0	2407	1,39E-03
172	6025750	265600	Longaví	40,0	2,3	50,0	5,4	12,0	1558	1,50E-03
173	5997250	260900	Santa Delfina	40,0	5,6	14,0	9,6	30,0	338	1,30E-04
174	6079950	261950	Caserío Lircay	42,0	2,4	10,0	6,2	39,6	253	7,40E-05
175	6072650	266400	Huilquilemu	43,0	0,0	15,0	2,8	15,0	516	3,98E-04
176	6065040	267115	El Bolsico	35,0	0,8	12,5	1,5	15,0	1719	1,33E-03
177	6098170	294950	Santa Rosa	31,0	12,9	10,0	16,3	18,2	276	1,76E-04
178	6056520	269050	Flor María	45,0	7,8	15,0	11,2	37,2	420	1,31E-04
179	6051200	259950	Lagunillas	30,0	2,1	12,9	4,2	22,0	583	3,07E-04
180	6099650	276900	Fundo Camarico	40,2	2,8	20,0	16,4	35,4	141	4,61E-05
181	6034150	252360	Palmilla	29,8	3,4	15,0	4,5	26,5	1256	5,49E-04
182	6028120	244000	Villaseca	29,0	11,6	5,0	12,4	17,4	609	4,05E-04
183	6099800	277450	Los Maquis	40,0	19,4	10,5	22,0	20,6	384	2,16E-04
184	6069550	254100	Numpai	50,0	7,1	4,1	34,8	27,0	14	6,04E-06
185	6065200	203300	La Aguada	40,0	8,2	1,5	17,9	16,8	15	1,03E-05
186	6044100	257100	Finca Normandie	40,0	1,4	16,0	4,2	38,6	562	1,69E-04
187	6065500	210700	Las Corrientes	13,0	3,3	0,3	8,4	9,7	6	6,76E-06
188	5993500	284500	La Esperanza	40,3	3,3	12,0	8,0	37,0	245	7,68E-05
189	6083400	212600	Carrizalillo	20,0	7,1	1,2	14,1	4,9	17	3,90E-05
190	6026450	260550	San Gabriel	50,0	6,8	11,0	36,2	21,2	36	1,97E-05
191	6098950	291700	Santa Águeda	40,0	5,3	12,0	23,3	34,7	64	2,14E-05
192	6101050	279870	Alto Camarico	40,0	-0,6	17,5	5,2	40,0	288	8,35E-05
193	6037350	247150	Marimaura	41,0	3,1	6,7	29,5	12,9	24	2,20E-05
194	5981500	262100	Catillo	110,0	53,0	4,0	61,0	57,0	48	9,77E-06
195	6038300	268400	San Bartolo	40,0	4,2	15,0	6,6	35,8	594	1,92E-04
196	5989408	250858	Villa Reina	40,0	0,0	14,0	1,9	40,0	717	2,07E-04
197	6079700	246140	Pencahue	60,0	3,8	22,0	23,4	29,0	108	4,30E-05
198	6056948	256040	San Javier	48,0	0,0	20,0	3,2	48,0	602	1,45E-04
199	6057084	255975	San Javier	33,0	1,0	20,0	4,0	32,0	642	2,32E-04
200	6057030	255990	San Javier	47,0	2,5	30,0	7,5	44,5	578	1,50E-04
201	6026550	270300	San Antonio de Linares	53,0	6,4	18,0	16,0	15,2	181	1,37E-04
202	6045450	253600	Villa Alegre	60,0	8,9	30,0	15,5	51,2	434	9,83E-05
203	6043700	246950	Melozal	24,0	9,9	7,0	28,4	11,0	36	3,84E-05
204	6044400	247000	Melozal	70,0	9,1	6,4	12,6	13,0	174	1,55E-04
205	6064300	274350	San Clemente	50,0	11,0	25,0	19,0	39,0	301	8,93E-05

ANEXO B: SISTEMAS DE RECARGA

B.1 SISTEMAS SUPERFICIALES

B.1.1 EN CURSO

B.1.1.1 REPRESAS PERFORADAS

Cuando ocurren crecidas repentinas en los ríos, los caudales transportan grandes cantidades de sólidos suspendidos, el agua escurre hasta llegar al mar y estas aguas son desaprovechadas en lugar de ser recargadas al acuífero. Las represas perforadas, son estructuras dispuestas transversales al cauce, las cuales retienen estas inundaciones de alta energía, estimulan la sedimentación de sólidos suspendidos y van liberando el agua, lentamente, a través de cañerías, aguas abajo de la represa, donde puede ocurrir la recarga (UNESCO, 2005).

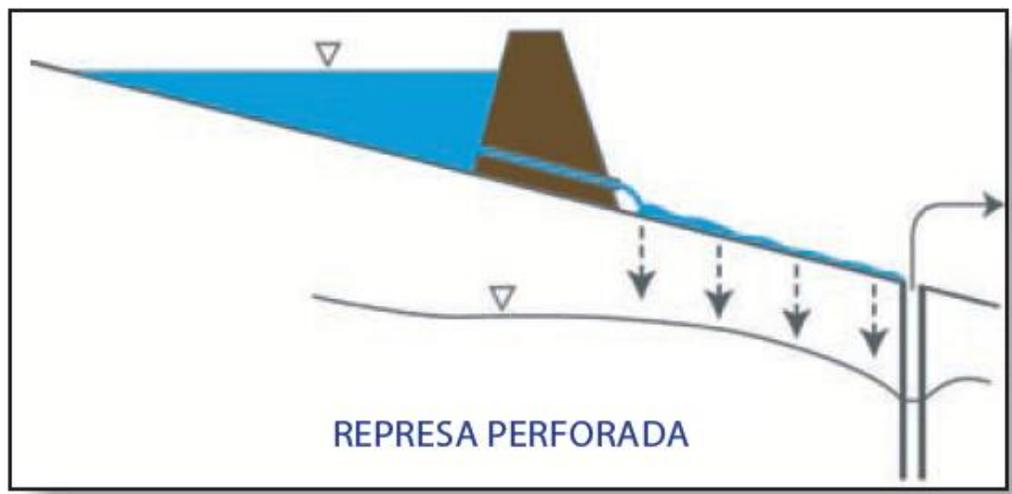


Figura B.1: Representación esquemática de un sistema de represa perforada. Fuente: Imagen extraída de UNESCO, 2005.

B.1.1.2 ESTANQUES DE PERCOLACIÓN ASOCIADOS A REPRESAS DE CONTROL

Es un método económico de recargar agua, ya que utiliza el mismo material del lecho del río, para construir muros en el mismo cauce. Colocar estas estructuras en serie, a lo largo de un río, reduce la energía destructiva de escorrentías intensas, reduciendo a su vez, la erosión y el transporte de sedimentos. Con el fin de evitar la destrucción o erosión de esas estructuras, usualmente, se construye un vertedero de concreto; y para contener y canalizar la escorrentía, se construyen diques, los cuales retardan el flujo de agua hacia el curso, favoreciendo la infiltración en el suelo y a la vez reduciendo la erosión (UNESCO, 2005).

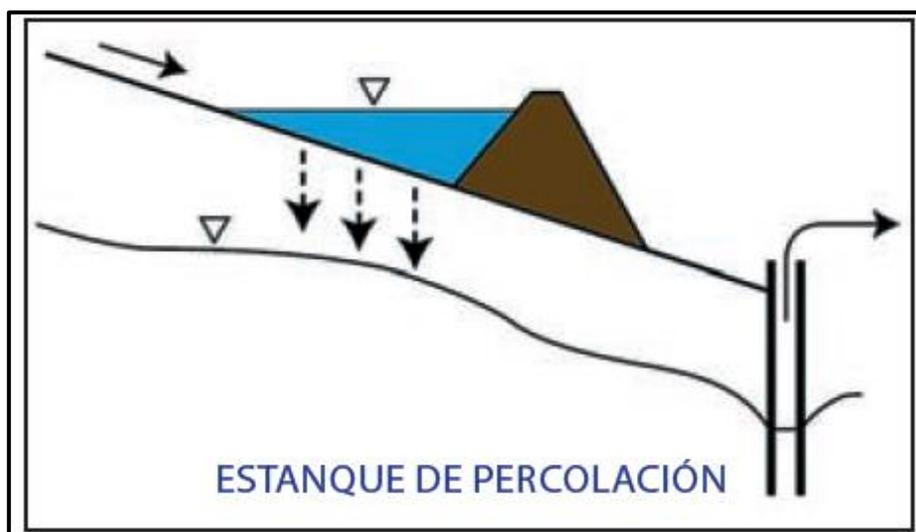


Figura B.2: Representación esquemática de un sistema De estanque de percolación. Fuente: Imagen extraída de UNESCO, 2005.

B.1.1.3 REPRESAS DE ARENA PARA ALMACENAMIENTO

Se recomienda su utilización en terrenos ondulados, de condiciones climáticas áridas, en donde se produce escorrentía por inundaciones repentinas. Usualmente, se construyen sobre el lecho de ríos intermitentes y arenosos en valles bien definidos. Consiste en una pared sobre el lecho del río, transversal al cauce, la cual reduce las inundaciones repentinas. Esta pared, permite que el material más grueso se acumule bajo la pared de la presa. Así, sucesivamente a cada evento de inundación, la pared de la represa se eleva, determinando el caudal de inundación y la cantidad de material acumulado. Se debe permitir, no obstante, un desborde tal que permita que el material más fino sea transportado aguas abajo (Murray y Tredoux, 1998). Con sucesivos eventos de inundaciones, a lo largo del tiempo, se formará un acuífero artificial, el cual permitirá que el agua se almacene en lugar de fluir aguas abajo (UNESCO, 2005).



Figura B.3: Representación esquemática de un sistema de represa de arena. Fuente: Imagen extraída de UNESCO, 2005.

Existen pocas pérdidas por evaporación, bajos requerimientos de operación y mantenimiento y larga vida útil. Los costos en Kenya se estiman en \$US 1,15/m³ para un volumen almacenado de 2.844 m³ de agua.

B.1.1.4 DIQUES

Cuando el río tiene poca pendiente y poca altura, una alternativa es instalar diques de tierra en forma de T o L. Su principal efecto es aumentar el tiempo de retención del agua dándole más tiempo para que ésta pueda ser infiltrada.

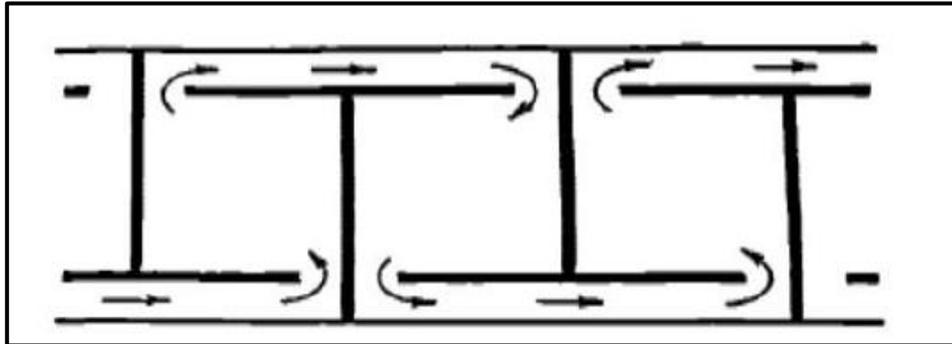


Figura B.4: Diques. Fuente: tomado de Bouwer, 2002.

B.1.2 FUERA DE CURSO

B.1.2.1 LAGUNA O CUENCA DE INFILTRACIÓN

Son construidas, comúnmente, paralelas a los cauces fluviales efímeros o intermitentes, y son ya sea excavadas, o encerradas por diques. En áreas aluviales, pueden ser construidas múltiples cuencas de recarga, paralelas al flujo, con el fin de: incrementar el tiempo de contacto con el agua; reducir el material suspendido a medida que el agua fluye de una cuenca a otra; y facilitar una mantención periódica para restaurar las tasas de infiltración, eludiendo la cuenca en restauración. Además, existen otros factores a ser considerados en la construcción de cuencas de recarga, estos son: el área seleccionada debe ser un terreno de pendiente suave; los puntos de entrada y salida del agua deberían ser diagonalmente opuestos, para facilitar una adecuada circulación en las cuencas individuales; el agua liberada a la cuenca debe estar lo más libre de sedimentos, como sea posible; la tasa de ingreso del agua a la cuenca debería ser ligeramente mayor que la capacidad de infiltración de todas las cuencas (Government of India, 2007).

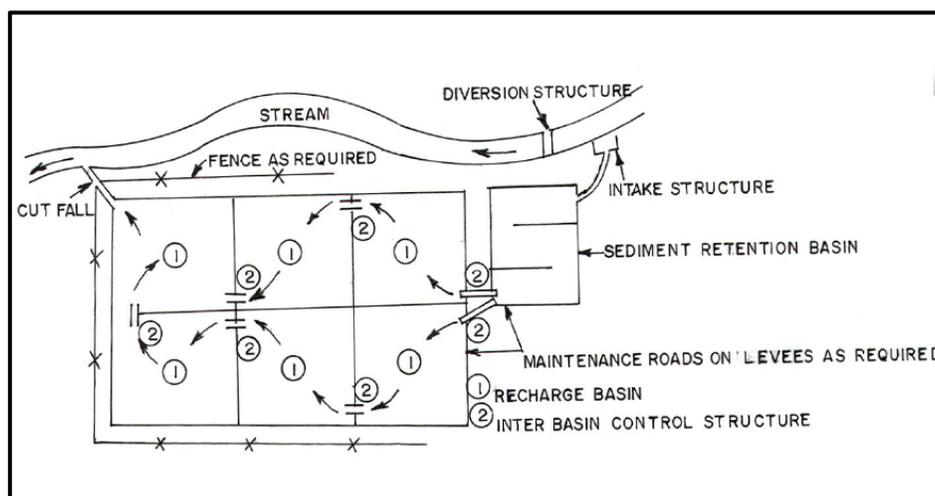


Figura B.5: Diseño esquemático de cuencas de recarga. Fuente: tomado de Government of India, 2007.

Valores típicos de infiltración van desde los 30 m/año hasta los 500 m/año en suelo fino y arena gruesa respectivamente, mientras que la profundidad de la laguna puede variar entre 1 y 4 metros. Costos en India se estiman entre \$US 5.000 y \$US 10.000 para estanques de 10.000 a 15.000 m³ de capacidad (Fewster, 2010).

B.1.2.2 INUNDACIÓN CONTROLADA

En áreas de pendientes suaves, el agua proveniente de un río, es desviada mediante canales, y distribuida sobre una amplia superficie. En ella, el agua se mueve a una mínima velocidad, y la cobertura del suelo no se ve afectada. La inundación resulta ser sumamente efectiva, desde el punto de vista de la relación costo-beneficio, ya que no requiere una gran preparación del terreno. Sin embargo, se necesitan amplias superficies disponibles (UNESCO, 2005). Para controlar el proceso de inundación, se colocan, bordeando la planicie, bancos o zanjas. Debido a que la carga de sedimentos se deposita en la superficie, provoca la reducción de las tasas de recarga, obligando a tomar medidas para establecer tasas de recarga adecuadas (UNESCO, 2005).

B.2 SISTEMAS SUBSUPERFICIALES

B.2.1 POZO A LA ZONA VADOSA

Los pozos en la zona vadosa (también llamados ejes de recarga o pozos secos), normalmente, son de alrededor de 1m de diámetro y a lo más de 60 m de profundidad. Estos se rellenan con arena gruesa o grava fina. El agua se aplica, normalmente, mediante una tubería perforada en el centro. La caída libre del agua, en esta tubería, debe evitarse para impedir la entrada de aire al agua y la formación de aire entrampado en el relleno y el suelo que rodea al pozo. Para hacer esto, el agua es suministrada a través de una tubería más pequeña, dentro de la tubería perforada, que se prolonga, bajo el nivel del agua en el pozo, hasta una distancia segura (Bouwer, 2002).

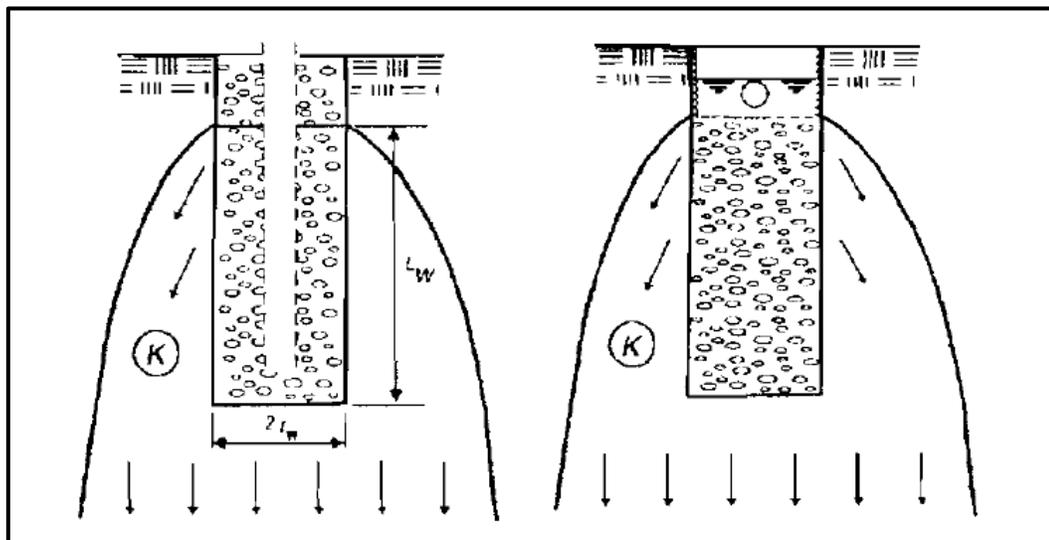


Figura B.6: Sección mostrando un pozo en la zona vadosa con relleno de arena o grava, y una tubería de suministro perforada (izquierda). Zanja de recarga con relleno de arena o grava, una tubería de suministro arriba del relleno, y una cubierta (derecha). Fuente: tomado de Bouwer, 2002.

B.2.2 ZANJAS O FOSAS DE RECARGA

Son, normalmente, fosas excavadas, suficientemente profundas para penetrar las capas de baja permeabilidad que sobreyacen al acuífero. Estas son similares a las cuencas de recarga, la única diferencia es que estas son más profundas y tienen un área de fondo restringida. En muchas de estas estructuras, la mayoría de la infiltración ocurre lateralmente a través de las paredes de la fosa, ya que, en general, en capas sedimentarias o materiales aluviales, la conductividad hidráulica lateral es considerablemente más alta que la conductividad hidráulica vertical (Government of India, 2007).

Las zanjas de recarga, típicamente, son de menos de 1 m de ancho y hasta de 5 m de profundidad. Ellas son rellenadas con arena gruesa o grava fina. El agua, normalmente, es suministrada mediante una tubería perforada sobre la superficie del relleno, y la zanja se cubre para mimetizarla con los alrededores (Bouwer, 2002).

Para las zanjas, el pre-tratamiento se realiza en la zanja misma colocando un filtro de arena con, posiblemente, un geotextil encima del relleno. Sin embargo, este filtro reduciría demasiado el flujo en el relleno, para lo cual la zanja debería ser ampliada en la parte superior para crear una zanja en forma de “T” con una gran área filtrante (Bouwer, 2002).

Las siguientes características están citadas del documento Government of India (2007).

- La capacidad de recarga de la fosa incrementa con el área de la sección transversal. Por lo tanto, siempre es recomendable construir una fosa tan larga como sea posible.
- La permeabilidad de la capa subyacente debería ser averiguada mediante pruebas de infiltración, antes de la construcción de la fosa. Los taludes laterales de la fosa de recarga deberían ser 2:1, ya que las pendientes empinadas reducen la colmatación y sedimentación en las paredes de la fosa. La fuente de agua para la recarga debería estar tan libre de limo, como sea posible.
- Las fosas de recarga pueden ser usadas como estanques para almacenamiento e infiltración de agua, o ellas pueden ser rellenadas con un material de filtro de arena y grava, sobre una capa de bolones en el fondo. Incluso cuando las fosas sean ocupadas como estanques, es deseable proveer de una capa delgada de arena, al fondo de la fosa, para evitar que el limo obstruya los estratos permeables.
- El fondo de las fosas y la capa superior de arena de filtro, puede requerir periódica limpieza para asegurar una apropiada recarga. Fosas de recarga ubicadas en zonas propensas a la inundación, o en los lechos de los ríos, son probablemente efectivas solo en una corta duración, debido a la fuerte sedimentación. Fosas a los lados de los lechos de los ríos, son probablemente efectivas por periodos más largos.

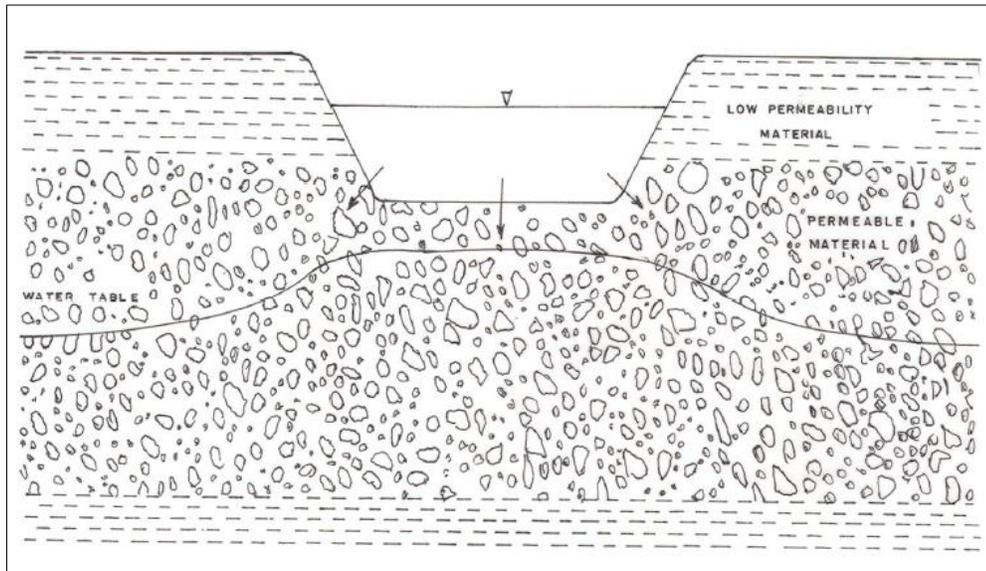


Figura B.7: Diseño esquemático de una fosa de recarga. Fuente: Imagen extraída de Government of India, 2007.

B.3 SISTEMAS DIRECTO AL ACUÍFERO

B.3.1 POZOS DE INYECCIÓN

Son pozos construidos para aumentar el almacenamiento de agua en acuíferos profundos, mediante el suministro de agua, ya sea por gravedad o bajo presión. La efectividad de la recarga en los pozos de inyección está limitada por las características físicas de los acuíferos. Si se aplica excesiva presión al agua inyectada, puede resultar en la colmatación y/o colapso del pozo (Government of India, 2007).

La recarga mediante pozos de inyección incrementa las probabilidades de colmatación del pozo y del material acuífero, resultando en el decrecimiento de las tasas de inyección. La colmatación puede ser causada por los siguientes factores: acumulación de partículas suspendidas y burbujas de aire en la fuente de agua; formación de precipitados químicos en el pozo, en la fuente de agua, o material acuífero; proliferación de bacterias en y alrededor del pozo, abultamiento y dispersión de arcillas en el acuífero. La colmatación puede ser minimizada mediante tratamiento apropiado y remoción de material suspendido desde la fuente de agua, estabilización química y control bacteriano. El tratamiento ácido ayuda en la remoción de precipitados de carbonato de calcio del acuífero. Desarrollo periódico del pozo mediante bombeo puede mejorar considerablemente la eficiencia y vida del mismo (Government of India, 2007).

Cuidado adecuado se debería tomar para garantizar que el agua que está siendo usada para la recarga no esté contaminada. El agua usada para la recarga debería ser compatible con el agua del acuífero para evitar alguna precipitación y resultante colmatación. La temperatura relativa de las aguas de la fuente y del acuífero también afecta en las tasas de recarga (Government of India, 2007).

En Estados Unidos, el agua usada para pozos de inyección es usualmente tratada para satisfacer los estándares de calidad de agua potable por dos razones. Una es para minimizar la colmatación de la interfaz pozo-acuífero, y la otra es para proteger la calidad del agua en el acuífero, especialmente donde esta es bombeada por otros pozos en el acuífero para usos de agua

potable. También, el agua usada para pozos de inyección es, a menudo, clorada y tiene un cloro residual cercano a los 0,5mg/l (Bouwer, 2002).

Los acuíferos no consolidados tienden a ser de textura relativamente más gruesa (arenas y gravas) y a estar saturados; estos materiales no dan la misma mejora de calidad para el agua de recarga que los suelos de textura más fina, no saturados. Así, mientras efluentes de aguas residuales secundarias pueden ser fácilmente ser usadas en sistemas de infiltración superficial para tratamiento de suelo-acuífero y una eventual reutilización potable, los efluentes para pozos de inyección deberían, al menos, recibir un tratamiento terciario (arena de filtración y cloración). Este tratamiento remueve los sólidos suspendidos, el protozoo y los parásitos por filtración; bacterias y virus por cloración, radiación ultravioleta, u otra desinfección. En Estados Unidos el efluente terciario es, a menudo, además procesado con membrana de filtración (micro-filtración y osmosis inversa) para remover algunos patógenos que podrían haber escapado del tratamiento terciario, y también nitrógeno, fósforo, carbón orgánico y otros químicos. Las sales disueltas también son totalmente removidas. Con todas estas remociones, los problemas de colmatación aún ocurren comúnmente cuando esta agua es usada para recarga de agua subterránea mediante pozos (Bouwer, 2002).

Aunque la colmatación de los pozos de recarga puede ser re-desarrollada y rehabilitada con técnicas convencionales, una mejor propuesta es prevenir la grave colmatación bombeando frecuentemente el pozo, por ejemplo, 15min cada una, dos o tres veces al día. El frecuente lavado podría eliminar la necesidad de una membrana de filtración. En un proyecto en Phoenix, Arizona, USA, por ejemplo, pozos de recarga con efluente de aguas residuales después de tratamiento primario y secundario no han mostrado signos de colmatación en 3 años de operación de pozos que fueron bombeados cada 30 min 3 veces por día (Bouwer, 2002).

Las siguientes consideraciones, importantes en el diseño de un pozo de inyección, están citadas del documento Government of India (2007).

- La carga de presión de inyección hidráulica, en términos de columna de agua, se puede establecer como 1,2 veces la profundidad de la parte superior del acuífero confinado. En acuíferos consolidados, sin embargo, esta presión es probablemente mucho mayor. La inyección de agua en presiones que excedan este límite puede resultar en la ruptura de la capa confinante.
- Las tasas de recarga para el acuífero pueden ser establecidas sobre la base de la relación observada de descarga y baja del nivel de agua de los pozos de bombeo existentes en el mismo acuífero. Si se conocen los parámetros del acuífero, las tasas de recarga pueden ser trabajadas de forma empírica mediante fórmulas apropiadas. Sin embargo, es siempre deseable determinar una actual tasa de recarga a través de pruebas en el pozo.
- El diámetro del conducto, tuberías de revestimiento y del pozo, han de determinarse a partir de la tasa de recarga estimada. Usualmente, tuberías con diámetros de 100 mm, 150 mm, 200 mm y 250 mm pueden manejar caudales de hasta 50 m³/hr, 150 m³/hr, 250 m³/hr y 400 m³/hr, respectivamente.
- El material de revestimiento debe ser similar a aquel utilizado en los pozos de producción y debería tener una adecuada resistencia a la tracción. En el caso de tratamiento químico durante el desarrollo del pozo, el revestimiento debería estar hecho de material resistente a la corrosión.

- El pozo de recarga debería estar diseñado para penetrar completamente el acuífero, y así impedir pérdidas de carga, adicionales, debido a una parcial penetración.
- Los pozos de inyección pueden ser diseñados para recargar un solo acuífero o múltiples acuíferos.

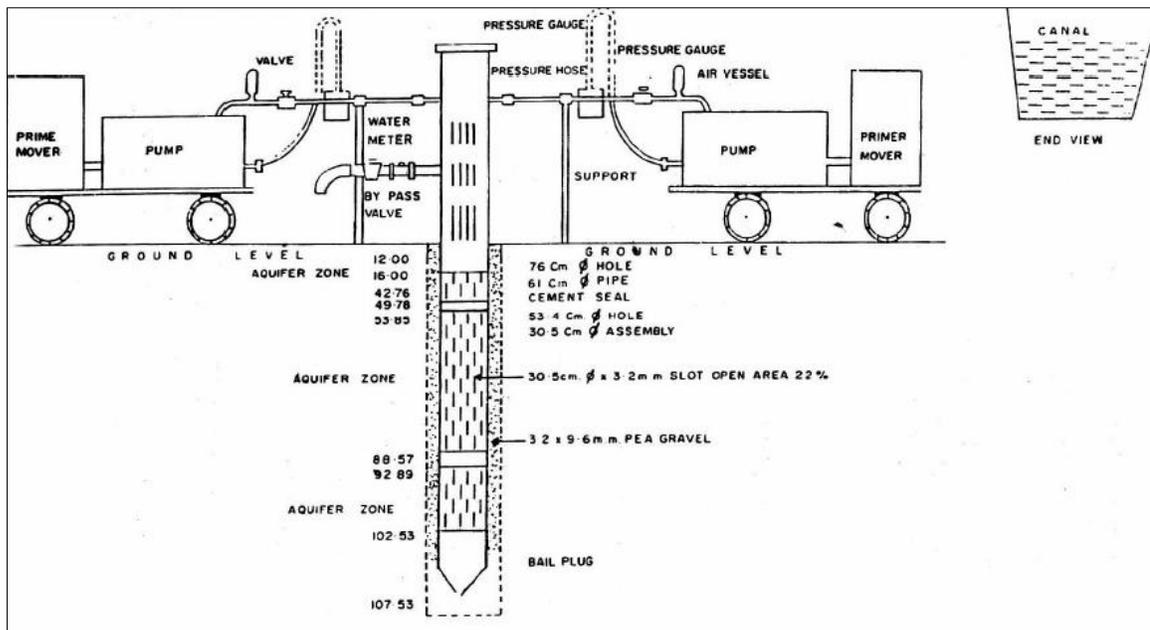


Figura B.8: Diseño esquemático de un pozo de inyección en terreno aluvial. Fuente: Imagen extraída de Government of India, 2007.

B.4.1 ASR (AQUIFER STORAGE AND RECOVERY)

El ASR es cuando el agua es puesta y tomada desde el mismo pozo ya sea para recuperar la pérdida de agua desde un acuífero o para almacenar el agua para temporadas secas (Dillon, 2005).

B.4.2 ASTR (AQUIFER STORAGE TRANSFER AND RECOVERY)

El ASTR es un sistema donde el agua se coloca en un pozo y es retirada desde otro que está más lejos, esto se realiza por el mismo motivo que la ASR, pero además para mejorar la calidad del agua (Dillon, 2005).

B.4.3 RECARGA INDUCIDA

La infiltración inducida necesita de una fuente superficial de agua en contacto con un acuífero. El pozo, a medida que bombea agua subterránea, causa que el agua de la fuente de escurrimiento superficial se infiltre al acuífero, llegando a ser una recarga (Figura 54.3). Este sistema requiere conocer el límite hidráulico entre la superficie y el agua subterránea, además de la calidad del agua superficial y subterránea (UNESCO, 2005).

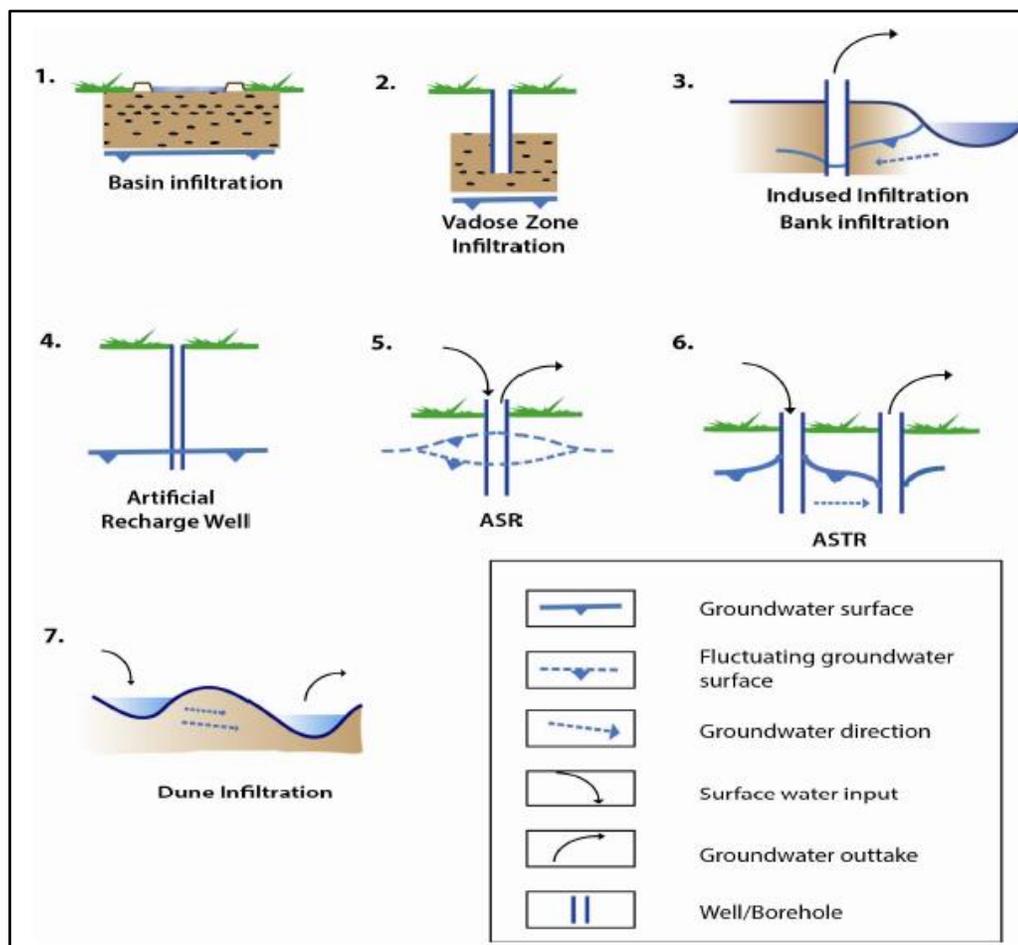


Figura B.9: Diferentes tipos de sistemas de recarga artificial. Fuente: Imagen extraída de Alexson (2013).

ANEXO C: REGISTRO HISTÓRICO NIVELES ESTÁTICOS TALCA

Tabla C.1: Registro histórico de profundidades de niveles estáticos de 9 estaciones, en la ciudad de Talca. Fuente: DGA, en línea.

Estación DGA	Código	UTM Norte (WGS84)	UTM Este (WGS84)	Fecha	Nivel estático (m)
PUEBLO SAN RAFAEL	07372004-4	6090002	270820	26-01-1989	23,50
PUEBLO PANGUILEMO	07373005-8	6085532	266108	26-01-1989	19,50
UNIVERSIDAD CATOLICA	07378005-5	6075691	262452	25-01-1989	16,80
A. P. TALCA	07378006-3	6077239	262664	15-01-1986	17,10
				15-02-1986	17,10
				15-03-1986	16,10
				15-04-1986	15,20
				15-05-1986	15,20
				15-06-1986	15,80

				15-07-1986	16,50
				15-08-1986	16,50
				15-09-1986	16,50
				15-10-1986	16,60
				15-11-1986	16,60
				15-12-1986	17,10
				15-01-1987	17,10
				15-02-1987	17,00
				15-03-1987	16,50
				15-04-1987	16,30
				15-05-1987	15,96
				15-06-1987	16,20
				15-07-1987	16,40
				15-08-1987	16,50
				15-09-1987	16,55
				15-10-1987	16,60
				15-11-1987	16,90
				15-12-1987	16,40
				15-01-1988	16,70
				15-02-1988	16,60
				15-03-1988	16,90
				15-04-1988	16,70
				15-05-1988	16,00
				15-06-1988	16,70
				15-07-1988	16,70
				15-08-1988	16,70
				15-09-1988	16,80
				15-10-1988	16,70
				15-11-1988	16,30
				15-12-1988	17,24
				15-01-1989	17,30
				25-01-1989	16,08
				15-04-1989	16,50
				15-05-1989	17,00
				15-06-1989	16,10
				15-07-1989	16,40
				15-08-1989	16,90
				15-09-1989	16,50
				15-10-1989	16,40
				15-11-1989	16,50
				15-12-1989	20,00
A. P. RIO CLARO	07378007-1	6077583	257100	26-01-1989	6,95
CERVECERIAS UNIDAS CCU	07378008-K	6076241	257641	26-01-1989	8,66
A. P. SAN CLEMENTE	07378009-8	6064475	274723	15-01-1989	13,02
				26-01-1989	13,20
				15-04-1989	13,18
				15-05-1989	13,95
				15-06-1989	14,70

				15-08-1989	15,77
				15-09-1989	16,20
				15-10-1989	15,50
				15-11-1989	14,60
				15-12-1989	13,96
A. P. SAN CLEMENTE	07378010-1	6064593	274493	15-01-1986	14,30
				15-02-1986	14,30
				15-03-1986	13,15
				15-04-1986	13,69
				15-05-1986	14,64
				15-06-1986	13,75
				15-07-1986	12,70
				15-08-1986	13,97
				15-09-1986	13,80
				15-10-1986	13,50
				15-11-1986	13,50
				15-12-1986	13,80
				15-01-1987	13,80
				15-02-1987	13,00
				15-03-1987	12,50
				15-04-1987	13,34
				15-05-1987	15,07
				15-06-1987	15,00
				15-07-1987	14,11
				15-08-1987	14,62
				15-09-1987	14,00
				15-10-1987	13,98
				15-11-1987	13,92
				15-12-1987	13,92
				15-01-1988	12,99
				15-02-1988	12,27
				15-03-1988	12,56
				15-04-1988	12,77
				15-05-1988	13,80
				15-06-1988	14,50
				15-07-1988	14,50
				15-08-1988	14,79
				15-09-1988	15,19
				15-10-1988	14,38
				15-11-1988	13,67
				15-12-1988	13,40
				15-01-1989	12,90
				26-01-1989	14,50
				15-04-1989	13,80
				15-05-1989	19,95
				15-06-1989	14,70
				15-08-1989	15,60
				15-09-1989	16,10

				15-10-1989	16,40
				15-11-1989	14,50
				15-12-1989	13,50
PUEBLO COLIN	07379003-4	6071421	250581	26-01-1989	4,00

ANEXO D: FLUVIOMETRÍA

Tabla D.1: Caudales medios mensuales (m³/s) en Estación Río Lircay en puente las rastras. Fuente: Análisis estadístico de caudales en los ríos de Chile. DGA (1992).

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DICI	ENE	FEB	MAR	ABR-SEPT	OCT-MAR	ANUAL
1950/51	7,29	22,26	19,12	12,16	23,93	37,86	18,21	19,47	10,02	5,34	4,25	4,06	20,44	10,22	15,33
1951/52	2,32	3,74	30,84	50,03	23,83	23,43	12,56	13,13	11,01	6,38	4,33	3,26	22,36	8,44	15,40
1952/53	2,97	14,25	20,04	22,39	12,60	12,57	7,32	5,70	5,30	4,13	1,59	1,39	14,14	4,24	9,19
1953/54	1,03	15,34	10,83	27,52	61,07	73,70	23,27	24,15	14,71	8,85	6,56	4,98	31,58	13,75	22,67
1954/55	5,67	5,73	27,02	32,03	20,62	12,80	5,70	8,56	5,84	3,52	1,36	1,30	17,31	4,38	10,84
1955/56	1,52	3,97	30,56	15,08	16,70	16,51	8,02	8,03	5,50	4,57	2,65	2,53	14,06	5,21	9,64
1956/57	2,27	5,06	4,59	12,29	35,83	18,44	14,09	13,81	6,43	5,17	3,91	3,50	13,08	7,82	10,45
1957/58	1,08	5,76	7,45	16,70	31,28	11,26	6,88	10,07	5,41	2,55	30,57	2,56	12,25	9,67	10,96
1958/59	1,74	5,57	23,00	31,18	34,74	21,30	9,18	9,60	5,18	6,59	4,62	3,56	19,59	6,46	13,02
1959/60	22,86	17,63	25,78	45,50	20,24	33,87	8,88	10,14	5,50	5,42	4,58	3,99	27,65	6,42	17,03
1960/61	3,18	2,92	12,18	17,07	14,01	12,46	9,18	8,98	5,49	4,35	1,58	8,77	10,30	6,39	8,34
1961/62	2,34	1,67	8,21	20,88	19,47	53,99	32,37	17,69	9,49	0,87	0,89	1,29	17,76	10,43	14,10
1962/63	1,63	1,47	10,60	7,59	15,20	5,71	11,10	2,06	0,50	4,71	0,76	1,33	7,03	3,41	5,22
1963/64	0,63	3,47	5,03	31,80	37,60	39,10	22,50	40,03	5,86	1,12	0,57	1,29	19,61	11,90	15,75
1964/65	0,93	1,25	3,83	8,58	11,80	11,70	4,63	0,80	22,04	9,25	5,91	0,38	6,35	7,17	6,76
1965/66	15,30	23,09	16,20	66,10	64,50	17,70	24,20	12,30	6,27	1,59	0,58	0,89	33,81	7,64	20,73
1966/67	5,39	6,66	44,50	42,60	22,50	18,80	12,60	10,90	14,90	8,25	4,55	4,16	23,41	9,23	16,32
1967/68	2,87	6,93	6,29	8,35	9,89	12,50	17,40	5,49	4,26	2,43	1,02	0,36	7,81	5,16	6,48
1968/69	0,76	1,48	1,80	2,15	3,27	1,25	1,80	1,09	1,43	1,02	1,04	1,36	1,79	1,29	1,54
1969/70	1,52	10,10	44,20	24,00	25,00	13,40	4,43	4,73	5,59	3,94	2,40	1,08	19,70	3,70	11,70
1970/71	1,24	5,51	16,80	25,90	20,00	12,20	9,60	13,80	6,26	3,07	3,70	1,30	13,61	6,29	9,95
1971/72	2,85	24,79	16,30	32,70	27,80	15,30	9,93	6,37	4,78	2,82	1,09	3,31	19,96	4,72	12,34
1972/73	1,56	61,50	77,90	28,20	76,40	39,30	35,40	17,70	11,00	8,32	5,87	6,54	47,48	14,14	30,81
1973/74	24,88	14,73	53,54	105,71	12,30	6,14	12,30	7,30	3,56	2,58	26,61	26,02	36,22	13,06	24,64
1974/75	15,00	4,99	74,03	23,29	15,61	42,37	28,77	34,58	21,86	22,71	22,98	3,58	29,22	22,41	25,81
1975/76	4,73	8,83	39,89	37,93	19,48	12,66	4,83	10,23	5,84	4,03	2,81	2,47	20,59	5,04	12,81
1976/77	3,22	2,05	23,61	14,91	12,79	13,06	19,22	17,27	7,52	3,16	2,10	2,16	11,61	8,57	10,09
1977/78	1,71	3,77	18,10	60,00	36,40	15,20	14,20	23,40	11,90	8,65	9,04	7,79	22,53	12,50	17,51
1978/79	3,66	6,46	14,40	61,71	9,24	27,40	17,60	19,90	7,85	4,86	2,91	6,63	20,48	9,96	15,22
1979/80	3,21	3,86	1,40	29,00	54,60	29,10	7,28	8,45	10,70	4,11	4,00	3,13	20,20	6,28	13,24
1980/81	19,72	36,30	48,10	41,40	22,40	6,71	6,91	6,82	6,61	6,85	4,69	4,80	29,10	6,11	17,61
1981/82	4,41	30,97	24,30	22,20	28,20	19,00	7,41	7,53	3,86	3,11	1,60	1,89	21,51	4,23	12,87
1982/83	4,84	15,00	66,00	67,10	36,80	33,33	37,10	26,10	15,20	10,50	7,92	6,06	37,18	17,15	27,16
1983/84	4,56	5,87	12,80	25,40	19,50	17,50	12,10	10,30	5,08	4,71	3,88	2,83	14,27	6,48	10,38
1984/85	1,99	12,60	15,60	66,88	20,40	28,70	29,30	26,00	15,90	9,87	8,34	5,56	24,36	15,83	20,09
1985/86	8,95	15,90	7,95	32,80	9,65	8,69	20,40	13,10	8,19	6,61	5,71	2,94	13,99	9,49	11,74
1986/87	8,82	25,80	105,00	19,80	36,00	17,00	10,40	16,40	8,69	8,71	6,11	3,47	35,40	8,96	22,18
1987/88	2,93	3,83	5,96	62,00	41,20	25,50	23,40	15,00	8,98	8,02	5,89	4,81	23,57	11,02	17,29
1988/89	5,21	1,54	10,00	16,50	32,90	14,50	7,09	9,16	7,36	7,47	3,11	1,41	13,44	5,93	9,69
1989/90	1,34	0,68	2,34	8,29	27,40	14,70	5,08	5,22	5,79	5,64	1,97	1,87	9,13	4,26	6,69
Prom.	5,20	11,08	24,65	31,89	26,58	21,17	14,32	13,03	8,19	5,65	5,35	3,76	20,10	8,38	14,24
Desv.	5,94	11,93	23,24	21,39	15,67	14,08	9,02	8,48	4,71	3,74	6,52	4,08	9,51	4,21	6,27
C. Var.	1,14	1,08	0,94	0,67	0,59	0,67	0,63	0,65	0,58	0,66	1,22	1,09	0,47	0,50	0,44
Máximo	24,88	61,50	105,00	105,71	76,40	73,70	37,10	40,03	22,04	22,71	30,57	26,02	47,48	22,41	30,81
Mínimo	0,63	0,68	1,40	2,15	3,27	1,25	1,80	0,80	0,50	0,87	0,57	0,36	1,79	1,29	1,54