



**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

**INVESTIGACIÓN RECARGA ARTIFICIAL DE
ACUÍFEROS CUENCAS DEL RÍO CHOAPA Y
QUILIMARÍ, REGIÓN DE COQUIMBO**

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

S.I.T. N°292

Santiago, Diciembre de 2012

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

**Ministra de Obras Públicas
Abogada Sra. Loreto Silva Rojas**

**Director General de Aguas
Abogado Sr. Francisco Echeverría Ellsworth**

**Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Adrián Lillo Zenteno**

**Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Miguel Caro Hernández**

**Profesional DGA
Ingeniero Constructor Sr. Horacio Aguirre Zepeda**

AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.:

**Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Guillermo Cabrera Fajardo**

**Profesionales
Ingeniero Civil Sergio Matus García
Ingeniero Civil Lem Mimica Viladrich
Ingeniero Civil Iván Rivera Romero
Ingeniero Civil Javiera Pérez Jara
Ingeniero Civil Josefina León Salas**

ÍNDICE

Pág.

1	OBJETIVOS.....	1
2	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	2
3	IDENTIFICACIÓN PRELIMINAR SECTORES CON POTENCIALIDAD DE RECARGA ARTIFICIAL ...	2
3.1	Cuenca del Río Choapa.....	2
3.2	Cuenca del Río Quilimarí.....	3
4	LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA.....	5
4.1	Catastro de Captaciones.....	5
4.2	Prospecciones Geofísicas Cuenca del Río Choapa.....	6
4.3	Prospecciones Geofísicas Cuenca del Río Quilimarí.....	7
4.4	Análisis de Calidad de Aguas.....	7
5	ANTECEDENTES TÉCNICOS Y LEGALES GENERALES DE LA RECARGA ARTIFICIAL.....	8
5.1	Código de Aguas.....	8
5.2	Reglamento del Código de Aguas.....	10
5.3	Consideraciones relacionadas con el otorgamiento y el ejercicio del derecho.....	11
5.4	Mecanismos Jurídicos para la Operación de los Proyectos.....	11
6	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DETALLADA.....	13
6.1	Resultados Mediciones Geofísicas.....	13
6.1.1	Cuenca del Río Choapa.....	13
6.1.2	Cuenca del Río Quilimarí.....	13
6.2	Prospecciones (Pozos Someros Excavados).....	14
6.3	Determinación de Parámetro Característicos.....	14
6.4	Análisis de Niveles Freáticos.....	17
7	MODELACIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LOS SISTEMAS HÍDRICOS.....	19
7.1	Cuenca del Río Choapa.....	19
7.2	Cuenca del Río Quilimarí.....	21
8	IDENTIFICACIÓN DE SECTORES CON POTENCIALIDAD PARA RECARGA ARTIFICIAL.....	22
9	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA RECARGA ARTIFICIAL.....	27
10	EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS SELECCIONADAS.....	27
10.1	Proyecto CH-4.....	28
10.2	Proyecto CH-3.....	30
10.3	Comparación de Alternativas.....	32
11	PROPUESTA DE PROYECTO PILOTO.....	33
12	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	33

1 OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo ha sido la identificación de zonas de infiltración relevantes de los acuíferos de las cuencas del Choapa y Quilimarí para la implementación de obras de recarga artificial en el cauce principal o en otros sectores que se proponga.

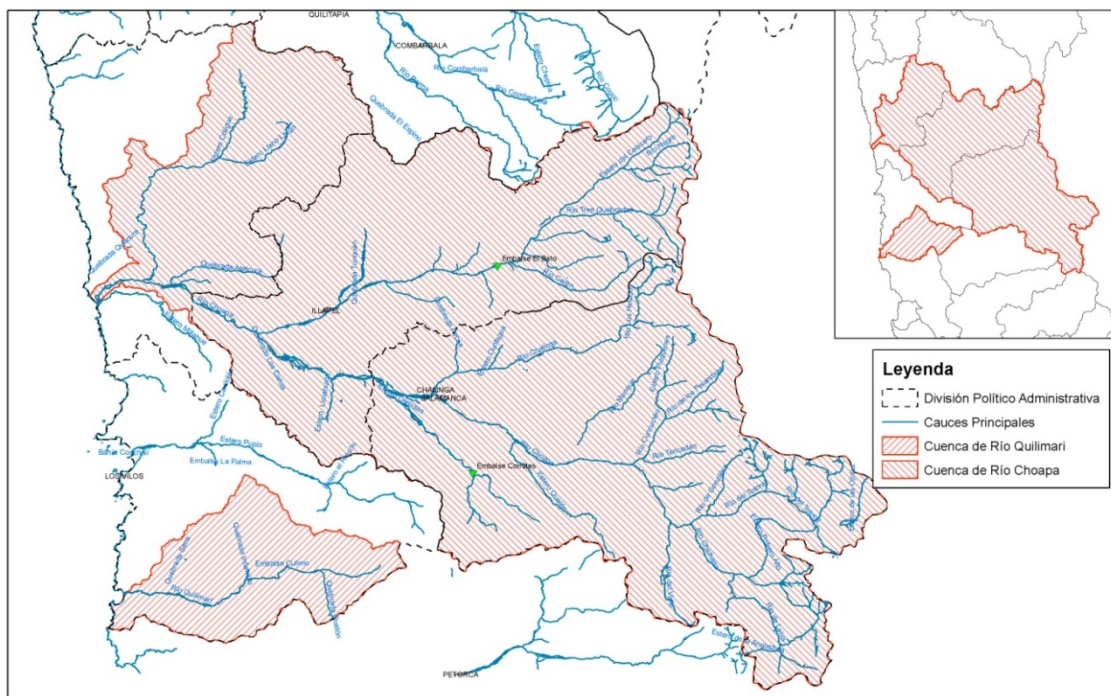
Los objetivos específicos fueron los siguientes.

- Efectuar una revisión de la información hidrológica e hidrogeológica disponible.
- Complementar las evaluaciones hidrológicas e hidrogeológicas existentes y realizar nuevas si no existieran.
- Identificar sectores con potencialidad para implementar recarga artificial.
- Realizar un catastro de niveles de agua subterránea. Efectuar Pruebas de infiltración.
- Efectuar una caracterización detallada en los sectores seleccionados para recarga.
- Generar un mapa de las zonas con potencialidad para recarga con sus parámetros característicos.
- Identificar las distintas opciones técnicas aplicables en las zonas para recarga artificial.
- Evaluar técnica y económicamente las alternativas de recarga.
- Desarrollar las especificaciones técnicas para la implementación de un proyecto piloto.

En la Figura 1-1 se muestra la ubicación de las cuencas que conforman el área de estudio.

Figura 1-1

Mapa de Ubicación del Área de Estudio, Provincia de Choapa – Región de Coquimbo



2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Se recopiló y analizó la información contenida en estudios realizados previamente en el área de estudio; principalmente en las áreas de hidrología e hidrogeología.

De la veintena de estudios recopilados destacan:

1. Mejoramiento de Aguas Subterráneas para Riego Ligua y Petorca. CNR – GCF Ingenieros, 2011-2012.
2. Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Choapa: Informe Técnico, DGA – DARH, SDT N°248, 2007.
3. Aplicación de Metodologías para Determinar la Eficiencia de Uso del Agua, Estudio de Caso en la Región de Coquimbo. Cazalac, Diciembre de 2006.
4. Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable de Aguas Subterráneas en la Cuenca del Río Quilimarí. S.I.T. N°152. Departamento de Administración de Recursos Hídricos, DGA – MOP, Octubre de 2008.

3 IDENTIFICACIÓN PRELIMINAR SECTORES CON POTENCIALIDAD DE RECARGA ARTIFICIAL

Los principales criterios utilizados para la selección fue que los sectores se ubicaran aguas abajo de los embalses (El Bato y Corrales en la cuenca del río Choapa y Culimo en la cuenca del río Quilimarí) y que se tratara de áreas vecinas al lecho de los cauces (Choapa, Illapel, Quilimarí y afluentes), donde se observase espacio disponible como para construir obras de recarga de acuíferos mediante dispositivos superficiales (lagunas de infiltración), que de acuerdo a las características del área y a la experiencia del Consultor en estudios similares, resultasen más convenientes que los dispositivos de recarga profunda (pozos de inyección).

El total de sitios identificados fue de 12 (6 en la cuenca del río Choapa y 6 en la cuenca del río Quilimarí, Ver Figuras 3-1 y 3-2).

Posteriormente, se realizó un recorrido de las cuencas, para identificar nuevos sectores (se agregó uno en la cuenca del río Quilimarí) y para verificar las características y validar o desechar los sectores definidos preliminarmente.

3.1 Cuenca del Río Choapa

La cuenca del río Choapa cuenta con dos embalses para regular los recursos que se usan en riego, el embalse Corrales sobre el estero Camisas y el embalse El Bato sobre el río Illapel. Estas obras le dan seguridad de riego a las áreas agrícolas que abastecen y permiten que el proceso de recarga natural por excedentes de riego se produzca de manera relativamente estable y continua.

Si se considera además que, desde el punto de vista del uso de las aguas subterráneas, la cuenca está subexplotada y en general tiene un valle estrecho, con algunos angostamientos, que hacen más superficiales los niveles freáticos, generando incluso afloramientos en varios sectores, se puede afirmar que generar proyectos de recarga artificial en esta cuenca no parece necesario y no será sencillo, pues deben conjugarse varios factores, como por ejemplo: disponibilidad de aguas superficiales para ser infiltradas, disponibilidad de terrenos ribereños para emplazar las obras, capacidad de infiltración adecuada de los terrenos, niveles freáticos suficientemente profundos como para que las aguas infiltradas puedan ser recibidas en el acuífero y se mantengan como tales sin aflorar unos pocos metros aguas abajo.

En atención esto es que se realizó en esa etapa el recorrido de terreno para identificar sectores que cumplan al menos las condiciones físicas (disponibilidad de espacio) para luego, en etapas posteriores del estudio, determinar mediante pruebas de terreno la capacidad de infiltración y mediante la modelación hidrogeológica, caracterizar el comportamiento que tendrían los diferentes sectores identificados frente a la recarga artificial.

En la Figura 3-1 se muestran los sectores visitados en la cuenca del río Choapa.

3.2 Cuenca del Río Quilimarí

Esta cuenca, a diferencia de la del río Choapa, es muy deficitaria en recursos superficiales, principalmente por tratarse de una cuenca pluvial, por las bajas precipitaciones registradas en la zona, especialmente los últimos años y porque se han constituido derechos de aguas subterráneas, por caudales del orden de los 150 l/s en una cuenca evidentemente escasa, en captaciones que se ubican justo aguas arriba del embalse, sin considerar el efecto que ellos tienen sobre los flujos que alimentan el embalse.

El valle del río Quilimarí aguas abajo del embalse es bastante estrecho, con un cauce no muy desarrollado y numerosos angostamientos que generan pequeños acuíferos independientes que, cuando hay agua disponible, afloran al encontrarse con los macizos rocosos que se acercan a la superficie, incluso quedando a la vista en varios de ellos.

Desde el punto de vista de las condiciones del terreno para implementar obras de recarga artificial, la cuenca presenta características muy singulares. Tal como se indicó, los angostamientos generan sectores acuíferos independientes, por lo que las aguas recargadas tenderán a aflorar en el próximo angostamiento. Esto hace que el objetivo de la recarga de acuíferos en este caso deba ser entendido en un sentido más amplio, cobrando importancia el hecho de retardar el flujo de las aguas de invierno hacia la zona costera, permitiendo disponer de ellas en el período donde el riego es más intenso.

Se realizó el recorrido de terreno y se identificó los sectores aptos para implementar obras de recarga. Sin embargo, en esta cuenca el problema principal es la disponibilidad de agua para recarga, lo que condiciona la factibilidad de los proyectos que serán elaborados.

En la Figura 3-2 se muestran los sectores visitados en la cuenca del río Quilimarí.

4 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

4.1 Catastro de Captaciones

Con el objeto de generar información de niveles freáticos, se hizo un catastro de captaciones de aguas subterráneas en el área de estudio, específicamente en los sectores que se ubican aguas abajo de los embalses de riego en las cuencas de Choapa y Quilimarí.

Los catastros desarrollados permitieron obtener un registro de niveles, caudales y de las principales características de los pozos y norias existentes en la zona.

Como resultado de los catastros se identificó un total de 315 captaciones de aguas subterráneas, distribuidas de acuerdo a lo que se indica:

Total Captaciones Choapa:	222
Total Captaciones Quilimarí:	93
Total Captaciones Catastradas:	315

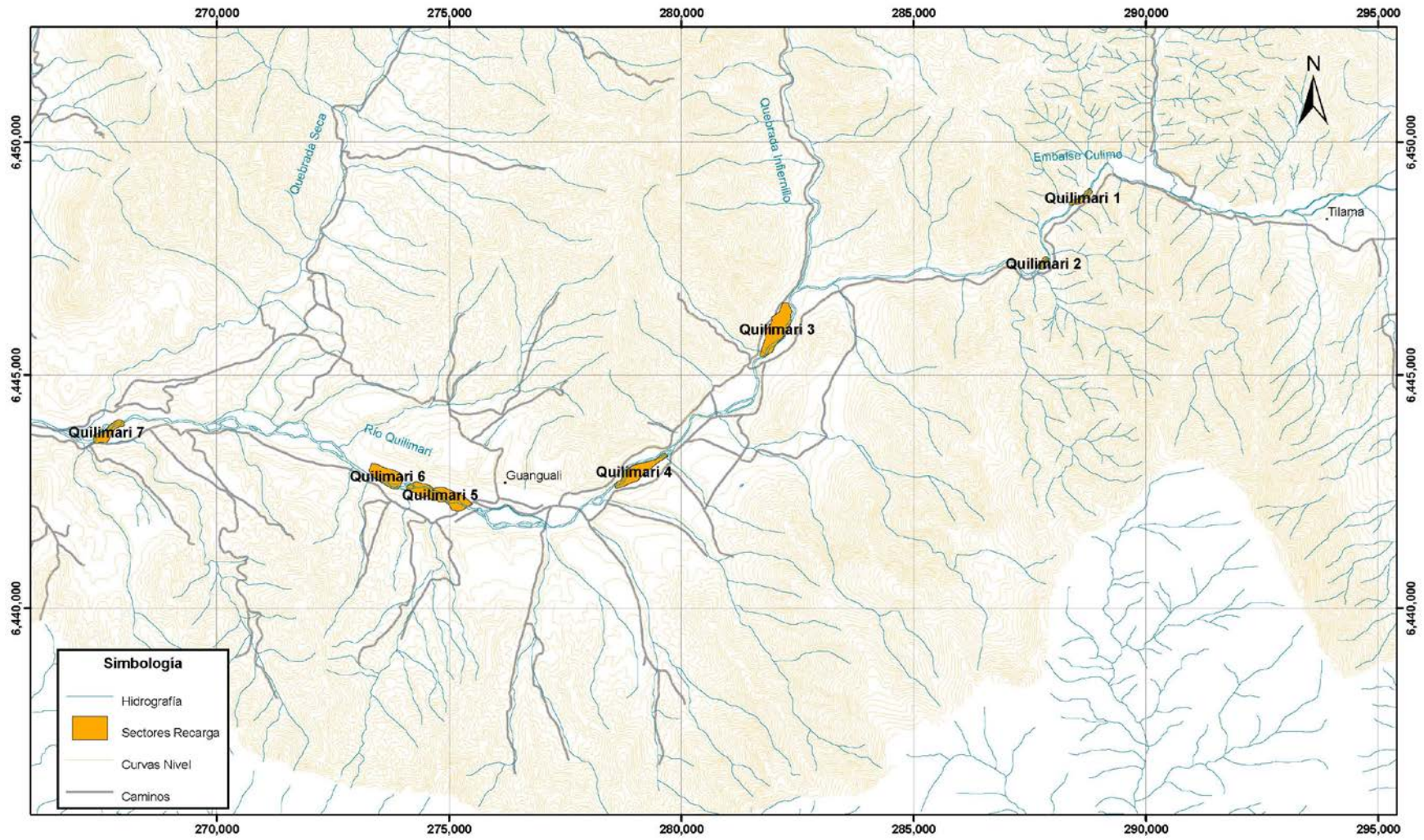
Choapa:	Total Pozos:	49
	Total Norias:	172
	<u>Sin Inform.:</u>	<u>1</u>
	Total:	222

Quilimarí:	Total Pozos:	11
	Total Norias:	74
	<u>Sin Inform.:</u>	<u>8</u>
	Total:	93

Respecto a la situación de niveles estáticos, en el caso de la cuenca del Choapa, en la gran mayoría de las captaciones se midieron entre 0 y 5 m, registrándose sólo unos pocos casos específicos sobre dicho valor y hasta 15 m.

En el caso de Quilimarí, los niveles estáticos se ubican a profundidades que varían entre 1 y 18 m, mostrando más dispersión.

Figura 3-2
Sectores de Interés para Proyectos de Recarga
Cuenca del Río Quilimarí



4.2 Prospecciones Geofísicas Cuenca del Río Choapa

Se desarrolló una campaña de prospecciones geofísicas en el área de estudio, tendiente a definir la profundidad de la roca, los niveles de napa y las características de los rellenos.

En la cuenca del río Choapa se registró 80 estaciones TEM y 80 estaciones Nano TEM, con espaciamiento irregular, dispuestas a lo largo de los cauces de los ríos Choapa e Illapel.

Se identificó la existencia de entre 2 y 5 unidades geoelectricas que se pueden describir, hidrogeológicamente, de la siguiente forma:

- La unidad más superficial que está constituida por sedimentos secos, de diferentes granulometrías, donde predominan los materiales más gruesos, del tipo gravas.
- Bajo la unidad descrita se ubica una segunda unidad que estaría conformada por sedimentos húmedos o saturados.
- Se identificó una tercera unidad, formada por sedimentos de baja permeabilidad.
- También, una cuarta unidad de sedimentos saturados que constituiría el acuífero.
- La quinta unidad identificada correspondería a la roca basal.

4.3 Prospecciones Geofísicas Cuenca del Río Quilimarí

Se desarrolló una campaña de prospecciones geofísicas en el área, tendiente a definir la profundidad de la roca, los niveles de napa y las características de los rellenos.

Se registró un total de 40 estaciones Nano TEM, con espaciamiento irregular, dispuestas en el eje de la quebrada.

Se identificó la existencia de entre 5 unidades geoelectricas, que desde el punto de vista geofísico corresponden a:

- Unidad Somera Media – Alta Resistividad.
- Unidad Conductora.
- Unidad de Media Resistividad.
- Unidad Conductora Profunda.
- Unidad Alta Resistividad.

4.4 Análisis de Calidad de Aguas

Se realizó una campaña de muestreos, de aguas superficiales y subterráneas, para caracterizar la calidad de las aguas potencialmente infiltrables y de las aguas receptoras de la recarga. Las muestras fueron analizadas considerando los parámetros de la norma de riego (NCh. 1333).

Los resultados se muestran en la Tabla 4.4-1 en la página siguiente. La muestra superficial del río Quilimarí no pudo tomarse por encontrarse seco el cauce.

Se puede señalar respecto a los resultados de los análisis, que en general las aguas son de buena calidad para riego. De hecho, salvo un parámetro en una muestra (% de Sodio en una de las muestras de aguas subterráneas de Quilimarí), el resto, cumple en la totalidad de los parámetros con los límites establecidos por la norma NCh 1333.

Además, al comparar la calidad de las aguas superficiales, que sería el agua a infiltrar, con la calidad de las aguas subterráneas, que sería la receptora de la recarga, se observa que son muy similares, por lo que no habría deterioro en la calidad de las aguas subterráneas luego del proceso, ni necesidad de tratamiento químico previo sobre las aguas superficiales para evitar un eventual deterioro de la calidad de las aguas subterráneas.

5 ANTECEDENTES TÉCNICOS Y LEGALES GENERALES DE LA RECARGA ARTIFICIAL

5.1 Código de Aguas

En la modificación efectuada en el año 2005 se incorpora el concepto de recarga artificial:

Art. 66. La Dirección General de Aguas podrá otorgar provisionalmente derechos de aprovechamiento en aquellas zonas que haya declarado de restricción. En dichas zonas, la citada Dirección limitará prudencialmente los nuevos derechos pudiendo incluso dejarlos sin efecto en caso de constatar perjuicios a los derechos ya constituidos. Sin perjuicio de lo establecido en el inciso primero del artículo 67, y no siendo necesario que anteriormente se haya declarado área de restricción, previa autorización de la Dirección General de Aguas, cualquier persona podrá ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, teniendo por ello la preferencia para que se le constituya un derecho de aprovechamiento provisional sobre las aguas subterráneas derivadas de tales obras y mientras ellas se mantengan.

Art. 67. Los derechos de aprovechamiento otorgados de acuerdo al artículo anterior, se podrán transformar en definitivos una vez transcurridos cinco años de ejercicio efectivo en los términos concedidos, y siempre que los titulares de derechos ya constituidos no demuestren haber sufrido daños. Lo anterior no será aplicable en el caso del inciso segundo del artículo Art. 66, situación en la cual subsistirán los derechos provisionales mientras persista la recarga artificial. La Dirección General de Aguas declarará la calidad de derechos definitivos a petición de los interesados y previa comprobación del cumplimiento de las condiciones establecidas en el inciso precedente.

Tabla 4.4-1
Resultados de los Análisis de Calidad de Aguas

Parámetro	Unidad	Límite Norma	Resultados por Fuente								
			Río Illapel	Pz APR Cárcamo	Noria Sr. Mesa	Río Choapa	APR Panguecillo	APR Jorquera	Río Quilimarí	Noria L. Geraldo	Noria J. Acosta
			Inf. N°128255	Inf. N°128256	Inf. N°128253	Inf. N°128258	Inf. N°128257	Inf. N°128254	-	Inf. N°117712	Inf. N°117714
Cloruros	mg/L Cl	200	9.7	15.3	10.5	24.2	45.8	18.6		24.8	30.8
Cianuro Total	mg/L CN	0.20	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02		<0.02	<0.02
Fluoruro	mg/L F	1.00	<0.20	0.25	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20		0.32	0.38
pH Laboratorio	unidad	5,5-9,0	8.21 (17.6°C)	8.09 (18.6°C)	8.06 (18.5°C)	8.67 (18.6°C)	8.03 (18.3°C)	8.10 (17.4°C)		7.21 (22.1°C)	7.60 (22.2°C)
Sulfato disuelto	mg/L SO4	250	27.0	49.0	52.0	47.0	54.0	54.0		82.7	86.8
Plata	mg/L Ag	0.20	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002		<0.002	<0.002
Aluminio	mg/L Al	5.00	0.040	<0.010	<0.010	0.066	<0.010	0.013		0.022	0.138
Arsénico	mg/L As	0.10	0.004	0.006	<0.001	0.006	0.004	0.005		0.002	0.004
Bario	mg/L Ba	4.00	0.972	0.011	0.019	0.020	0.036	0.152		0.031	0.059
Berilio	mg/L Be	0.10	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002		<0.0002	<0.0002
Boro	mg/L B	0.75	0.038	0.123	0.141	0.188	0.188	0.162		0.098	0.020
Cadmio	mg/L Cd	0.01	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	0.002		<0.001	0.001
Cobalto	mg/L Co	0.05	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005		<0.005	<0.005
Cromo	mg/L Cr	0.10	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005		<0.005	0.014
Cobre	mg/L Cu	0.20	<0.005	0.028	0.006	<0.005	0.007	0.019		0.026	0.011
Hierro	mg/L Fe	5.00	0.168	0.453	0.293	0.074	0.030	0.716		0.032	3.93
Mercurio	mg/L Hg	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001		<0.001	<0.001
Litio	mg/L Li	2.50	<0.003	<0.003	<0.003	0.007	0.006	0.008		<0.003	<0.003
Manganeso	mg/L Mn	0.20	0.20	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	<0.001		0.003	0.804
Molibdeno	mg/L Mo	0.01	<0.005	0.006	0.007	<0.005	0.006	<0.005		<0.005	0.007
Níquel	mg/L Ni	0.20	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005		<0.005	<0.005
Plomo	mg/L Pb	5.00	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010		<0.010	<0.010
Selenio	mg/L Se	0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005		<0.005	<0.005
Vanadio	mg/L V	0.10	<0.008	<0.008	0.016	<0.008	0.015	0.015		0.018	0.013
Cinc	mg/L Zn	2.00	<0.002	0.102	0.004	<0.002	0.014	0.257		0.090	0.050
% de Sodio	% Na	35.0	16.4	21.5	15.0	20.0	23.5	17.7		44.6	20.9
Colif. Fecales	NMP/100 MI	1000	79	<1.8	<1.8	23	<1.8	<1.8		<1.8	17
Nitrato	mg/L N-N03		1.30	1.61	<0.10	0.81	1.66	1.00		<0.20	<0.20
Calcio	mg/L Ca		42.4	50.5	40.7	53.5	52.0	64.1		36.0	77.9
Potasio	mg/L K		0.42	1.14	1.44	1.32	2.18	2.04		4.19	4.13
Magnesio	mg/L Mg		4.81	11.1	14.5	8.96	13.8	14.1		19.9	32.1
Sodio	mg/L Na		11.4	21.8	13.2	19.8	26.8	21.8		65.6	40.2
Alcalinidad	mg/L CaCO3		132.0	174.0	86.0	111.0	78.0	138.0		250.0	290.0
Conductividad	us/cm		351.0	493.0	388.0	403.0	474.0	432.0		655.0	731.0
Dureza Teórica	mg/L CaCO3		126.0	172.0	161.0	170.0	186.0	218.0		172.0	133.0
RAS	-		0.44	0.72	0.45	0.66	0.85	0.64		2.18	1.66
SDT	mg/L		256.0	364.0	272.0	298.0	348.0	364.0		456.0	518.0
SST	mg/L		<5.0			<5.0					

Captación Superficial
Captación Subterránea

Dependiendo del tipo de solución que se desarrolle, particularmente en el caso de obras superficiales, puede ser necesaria la obtención de permisos o autorizaciones.

En el caso de las obras consideradas en el art. 294, denominadas obras mayores, se establecen exigencias relacionadas con la supervisión durante la construcción de las obras y el establecimiento de garantías; que es necesario tener presente si las obras a proyectar o construir quedan comprendidas dentro de estas especificaciones.

Cualquier utilización del recurso hídrico asociada a este tipo de proyectos requiere contar con los derechos correspondientes. La obtención de los derechos puede hacerse por la vía administrativa, judicial en el caso de regularización o bien por la compra de ellos.

No obstante existen situaciones especiales en las cuales el uso es permitido bajo ciertas condiciones, como en el caso de las aguas pluviales; situación que requiere una evaluación cuidadosa y detallada.

5.2 Reglamento del Código de Aguas

El Reglamento de Aguas Subterráneas (Res DGA N° 425, 2007) establece:

“Artículo 34º. Para los efectos de lo dispuesto en los artículos 66 inciso segundo y 67 inciso primero parte final, ambos del Código de Aguas, quienes deseen ejecutar obras de recarga artificial de acuíferos, deberán entregar una memoria técnica que contenga, a lo menos, lo siguiente:

- a) Descripción del sistema de recarga artificial.*
- b) Descripción de la naturaleza física y situación jurídica del agua a utilizar en la recarga artificial.*
- c) Descripción del sitio de recarga.*
- d) Características geológicas e hidrogeológicas del sector.*
- e) Características de la zona no saturada.*
- f) Características de acuífero.*
- g) Velocidad y dirección del flujo.*
- h) Comportamiento histórico de los niveles de agua en el sector.*
- i) Calidad del agua.*
- j) Impactos asociados a la obra de recarga artificial, área de influencia de la recarga artificial, impactos calculados, análisis de domos e impacto sobre la calidad del agua.*
- k) Plan de monitoreo, que contemple al menos:*
 - 1. Monitoreo del nivel de las aguas.*
 - 2. Monitoreo de la calidad de las aguas.*
 - 3. Control del caudal de recarga.*
 - 4. Control de extracciones.*
- l) Plan de contingencia, que contemple al menos:*

1. *Medidas de protección del acuífero.*
2. *Planes de alerta ante impactos no deseados.”*

5.3 Consideraciones relacionadas con el otorgamiento y el ejercicio del derecho

Los derechos que se constituyen como resultado de la operación de una obra de recarga artificial son de carácter provisional, así se soliciten en un área abierta, declarada de restricción e incluso de prohibición. La cuantía del derecho no queda condicionada al concepto de derechos provisionales que establece el art. 66, sino que se liga con los volúmenes que el sistema es capaz de infiltrar al acuífero.

Ya que no es posible otorgarlos en zonas de prohibición, debiera considerarse el beneficio global que genera un proyecto de recarga artificial al sistema de agua subterránea, y analizar la posibilidad de aceptar que sea factible implementar proyectos de recarga artificial en estas zonas, aplicando criterios y normas equivalentes a las que el Código de Aguas establece para áreas abiertas y de restricción. En efecto, ya que una parte o fracción de los volúmenes de esta recarga son los que se extraerán como derechos provisionales, el resto tendrá como destino mejorar la condición de la napa subterránea en esta área de prohibición, lo que evidentemente será algo positivo para este sistema.

5.4 Mecanismos Jurídicos para la Operación de los Proyectos

Debido a que los proyectos de recarga artificial podrían implementarse en cuencas donde los acuíferos están en áreas de restricción desde el punto de vista legal, en esos casos será necesario que se forme una Comunidad de Aguas Subterráneas a la que pertenezcan todos los posibles beneficiarios de cada proyecto. El Código de Aguas establece los requerimientos, estructura y procedimientos que deben cumplir estas comunidades.

Por otra parte, el análisis técnico con el que se desarrollan los proyectos de recarga artificial, consiste en evaluar la disponibilidad de agua superficial para infiltración a través de la modelación de balances hídricos, basados en establecer las demandas de agua en los valles y la disponibilidad para suplirlas, tanto superficial como subterránea.

Sin embargo, desde el punto de vista jurídico, el requerimiento de los futuros proyectos, de contar con el agua para infiltrarla, requiere disponer de los derechos que respalden las cifras de caudales previamente determinadas. Hay que recordar que los derechos de agua superficial contemplados en estos proyectos corresponden a caudales medios mensuales, de uso consuntivo y ejercicio eventual y discontinuo.

Puesto que será difícil conseguir derechos de agua superficial, las alternativas se reducen a: adquirir derechos de terceros, canales cercanos a los proyectos, o bien buscar un mecanismo que permita utilizar las aguas servidas tratadas de centros urbanos cercanos a los proyectos.

Contando legalmente con el agua para infiltrar y con el financiamiento, se analiza la pertinencia de ingresar al SEIA, lo que en general no se necesita, tal como se confirma de los análisis ambientales efectuados en estudios previos (“Mejoramiento de Aguas Subterráneas para Riego Ligua y Petorca, CNR 2012). Alcanzada esta instancia, el proyecto estará en condiciones de ser presentados a la autoridad para su revisión, corrección y aprobación.

Debe indicarse que cada proyecto de recarga artificial debiera tener: obras de infiltración o recarga, pozos de monitoreo para control de niveles y calidad de agua, y pozos de producción, que recuperarán una fracción del agua infiltrada, para ser usada en nuevas áreas y en mejorar la seguridad de riego actual de áreas en uso. En la presentación del proyecto debe incluirse planes de monitoreo del sistema, plan de operación y mantenimiento, plan de contingencias y plan de abandono. Una vez aprobado el proyecto, se construirá las obras de recarga y los pozos de monitoreo. Los pozos de producción se construirán posteriormente.

La operación de la red de monitoreo de control de niveles y de calidad, como parte del plan de monitoreo del sistema, se debe iniciar tan pronto sea posible luego de la aprobación de la construcción de las obras, para establecer la línea base ambiental. Esta red consistirá en a lo menos 5 pozos tipo piezómetro, desde los cuales se pueda tomar muestras de agua, además de medir los niveles de napa. De ellos, 2 estarán aguas abajo de la obra de recarga, a menos de 100 m, para controlar la influencia que tendrá la recarga junto a la obra una vez que entre en operación. El resto de los pozos de control se perforarán en el área desde donde se extraerán los caudales de los pozos de producción y, al menos 1, en áreas vecinas a la de los pozos de producción para verificar el efecto del bombeo adicional sobre estos sectores.

Comenzando el invierno se iniciará la operación de la obra de recarga para conocer los caudales de recarga que admite y comprobar lo realista de las estimaciones del proyecto.

Cualquiera sea el resultado de este procedimiento, se podrá iniciar la construcción de los pozos de producción, mientras se sigue controlando niveles y calidad de la napa, a lo que se agrega el control de la calidad del agua superficial que se esté infiltrando.

Dado que la construcción de los pozos no debe tardar más de 3 meses, se podrá efectuar las pruebas de bombeo de cada uno de ellos para solicitar de los derechos provisionales, extrayendo los caudales que les correspondan, calculados como la fracción ya definida (30% en este caso), de los caudales que realmente infiltran en la obra de recarga. Con estos antecedentes, para cada pozo se solicitará los derechos provisionales de agua subterránea, entendiéndose que una vez constituidos el proyecto en su totalidad podrá operar. Dado que los plazos para constituir estos derechos podrían ser de 6 meses o más, el control de las napas a través de los pozos de pequeño diámetro debe continuar.

En este lapso, la Comunidad de Aguas, dueña del proyecto, debe gestionar la instalación de los instrumentos de medición de caudal en todos los pozos que serían influidos por la recarga artificial, tanto en los nuevos pozos de producción, como en los pozos ya en uso que posean

derechos, a fin de verificar que los caudales que se extraen en estos últimos se mantengan una vez que el proyecto opere normalmente.

Iniciada la operación del sistema deberá aplicarse todas las indicaciones del plan de operación y mantenimiento, teniendo especial cuidado en controlar la eficiencia de cada laguna de infiltración para realizar las labores de mantenimiento cuando esta eficiencia disminuya en forma clara. En efecto, una disminución de ello será indicativo que se requiere una limpieza del fondo de la laguna, para lo cual se vaciará y será reemplazada por otra que esté en condiciones óptimas.

El plan de contingencias a elaborarse, servirá para resolver situaciones inesperadas que se presenten. Como crecidas que puedan amagar la seguridad de las lagunas o producir colmatación de los decantadores y sedimentadores. En el caso de pozos de inyección, las contingencias podrían tener que ver con las obras mismas de recarga (fallas eléctricas, rotura de tubería de admisión, bomba de inyección, etc.).

Finalmente, el plan de abandono que se elabore debe dar cuenta de la forma en que el área que ocupan las instalaciones de recarga artificial será desmantelada para dejar la superficie que ocuparon de una forma semejante a como se encontraban antes de la construcción de las obras. No se requiere plan de abandono para dejar de usar los pozos de producción o para dejar de controlar los pozos de monitoreo.

6 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DETALLADA

6.1 Resultados Mediciones Geofísicas

6.1.1 Cuenca del Río Choapa

Las mediciones geofísicas realizadas en la cuenca del río Choapa fueron 80 TEMs y 80 Nano-TEMs, los que se distribuyeron a lo largo del valle, concentrando los TEMs sobre el eje de los cauces y los Nano-TEMs hacia los bordes, en atención a las características y alcance de las mediciones. La información obtenida se ha utilizado para la caracterización hidrogeológica de los rellenos.

6.1.2 Cuenca del Río Quilimarí

El trabajo efectuado, 40 Nano-TEMs permitió definir diferentes unidades que han sido interpretadas geológicamente en base a criterios geofísicos. Además, la información obtenida se ha utilizado para la caracterización hidrogeológica de los rellenos.

6.2 Prospecciones (Pozos Someros Excavados)

Se excavaron 15 pozos someros de observación (Cal-1 a Cal-15), los cuales han sido utilizados para tres actividades específicas; observación directa del tipo de material en las primeras capas de relleno, análisis granulométrico y realización de pruebas de infiltración, o de agotamiento, en los casos en que la napa se encontró muy superficial.

En las Figuras 6.2-1 y 6.2-2 siguientes se muestra la ubicación de los pozos excavados en cada valle.

6.3 Determinación de Parámetro Característicos

En las Figuras 6.3-1 y 6.3-2 siguientes se muestra los valores de los coeficientes de permeabilidad determinados para diferentes sectores de las cuencas de los ríos Choapa y Quilimarí, respectivamente.

Figura 6.3-1. Permeabilidades Cuenca Río Choapa (m/s)

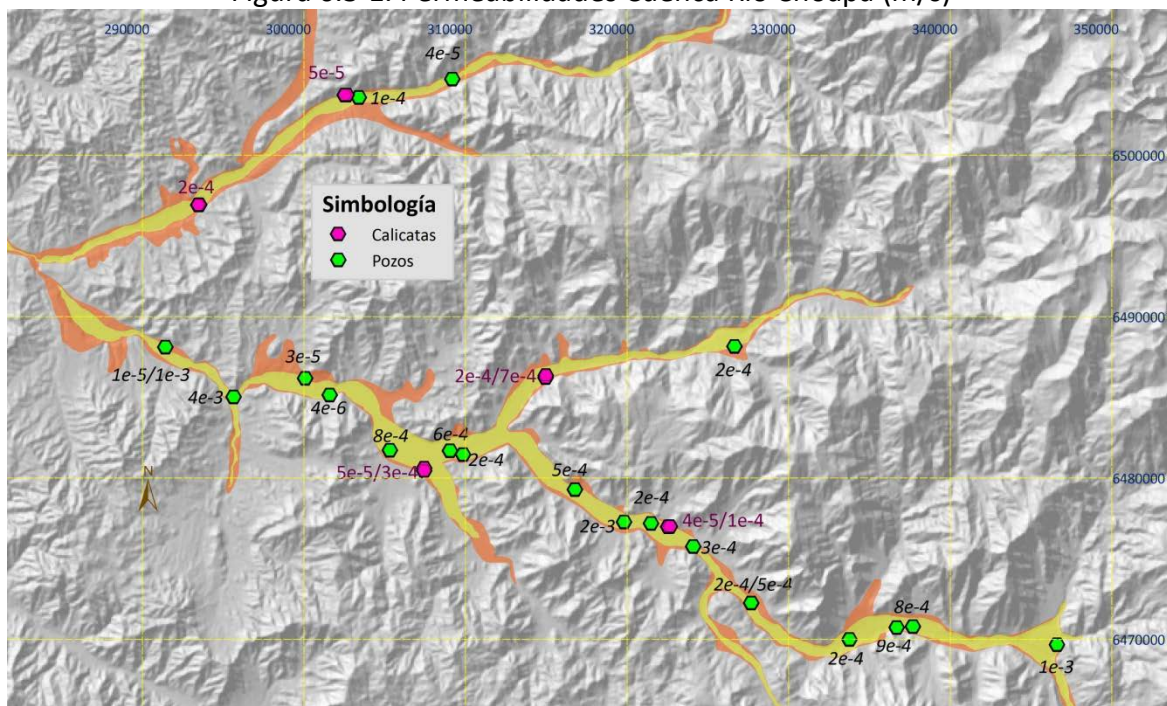


Figura 6.2-1
Ubicación Pozos Excavados Cuenca del Río Choapa (Cal1 a Cal10)



Figura 6.2-2
Ubicación Pozos Excavados Cuenca del Río Quilimarí (Cal11 a Cal15)

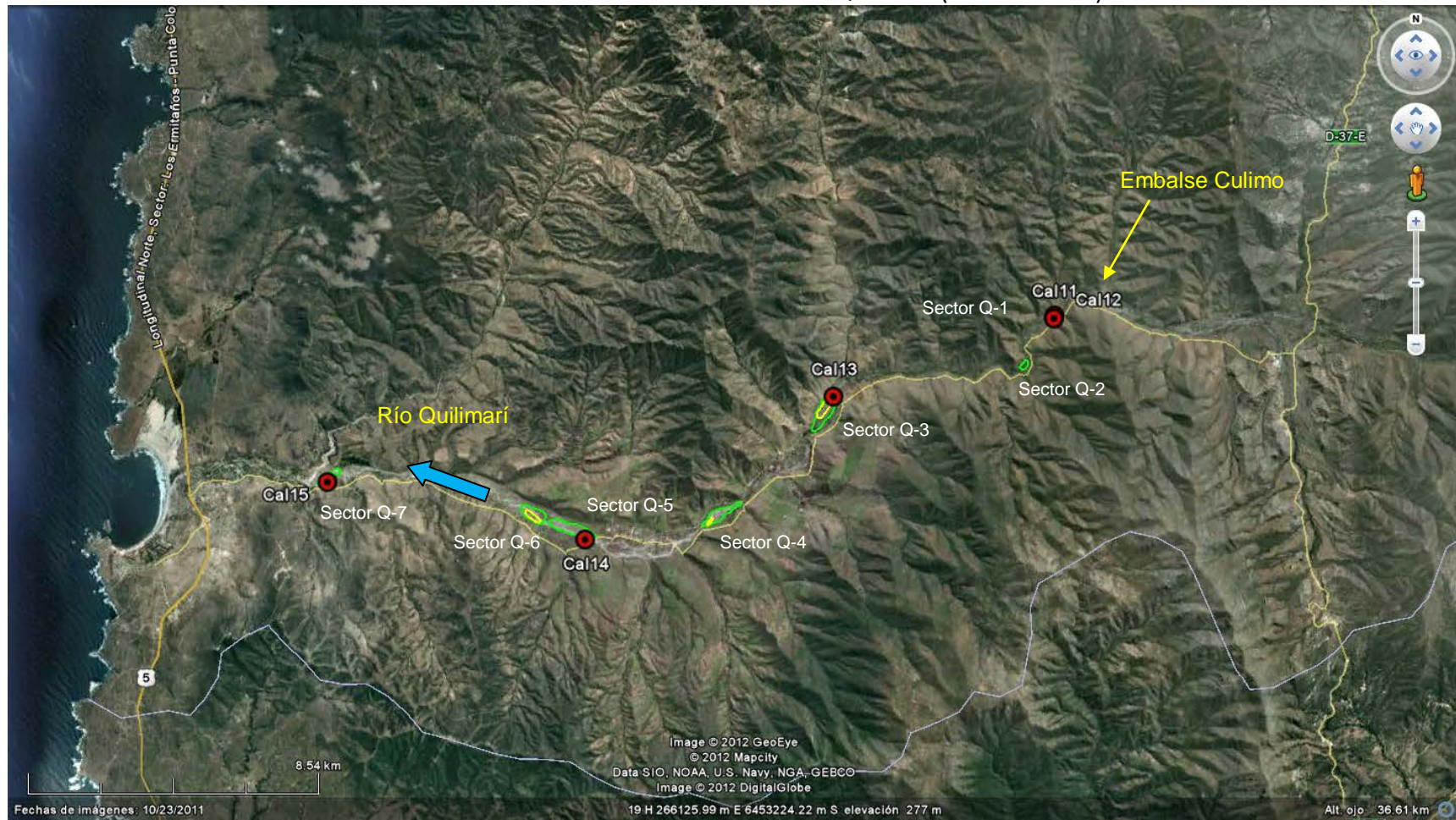


Figura 6.3-2. Permeabilidades Cuenca Río Quilimarí (m/s)



6.4 Análisis de Niveles Freáticos

A partir de la información de terreno obtenida en el catastro de captaciones, se determinó la situación actual de niveles freáticos en las cuencas, determinándose valores medios de niveles y caudales para cada uno de los sectores, del estudio Cazalac, para el caso de la cuenca del río Choapa y de la sectorización definida en el presente trabajo, para la cuenca del río Quilimarí.

En aquellos sectores donde no se dispone de información de captaciones, se ha estimado un valor medio, en función de los niveles observados en el resto del área.

La información señalada se presenta en las Tablas 6.4-1 y 6.4-2 siguientes.

Tabla 6.4-1
Niveles Freáticos Promedio por Sector, Cuenca Río Choapa

Identificación de los Acuíferos		Según Sondajes				
Código	Nombre	Prof. Pozos	Cota Terreno	NE	Cota NE	Q promedio
		(m)	(msnm)	(m)	(msnm)	(l/s)
AC-01	Río valle	-	-	2.8 *	-	-
AC-02	Batuco	-	-	2.8 *	-	-
AC-03	Cuncumén	-	-	2.8 *	-	-
AC-04	Tranquilla	100.0	881.0	2.8 *	878.2	65.0
AC-05	Coirón	69.6	862.0	3.1	858.9	55.8
AC-06	Estero Quelén	24.0	824.0	2.9	821.1	2.8
AC-07	Llimpo	25.0	697.0	5.1	691.9	-
AC-08	Higuerilla Panguecillo	11.0	670.0	4.8	665.2	4.0
AC-09	El Queñe	61.3	605.7	2.8	602.9	51.4
AC-10	Salamanca	14.7	516.3	2.6	513.7	-

Tabla 6.4-1 (Continuación)
Niveles Freáticos Promedio por Sector, Cuenca Río Choapa

Identificación de los Acuíferos		Según Sondajes				
Código	Nombre	Prof. Pozos	Cota Terreno	NE	Cota NE	Q promedio
		(m)	(msnm)	(m)	(msnm)	(l/s)
AC-11	Zapallar	-	-	2.8 *	-	-
AC-12	Río Chalinga Bajo S. Agustín	-	-	2.8 *	-	-
AC-13	Río Chalinga sobre Choapa	22.5	565.0	3.1	561.9	5.0
AC-14	El Tambo	14.7	455.7	3.1	452.6	1.5
AC-15	Estero Camisas	28.8	480.6	3.2	477.4	7.8
AC-16	Choapa Limáhuida	8.9	346.9	3.0	343.9	4.0
AC-17	Choapa antes río Illapel	30.0	245.0	2.8 *	-	1.6
AC-19	Illapel sobre Carén	-	-	2.8 *	-	-
AC-21	Illapel sobre Bato	15.0	958.0	2.7	955.3	-
AC-22	Illapel sobre Huintil	28.6	743.3	2.5	740.8	-
AC-23	Illapel sobre Cárcamo	4.7	513.1	2.0	511.1	-
AC-24	Illapel sobre Aucó	5.1	408.9	1.8	407.1	4.9
AC-25	Ciudad Illapel	5.9	282.8	1.7	281.0	6.6
AC-26	El Maitén	10.2	186.5	1.7	184.8	10.5
AC-27	Chopa sobre canela	5.3	152.7	2.8	149.9	0.8
AC-28	Huentelauquén	-	-	2.8 *	-	-

(*): Valores estimados

Se observa que en general, en toda la cuenca los niveles son bastante superficiales, variando entre 1.7 y 5.1 m de profundidad como valores medios representativos de los sectores hidrogeológicos.

Tabla 6.4-2
Niveles Freáticos Promedio por Sector, Cuenca Río Quilimarí

Código	Ubicación	Sector	NE
(*)			(m)
1	Embalse Culimo	Q-1	2.2
2	Embalse Culimo	Q-2	2.3
3	Embalse Culimo		2.5
4	Qda. Infiernillo		3.0
5	Qda. Infiernillo	Q-3	0.8
6	Qda. Infiernillo		3.6
7	Qda. Infiernillo		-
8	Guangualí	Q-4	7.4
9	Guangualí	Q-5	5.1
10	Entre Guangualí y Quilimarí	Q-6	10.0
11	Entre Guangualí y Quilimarí		10.6
12	Entre Guangualí y Quilimarí		6.9
13	Quilimarí	Q-7	3.1
14	Quilimarí		2.5

(*): Sectores numerados desde aguas arriba hacia aguas abajo, en el tramo Embalse Culimo a desembocadura.

A diferencia de lo observado en la cuenca del río Choapa, en este caso hay sectores donde los niveles son más profundos, del orden de 10 m en el sector entre Guangualí y Quilimarí,

debido a la explotación desde captaciones subterráneas y a la menor capacidad del acuífero para absorber la demanda. No obstante, hay sectores donde los niveles son muy superficiales, como en la confluencia con la Quebrada Infiernillo, donde la profundidad de la napa es menor a 1 m.

7 MODELACIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LOS SISTEMAS HÍDRICOS

7.1 Cuenca del Río Choapa

Se desarrolló un modelo hidrogeológico, para representar el flujo subterráneo del sistema acuífero de esta cuenca, cuyo principal objetivo fue determinar cómo varía el estado del sistema, al incluir entradas de flujo, provenientes de infiltraciones inducidas artificialmente.

Se ha estudiado la capacidad de la napa para recibir y conducir la recarga artificial. Además, se ha analizado la red de drenaje superficial y se ha cuantificado la disponibilidad hídrica superficial que permitiría abastecer a los proyectos de recarga artificial.

Se efectuó una calibración en régimen permanente del modelo. Para ello, se usaron las profundidades de los niveles estáticos medidos en la campaña de terreno.

Para conocer la disponibilidad hídrica superficial en la cuenca del río Choapa se desarrolló una metodología de cálculo, basada en los resultados del modelo Magic del estudio Cazalac y en los caudales medidos en las estaciones fluviométricas más cercanas a la desembocadura de este río.

El procedimiento utilizado permitió generar estadísticas mensuales de caudales disponibles. Así se pudo determinar un orden de magnitud para los recursos hídricos existentes a través del tiempo. Particularmente, fue posible establecer en qué meses es posible contar con suministro para los proyectos de recarga, con una regularidad preestablecida, según la probabilidad de excedencia considerada.

Se operó el modelo, incorporando 28 zonas de balance volumétrico. Los flujos obtenidos con el modelo permiten generar una jerarquía por sector de acuerdo al porcentaje del flujo entrante a cada sector que permanece a nivel subterráneo.

En la Figura 7.1-1 se muestra la sectorización usada para cuantificar las componentes del flujo y en la Tabla 7.1-1 los resultados integrados de la priorización múltiple realizada.

En el presente análisis se consideraron los caudales de disponibilidad superficial asociados a la probabilidad de excedencia 85%. Esos caudales corresponden a una condición de escasez de recursos y dicha condición es la que exige la DGA para constituir derechos. Los proyectos de recarga artificial que consideren caudales como éstos en sus diseños, cumplen con esa restricción y así se asegura que los proyectos serán factibles desde un punto de vista legal.

Figura 7.1-1. Sectores de balance volumétrico

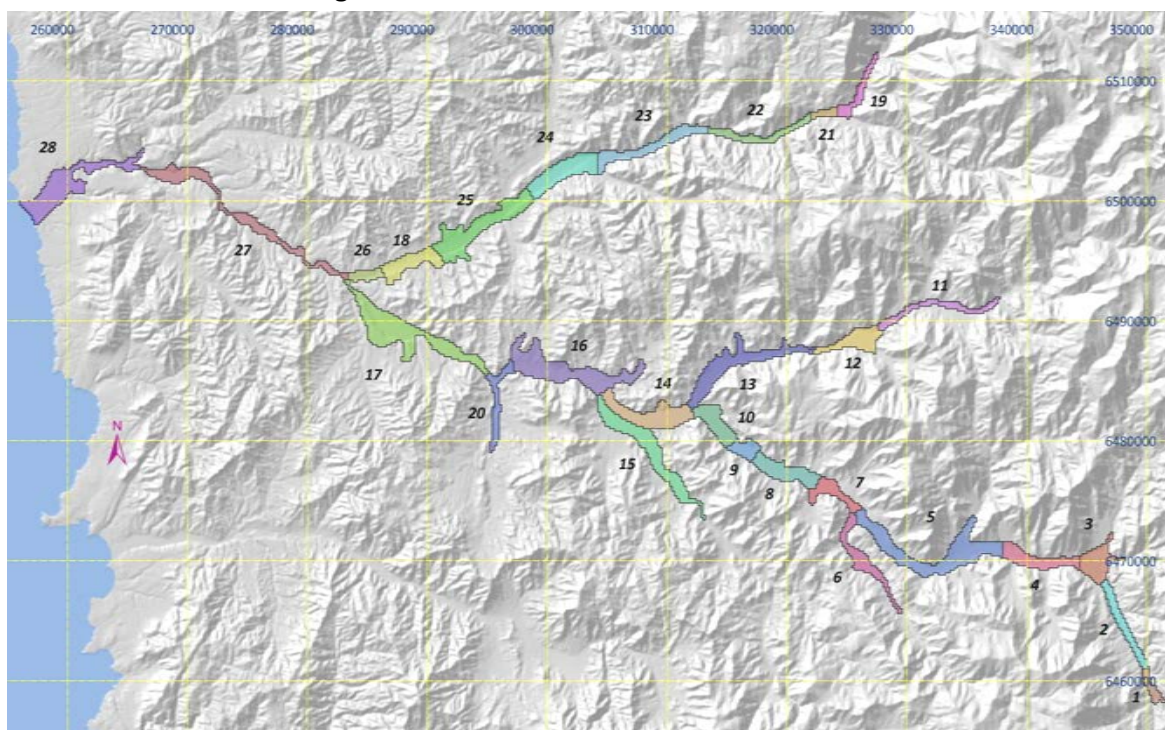


Tabla 7.1-1. Priorización sectores acuíferos

N°	% de flujo subterráneo	Sector	N°	Profundidad N.E.	Sector	N°	Caudal superficial disponible [m³/s] 85%	Sector
1	97.9	Sector N° 12	1	N.E. promedio = 5.13 m	Sector N° 7	1	2.209	Sector N° 28
2	68.6	Sector N° 7	2	N.E. promedio = 4.8 m	Sector N° 8	2	2.147	Sector N° 27
3	55.8	Sector N° 10	3	N.E. promedio = 3.18 m	Sector N° 15	3	1.987	Sector N° 17
4	51.9	Sector N° 15	4	N.E. promedio = 3.14 m	Sector N° 13	4	1.950	Sector N° 16
5	48.1	Sector N° 13	5	N.E. promedio = 3.08 m	Sector N° 14	4	1.950	Sector N° 20
6	40.1	Sector N° 14	6	N.E. promedio = 3.07 m	Sector N° 5	6	1.065	Sector N° 9
7	38.3	Sector N° 3	7	N.E. promedio = 2.98 m	Sector N° 16	6	1.065	Sector N° 10
8	32.9	Sector N° 4	7	N.E. promedio = 2.98 m	Sector N° 20	6	1.065	Sector N° 14
9	32.8	Sector N° 9	9	N.E. promedio = 2.91 m	Sector N° 6	9	0.867	Sector N° 8
10	32.4	Sector N° 1	10	N.E. promedio = 2.82 m	Sector N° 9	10	0.149	Sector N° 11
11	28.0	Sector N° 8	11	N.E. promedio = 2.58 m	Sector N° 10	11	0.126	Sector N° 12
12	24.5	Sector N° 6	12	N.E. promedio = 2.53 m	Sector N° 22	12	0.104	Sector N° 13
13	22.4	Sector N° 19	13	N.E. promedio = 2.01 m	Sector N° 23	13	0.097	Sector N° 18
14	21.1	Sector N° 25	14	N.E. promedio = 1.77 m	Sector N° 24	13	0.097	Sector N° 26
15	17.4	Sector N° 11	15	N.E. promedio = 1.74 m	Sector N° 25	15	0.067	Sector N° 7
16	17.1	Sector N° 21	16	N.E. promedio = 1.72 m	Sector N° 26	16	0.031	Sector N° 25
17	13.0	Sector N° 22	16	N.E. promedio = 1.72 m	Sector N° 18	17	0.005	Sector N° 6
18	12.9	Sector N° 17	18	Sin información (2.81 m)	Sector N° 27	18	0.000	Sector N° 1
19	12.0	Sector N° 18	19	Sin información (2.78 m)	Sector N° 17	18	0.000	Sector N° 2
20	11.9	Sector N° 2	19	Sin información (2.78 m)	Sector N° 1	18	0.000	Sector N° 3
21	9.4	Sector N° 20	19	Sin información (2.78 m)	Sector N° 2	18	0.000	Sector N° 4
22	9.2	Sector N° 24	19	Sin información (2.78 m)	Sector N° 11	18	0.000	Sector N° 5
23	8.8	Sector N° 16	19	Sin información (2.78 m)	Sector N° 19	18	0.000	Sector N° 15
24	6.9	Sector N° 28	19	Sin información (2.78 m)	Sector N° 12	18	0.000	Sector N° 19
25	5.6	Sector N° 27	19	Sin información (2.78 m)	Sector N° 4	18	0.000	Sector N° 21
26	2.7	Sector N° 5	19	Sin información (2.78 m)	Sector N° 3	18	0.000	Sector N° 22
27	0.9	Sector N° 23	19	Sin información (2.78 m)	Sector N° 28	18	0.000	Sector N° 23
28	0.0	Sector N° 26	28	Sin información (2.74 m)	Sector N° 21	18	0.000	Sector N° 24

Dada la limitada disponibilidad superficial de algunos sectores, en la Tabla 7.1-2 se han comparado los caudales 50% con los 85%.

Tabla 7.1-2. Caudales de disponibilidad superficial 50% y 85%

N°	Caudal superficial disponible [m ³ /s] 50%	Sector	N°	Caudal superficial disponible [m ³ /s] 85%	Sector
1	6.393	Sector N° 28	1	2.209	Sector N° 28
2	6.266	Sector N° 27	2	2.147	Sector N° 27
3	5.464	Sector N° 17	3	1.987	Sector N° 17
4	5.414	Sector N° 16	4	1.950	Sector N° 16
4	5.414	Sector N° 20	4	1.950	Sector N° 20
6	4.415	Sector N° 9	6	1.065	Sector N° 9
6	4.415	Sector N° 10	6	1.065	Sector N° 10
6	4.415	Sector N° 14	6	1.065	Sector N° 14
9	4.137	Sector N° 8	9	0.867	Sector N° 8
10	2.569	Sector N° 7	10	0.149	Sector N° 11
11	1.996	Sector N° 4	11	0.126	Sector N° 12
12	1.991	Sector N° 5	12	0.104	Sector N° 13
13	1.681	Sector N° 3	13	0.097	Sector N° 18
14	1.661	Sector N° 2	13	0.097	Sector N° 26
15	1.242	Sector N° 18	15	0.067	Sector N° 7
15	1.242	Sector N° 26	16	0.031	Sector N° 25
17	1.092	Sector N° 1	17	0.005	Sector N° 6
18	1.091	Sector N° 25	18	0.000	Sector N° 1
19	0.923	Sector N° 24	18	0.000	Sector N° 2
20	0.914	Sector N° 23	18	0.000	Sector N° 3
21	0.905	Sector N° 22	18	0.000	Sector N° 4
22	0.845	Sector N° 21	18	0.000	Sector N° 5
23	0.694	Sector N° 19	18	0.000	Sector N° 15
24	0.178	Sector N° 11	18	0.000	Sector N° 19
25	0.160	Sector N° 12	18	0.000	Sector N° 21
26	0.140	Sector N° 13	18	0.000	Sector N° 22
27	0.005	Sector N° 6	18	0.000	Sector N° 23
28	0.000	Sector N° 15	18	0.000	Sector N° 24

7.2 Cuenca del Río Quilimarí

Se ha desarrollado un modelo hidrogeológico, que permite representar el flujo subterráneo del sistema acuífero.

El principal objetivo es determinar cómo varía el estado del sistema, incorporando entradas de flujo, correspondientes a infiltraciones inducidas artificialmente.

Se ha estudiado la capacidad de la napa para recibir y conducir la recarga artificial. Además, se ha analizado la red de drenaje superficial y se ha cuantificado la disponibilidad hídrica superficial que permitiría abastecer a los proyectos de recarga artificial.

Se efectuó una calibración en régimen permanente del modelo. Para ello, se usaron las profundidades de los niveles estáticos medidos en la campaña de terreno.

Los recursos hídricos superficiales con los que se cuenta actualmente para abastecer los proyectos de recarga en la cuenca del río Quilimarí, son muy limitados. Éstos dependen de los vertidos del embalse Culimo y de la escorrentía superficial ocasional que se genera por lluvias en la cuenca de aporte superficial aguas abajo del embalse. Según los resultados de un

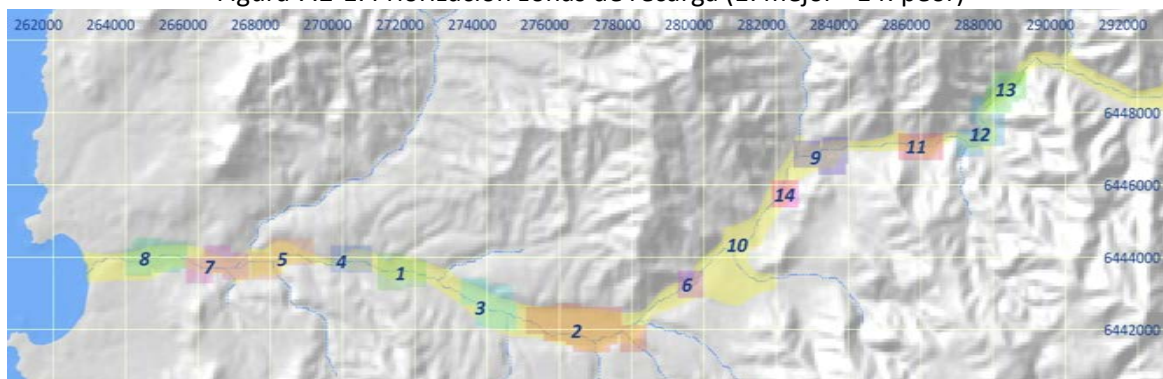
modelo de operación del embalse Culimo, desarrollado en el estudio de la referencia¹, entre 1978 y 2010, los caudales de vertidos son los que se presentan en Tabla 7.2-1.

Tabla 7.2-1. Disponibilidad hídrica superficial cuenca río Quilimarí [l/s]

Caudal [l/s]	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Promedio	0	0	27	21	177	324	404	404	146	16	0	0
50 %	0	0	0	0	102	102	134	137	0	0	0	0
85 %	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0

Con los antecedentes geométricos, las propiedades físicas (permeabilidades), el estado de saturación de los medios acuíferos (profundidad de niveles freáticos), se priorizaron los sectores. En la Figura 7.2-1 se presenta el resultado obtenido. La disponibilidad hídrica superficial no se consideró en la priorización, puesto que en la cuenca del río Quilimarí ésta es absolutamente insuficiente para efectos de abastecer proyectos de recarga, de hecho para una condición hidrológica de 85% de probabilidad de excedencia (5 de cada 6 años aproximadamente) solo habría disponible un caudal de 11 l/s en un mes del período invernal, mientras que para 50% de probabilidad de excedencia (1 cada 2 años en promedio) habría cuatro meses con disponibilidad del orden de los 100 l/s, lo que podría parecer interesante. Sin embargo, esas cifras son resultado de un análisis de frecuencia y están asociadas al vertido del embalse, el que se produce con poca frecuencia y algunas veces con caudales considerables, que distribuidos en el tiempo generan los valores señalados, pero que en la práctica serían más escasos de lo que representa dicha condición estadística.

Figura 7.2-1. Priorización zonas de recarga (1: mejor - 14: peor)



8 IDENTIFICACIÓN DE SECTORES CON POTENCIALIDAD PARA RECARGA ARTIFICIAL

Inicialmente, se definió un total de 6 sectores en la cuenca del río Choapa y 7 sectores en la cuenca de río Quilimarí, con condiciones favorables para implementar en ellos obras de recarga. Esta identificación preliminar fue complementada con un recorrido de terreno para validar o descartar los sectores preseleccionados, resultando descartados dos sectores, uno en cada cuenca.

¹ ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y GEOFÍSICO EN CUBETA DEL EMBALSE CULIMO, DICIEMBRE 2011.

A continuación, en las Tablas 8-1 y 8-2 se presentan los sectores identificados preliminarmente, ordenados de acuerdo a la priorización resultado de la modelación. Las listas priorizadas de los sectores son una referencia para conocer cuáles son los sectores favorables para recarga artificial en las cuencas de Choapa y Quilimarí, pero que debe complementarse con el tema de la disponibilidad de agua para recarga, la que ha sido igualmente evaluada y que según se ha indicado permitiría abastecer algunos proyectos en el caso de Choapa pero es prácticamente inexistente en el caso de Quilimarí.

Tabla 8-1
Sectores con Potencialidad para Recarga Artificial – Cuenca Choapa

Sector Est. Cazalac	Sector Proyecto	Prioridad
7	-	1
12	-	2
8	CH-4	3
15	CH-5	4
13	CH-3	5
10	-	6
14	-	7
3	-	8
9	-	9
4	-	10
1	-	11
6	-	12
19	-	13
11	-	14
21	-	15
20	-	16
17	-	17
16	CH-6	18
2	-	19
5	-	20
22	-	21
28	-	22
27	-	23
25	CH-2	24
18	-	25
24	CH-1	26
23	-	27
26	-	28

Es importante señalar que los caudales disponibles no son independientes, es decir, si se destinan caudales para abastecer un determinado proyecto, se debe operar el modelo para determinar la nueva disponibilidad en el resto de los sectores.

Tabla 8-2
Sectores con Potencialidad para Recarga Artificial – Cuenca Quilimarí

Sector	Sector	Prioridad
Modelo	Proyecto	
10	-	1
8	Q-5	2
9	Q-6	3
11	-	4
12	Q-7	5
7	Q-4	6
13	-	7
14	-	8
4	-	9
6	-	10
3	-	11
2	Q-2	12
1	Q-1	13
5	Q-3	14

En resumen, de acuerdo a lo presentado en las Tablas anteriores, se tiene que en el caso de la cuenca del río Choapa, los sectores con mayor potencialidad para recarga artificial, tanto geomorfológica como hidrológica, en orden de precedencia, son los siguientes:

CH-4, Río Choapa (Panguecillo),
CH-3, Río Chalinga y
CH-5, Estero Camisas.

En el caso del río Quilimarí, la evaluación de la disponibilidad hidrológica y del comportamiento de los acuíferos frente a la recarga ha permitido priorizar los sectores identificados previamente, determinándose el siguiente orden de precedencia para ellos:

Q-5, Guangualí,
Q-6, Aguas abajo de Guangualí y
Q-7, Quilimarí.

Luego, los sectores con mayor potencialidad para recarga artificial son los que se muestra en las Figuras 8-1 y 8-2, para las cuencas de los ríos Choapa y Quilimarí, respectivamente.

Figura 8-1
Sectorización del Sistema Acuífero del Río Choapa (AC-1 a AC-28) y Sectores con Potencialidad para Recarga



Figura 8-2
Sectorización del Sistema Acuífero del Río Quilimarí Aguas Abajo Embalse Culimo
Sectores con Potencialidad para Recarga



9 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA RECARGA ARTIFICIAL

La recarga artificial es una herramienta de la gestión hídrica planificada en la que aguas superficiales ocasionales, sobrantes o especialmente destinadas se almacenan en los acuíferos para incrementar los recursos hídricos y para mantener o constituir una reserva disponible para situaciones de escasez estacional o para sequías (Custodio, 2000).

Los procedimientos utilizados para poder llevar a la práctica esta técnica son diversos, aunque resulta muy clásico el establecimiento de dos grandes grupos de métodos, en función de que la recarga se efectúe bien por infiltración a través de la superficie del terreno, o bien por introducción directa del agua hasta el acuífero mediante una perforación que lo atraviesa.

Los métodos de recarga en superficie consisten en extender el agua buscando una gran superficie de contacto agua-terreno. Se emplean fundamentalmente en acuíferos libres, que no presentan niveles de baja permeabilidad en las proximidades de la superficie del terreno, lo que permite la llegada del agua al acuífero.

Por otra parte, los métodos de recarga en profundidad consisten en la introducción de agua en el acuífero, generalmente mediante pozos, sondeos, etc. Se emplean de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables.

De acuerdo a las características de los acuíferos de Choapa y Quilimarí, la recarga debiera realizarse mediante obras en superficie.

10 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS SELECCIONADAS

Las alternativas seleccionadas, es decir, los sectores en que se desarrollarán y evaluarán proyectos a nivel de perfil son los denominados CH-4 (Panguecillo) y CH-3 (Chalinga).

Se determinó que lo más favorable para las características de la zona son los métodos de recarga superficial. Considerando además que se debe elegir dos tipos diferentes de obras para ser evaluadas, se determinó lo siguiente.

Balsas o piscinas de infiltración para el sector CH-4, que dispone de un caudal medio del período invernal (Jun-Ago) superior a los 600 l/s. Se diseñó las obras para un caudal efectivo disponible de 300 l/s.

Se determinó previamente que lo recomendable considerando la disponibilidad de espacio y los requerimientos de operación y mantención es que las piscinas de recarga sean implementadas en módulos, de 100 m x 80 m cada uno, con un mínimo de 2 por proyecto.

Zanjas de Infiltración para el sector CH-3, que dispone de un caudal medio del período invernal (Jun-Ago) sólo del orden de los 100 l/s.

10.1 Proyecto CH-4

En la Figura 10.1-1 se presenta un esquema con la ubicación y distribución general de las obras del sector Ch-4 (piscinas de infiltración).

El costo neto (sin IVA) estimado de construcción de las obras del proyecto CH-4 es de 1.164,3 millones de pesos.

Para la estimación de los beneficios agrícolas de los sectores donde se ubicarían las obras de recarga se ha utilizado como referencia información recientemente desarrollada por este Consultor en el estudio "Mejoramiento de Aguas Subterráneas para Riego Ligua y Petorca", CNR, 2011-2012, en donde se realizó un completo estudio agronómico para determinar los efectos del riego adicional y del aumento en la seguridad de riego que podría obtenerse con los proyectos de recarga en dichas cuencas.

Para la evaluación económica, los costos que han sido considerados son los siguientes:

- Costos de Construcción de las obras de recarga.
- Costos de construcción de las obras de monitoreo de niveles. (piezómetros)
- Costos de implementación del sistema de monitoreo de caudales en pozos del área.
- Costos de elevación mecánica de los caudales adicionales gracias al proyecto.
- Costos de administración y mantención de las obras.

Por su parte, los beneficios considerados corresponden a los márgenes que se generarán gracias a la mayor producción asociada a la nueva disponibilidad de aguas.

El horizonte de evaluación considerado ha sido de 30 años. Las tasas de actualización consideradas han sido del 12% para las evaluaciones privadas y del 6% para las evaluaciones sociales. El factor ponderado para corregir los precios sociales es de 0.93.

A continuación se presenta el resumen con los resultados de la evaluación económica realizada para el sector CH-4.

Tabla 10.1-1
Resultados Evaluación Económica Proyecto CH-4

Proyecto	Precios de Mercado		Precios Sociales	
	VAN (Mill \$)	TIR (%)	VAN (Mill \$)	TIR (%)
CH-4	-1177.5	0.1	-213.8	4.7

Figura 10.1-1
Ubicación General Obras de Recarga Sector CH-4, Panguecillo



10.2 Proyecto CH-3

En la Figura 10.2-1 se presenta un esquema con la ubicación y distribución general de las obras del sector Ch-4 (zanjas de infiltración).

El costo neto (sin IVA) estimado de construcción de las obras del proyecto CH-4 es de 379,3 millones de pesos.

Para la estimación de los beneficios agrícolas de los sectores donde se ubicarían las obras de recarga se ha utilizado como referencia información recientemente desarrollada por este Consultor en el estudio "Mejoramiento de Aguas Subterráneas para Riego Ligua y Petorca", CNR, 2011-2012, en donde se realizó un completo estudio agronómico para determinar los efectos del riego adicional y del aumento en la seguridad de riego que podría obtenerse con los proyectos de recarga en dichas cuencas.

Para la evaluación económica, los costos que han sido considerados son los siguientes:

- Costos de Construcción de las obras de recarga.
- Costos de construcción de las obras de monitoreo de niveles. (piezómetros)
- Costos de implementación del sistema de monitoreo de caudales en pozos del área.
- Costos de elevación mecánica de los caudales adicionales gracias al proyecto.
- Costos de administración y mantención de las obras.

Por su parte, los beneficios considerados corresponden a los márgenes que se generarán gracias a la mayor producción asociada a la nueva disponibilidad de aguas.

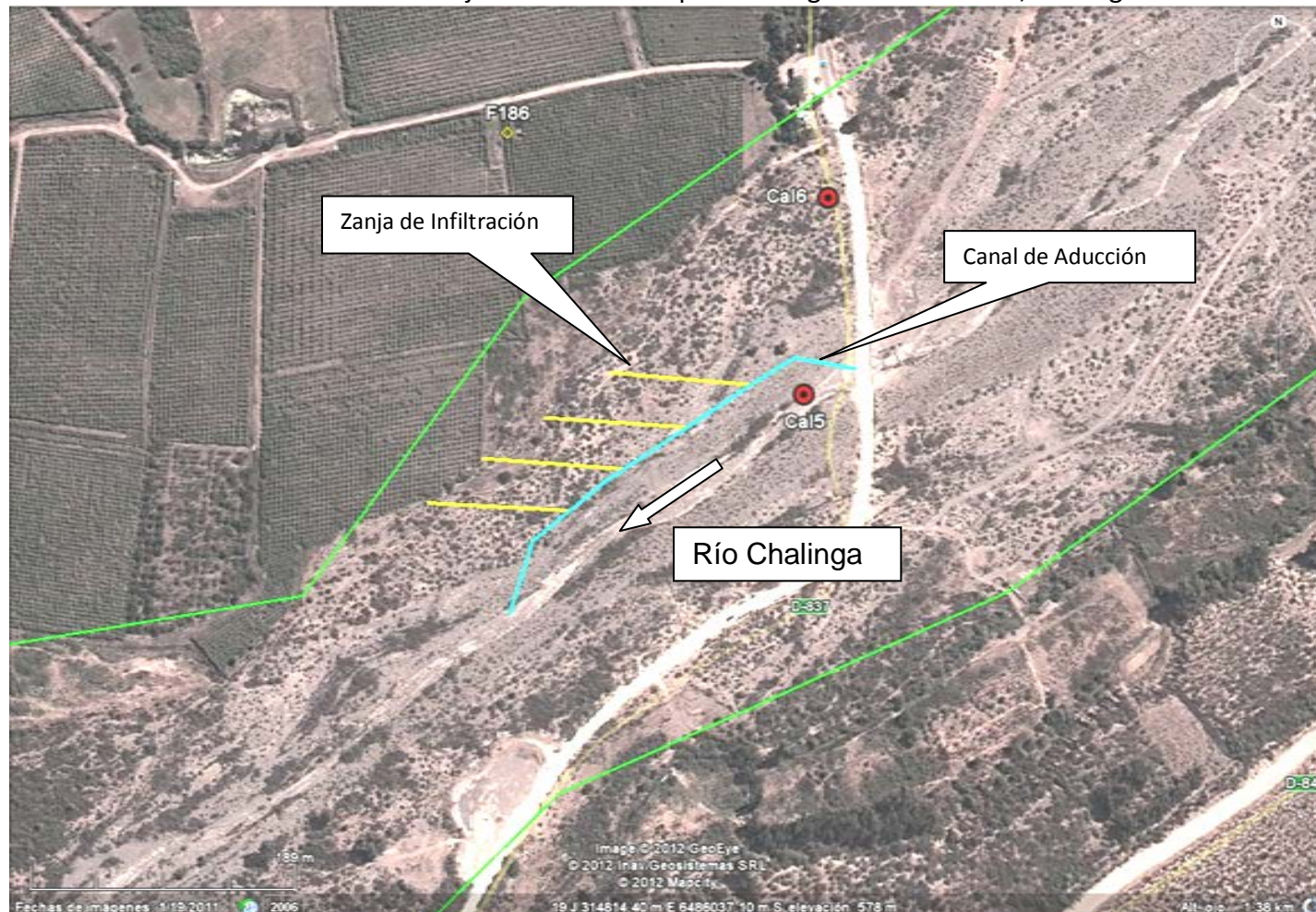
El horizonte de evaluación considerado ha sido de 30 años. Las tasas de actualización consideradas han sido del 12% para las evaluaciones privadas y del 6% para las evaluaciones sociales. El factor ponderado para corregir los precios sociales es de 0.93.

A continuación se presenta el resumen con los resultados de la evaluación económica realizada para el sector CH-3.

Tabla 10.2-1
Resultados Evaluación Económica Proyecto CH-3

Proyecto	Precios de Mercado		Precios Sociales	
	VAN (Mill \$)	TIR (%)	VAN (Mill \$)	TIR (%)
CH-3	-488.5	-2.0	-165.7	3.1

Figura 10.2-1
Ubicación General Zanjas de Infiltración para Recarga en Sector CH-3, Chalinga



10.3 Comparación de Alternativas

En la Tabla 10.3-1 se muestran los indicadores económicos del proyecto CH-4 Panguecillo, proyecto de piscinas de infiltración, y CH-3, Chalinga, de zanjas de infiltración.

Tabla 10.3-1
Indicadores Económicos de las Alternativas Evaluadas

Sector	Costo Obras	Precios de Mercado		Precios Sociales	
		VAN	TIR	VAN	TIR
	(Mill \$)	(Millones de \$)	(%)	(Millones de \$)	(%)
CH-4	1164.3	-1177.5	0.1	-213.8	4.7
CH-3	379.3	-488.5	-2.0	-165.7	3.1

Al observar los resultados de las evaluaciones económicas se puede apreciar que los proyectos no son rentables, ni siquiera desde el punto de vista social.

Es importante señalar que parte importante del costo de los proyectos corresponde a defensas fluviales que se requeriría para proteger las obras. Esto podría manejarse de una forma más eficiente si se coordina con Obras Fluviales para ver que planes de mejoramiento tienen ellos y eventualmente aprovechar algunos de los trabajos que ellos realizan periódicamente, para reducir el costo de los proyectos y hacerlos más atractivos.

En la Tabla 10.3-2 se presenta la información en términos unitarios, tanto por hectárea, como por hectárea y por año. Se puede apreciar, al igual que en la Tabla anterior, que el proyecto menos malo es de las piscinas de infiltración (CH-4), que arrojaría una pérdida del orden de los 120 mil pesos por hectárea al año.

Tabla 10.3-2
Indicadores Económicos en Términos Unitarios

Sector	Superf. Benefic. (ha)	VAN Unitario - Pr de Mercado		VAN Unitario - Pr Sociales	
		Total (Mill \$/ha)	por año (Mill \$/ha/año)	Total (Mill \$/ha)	por año (Mill \$/ha/año)
CH-4	323.0	-3.65	-0.122	-0.66	-0.022
CH-3	110.0	-4.44	-0.148	-1.51	-0.050

Se puede señalar que los proyectos evaluados recientemente en Ligua y Petorca (Estudio CNR 2011-2012), para condiciones agrícolas bastante deficitarias y con napas más profundas, entregaron indicadores económicos positivos pero muy discretos, por lo que era esperable que en este caso, donde las posibilidades de mejorar la situación actual son más reducidas y donde los acuíferos están más saturados y tienen menos capacidad de recibir y mantener la recarga, los indicadores económicos fuesen menos atractivos, como de hecho ha ocurrido.

11 PROPUESTA DE PROYECTO PILOTO

En función de los resultados obtenidos de las evaluaciones económicas, se recomienda el sector CH-4 para la instalación del piloto.

El proyecto CH-4 contempla la construcción de 4 módulos de recarga. Sin embargo, el proyecto piloto contempla la construcción de sólo un módulo de recarga, que permita observar si el sistema se comporta de acuerdo a lo estimado previamente o si es necesario realizar alguna modificación en el diseño, antes de su construcción.

El proyecto piloto contará además con control de caudales afluentes, control de niveles superficiales en la piscina de infiltración y control de niveles freáticos aguas abajo de la obra.

No se ha incluido en el costo el monitoreo de caudales de extracción en pozos del área beneficiaria del proyecto, pues debe determinarse previamente el número de pozos a controlar. Como referencia se estima un costo de 3.75 millones de pesos por pozo a monitorear (flujómetro, datalogger, implementación del sistema).

El Presupuesto de Referencia del Proyecto Piloto, entrega un costo neto (sin IVA) de construcción de 340 millones de pesos.

En el texto del informe (Anexos 9, 10 y 11) se presentan las Especificaciones Técnicas Generales y Especiales y el Presupuesto de Referencia del Proyecto Piloto.

12 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Una vez finalizado el estudio, se puede afirmar lo siguiente:

- Se recopiló y analizó la información disponible en estudios hidrológicos e hidrogeológicos realizados en las cuencas de interés. Además se realizó una revisión de bibliografía técnica relacionada con la recarga artificial de acuíferos.
- Se revisaron imágenes satelitales de las cuencas de Choapa y Quilimarí y de allí, se hizo una selección preliminar de sectores favorables para la recarga de acuíferos en cada cuenca. El número de sectores identificados preliminarmente fue de 6 en cada cuenca.
- Se hizo un recorrido de terreno para validar o descartar los sectores seleccionados. Se observó en terreno que en la cuenca del río Choapa, los acuíferos son muy superficiales, con zonas de afloramiento en varios tramos del valle y que la presencia de los embalses (El Bato y Corrales), que otorgan seguridad al riego, ha significado que los cauces superficiales tengan caudal permanente y los acuíferos estén mucho menos explotados que en el caso

de Quilimarí, donde el río está seco hace bastante tiempo, a pesar de la existencia del embalse Culimo, pues éste también lleva varios meses totalmente seco.

- En el caso de la cuenca del río Quilimarí, la recarga artificial aparece como un proceso que sería de gran utilidad, aun cuando no hay claridad de con qué recursos podría materializarse, ya que la cuenca es deficitaria y el embalse, aun en tiempos de abundancia, sólo ha vertido una decena de veces en sus 80 años de existencia.
- En el caso de la cuenca del río Choapa, la recarga artificial de acuíferos no tendrá tanta relevancia en términos de mejorar las condiciones de los acuíferos pues estos se encuentran subexplotados y con niveles freáticos bastante superficiales. Además, el riego está respaldado por dos embalses, lo que le quita presión a los sistemas acuíferos como fuente de agua de riego. El hecho de presentarse niveles freáticos someros constituye una dificultad para el proceso de recarga, que puede incluso hacerlo inconveniente si las condiciones del acuífero son tales que por ejemplo, no es capaz de mantener las aguas infiltradas como flujo subterráneo y genera zonas de afloramiento en sectores vecinos.
- Como parte del estudio se realizó un catastro de captaciones de aguas subterráneas: enfocado principalmente a conocer la situación de los niveles freáticos.
- Se desarrollaron prospecciones geofísicas para conocer profundidad del basamento, características estratigráficas y situación de niveles freáticos, dentro de cada cuenca.
- Se realizaron muestreos y análisis de calidad de aguas (superficiales y subterráneas): para conocer la situación tanto de las aguas que serían infiltradas, como de las aguas del acuífero o receptoras, de forma de verificar si las calidades son similares, si se produciría algún deterioro de la calidad de las napas, lo que podría requerir tratamiento previo a la infiltración o si se produciría un efecto positivo al mejorar la calidad de las aguas del acuífero. Los análisis realizados indican que las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del Choapa (ríos Choapa e Illapel) son similares, por lo que no se requeriría ningún tratamiento químico previo a la recarga. En el caso del Quilimarí, sólo se pudo muestrear y analizar la calidad de las aguas subterráneas, pues el río está seco.
- Se realizó un análisis de los aspectos técnicos y legales relacionados con la recarga artificial de acuíferos en el país.
- Se hizo una caracterización hidrogeológica detallada de las cuencas de los ríos Choapa y Quilimarí, con énfasis en los sectores favorables para la recarga de acuíferos que fueron identificados previamente.
- Para ello, se consideró: la excavación de 15 pozos someros distribuidos en ambas cuencas (10 en Choapa y 5 en Quilimarí); la toma de muestras de material y análisis granulométrico de las mismas, para efectos de determinar el contenido de finos; la realización de pruebas

de infiltración en los pozos excavados y pruebas de agotamiento en reemplazo de las anteriores, en los casos en que la napa se encontró muy superficial (4 de 15 pozos); recopilación de información de la red de control de niveles de la DGA en ambas cuencas y recopilación de información de pruebas de bombeo en pozos de Agua Potable existentes en la zona, para determinar coeficientes de permeabilidad.

- Se modeló los sistemas hídricos y se determinó la disponibilidad de recursos superficiales para condiciones hidrológicas 50% y 85% en cada cuenca. Adicionalmente, se priorizó los sectores a partir de sus condiciones hidrogeológicas (permeabilidad, profundidad de niveles freáticos o capacidad para recibir recarga y respuesta de los sectores frente a la recarga, es decir, si mantiene el flujo como subterráneo o genera afloramientos).
- La priorización de sectores de acuerdo a las variables consideradas en la modelación, se cruzó con la definición de sectores geomorfológicamente favorables, de forma de conocer cuáles de dichos sectores presentan mayor potencial para proyectos de recarga artificial de acuíferos.
- Se generó un ranking de sectores hidrogeológicos y sus correspondientes sectores favorables para proyectos, lo que entregó los resultados que a continuación se indica.
- En Choapa, los 3 sectores con mayor potencial hidrogeológico corresponden a:
 - CH-4, Río Choapa (Panguecillo) - Sector Acuífero 8
 - CH-3, Río Chalinga – Sector Acuífero 13 y
 - CH-5, Estero Camisas – Sector Acuífero 14.
- En Quilimarí, los 3 sectores con mayor potencial hidrogeológico corresponden a:
 - Q-5, Guangualí - Sector Acuífero 8
 - Q-6, Aguas abajo de Guangualí - Sector Acuífero 9 y
 - Q-7, Quilimarí – Sector Acuífero 12.
- Para los sectores indicados, se elaboraron planos que son Mapas de las Zonas de Interés, donde se presenta una vista en planta y perfiles logitudinal y transversales de los sectores, lo que se complementa con información de la hidrogeología y de la modelación.
- Al analizar los resultados de la modelación (disponibilidad superficial), se observa que en el caso de la cuenca del río Choapa, los recursos disponibles para la condición 85% permitirían abastecer uno o más proyectos de recarga artificial, a diferencia de lo que se observa en la cuenca del río Quilimarí, donde los recursos disponibles son prácticamente inexistentes, tanto para 85% como para 50% de probabilidad de excedencia.
- Lo anterior confirma lo observado en terreno en cuanto a que la recarga artificial de acuíferos aparece como necesaria en Quilimarí, pero no se tiene condiciones favorables ni hidrogeológicas ni de disponibilidad de aguas, esto ya que el acuífero no es una unidad continua sino que corresponde a pequeños subsistemas independientes producto de los

angostamientos y afloramientos rocosos que se observa a lo largo del valle y los caudales superficiales son prácticamente nulos.

- En la cuenca del río Choapa en tanto, a pesar de que se observó agua superficial en los cauces y canales aun tratándose de un año seco, los recursos superficiales disponibles no son tan cuantiosos como podría pensarse, principalmente debido a la regulación de los embalses existentes (El Bato y Corrales). Sin embargo, la condición de las napas da cuenta de niveles freáticos muy superficiales, entre 1 y 5 m, lo que significaría que en este momento no sería necesario recargar las napas e incluso dicha condición de niveles representa una limitación para dicho proceso.
- Se realizó una evaluación técnico económica para dos proyectos, con diferentes tipos de obras, en la cuenca del río Choapa; zanjas de infiltración en el río Chalinga y piscinas de infiltración en el río Choapa, obteniéndose en ambos casos indicadores de rentabilidad, privada y social, negativos.
- Se elaboró los Términos de Referencia para un proyecto piloto. El sector recomendado para instalarlo corresponde al sector Choapa 4, Panguecillo, y las instalaciones serían piscina de infiltración y sus obras anexas.

Santiago, Diciembre de 2012.