



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE AGRICULTURA
COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO**

**ESTUDIO DIAGNÓSTICO
DE LOS RECURSOS SUBTERRÁNEOS
EN EL SISTEMA HÍDRICO LIGUA Y PETORCA**

RESUMEN EJECUTIVO

**BIBLIOTECA
COMISION NACIONAL DE RIEGO**

DICIEMBRE 2011

GCF INGENIEROS LTDA.

Ricardo Matte Pérez 0535, Providencia. Fono: 209 7179- Fax: 209 71 03 - gcabrera@entelchile.net

ÍNDICE

	Pág.
1 OBJETIVOS Y ALCANCES DEL ESTUDIO	1
2 ACTIVIDADES EN TERRENO REALIZADAS	3
2.1 Catastro de Captaciones Subterráneas	3
2.2 Pruebas de Bombeo.....	4
2.3 Estudio Geofísico	6
2.4 Caracterización Hidrogeológica	6
2.5 Demandas de Agua Subterránea.....	7
2.6 Derechos de Agua Subterránea.....	8
3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO	8
3.1 Dominio del Modelo.....	8
3.2 Geometría de los Acuíferos.....	8
3.3 Componentes del Flujo y Condiciones de Borde	9
3.4 Calibración del Modelo.....	11
3.5 Balance Período Histórico.....	14
3.6 Conclusiones de la Elaboración y Calibración del Modelo	14
4 MODELACIÓN DE ESCENARIOS	15
4.1 Definición de los Escenarios de Modelación	15
4.2 Operación del Modelo para los Escenarios Definidos	18
5 CONCLUSIONES GENERALES	24

1 OBJETIVOS Y ALCANCES DEL ESTUDIO

El nivel de explotación y desarrollo de los valles de Ligua y Petorca, frente a su alta fragilidad a los eventos de escasez hídrica, generan poca seguridad en torno al potencial agro-productivo que posee este sistema hídrico. Sin embargo, las ventajas por sus condiciones agroclimáticas y de suelos, además de la cercanía a centros productivos, conducen a la necesidad de lograr un aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos.

Si se considera el alto nivel de las explotaciones subterráneas en estas cuencas, frente a la limitada disponibilidad hídrica, resulta pertinente estudiar alternativas de aprovechamiento, regulación y gestión del sistema de aguas subterráneas. En particular, la regulación y aprovechamiento sustentable del acuífero, se visualizan como soluciones factibles en plazos razonables, dados los costos de estas soluciones.

Es por ello que se requiere profundizar el conocimiento del sistema hidrogeológico, tanto en sus características como en su potencialidad en cuanto a oferta de agua.

Por otra parte, las cuencas de Ligua y Petorca han experimentado gran crecimiento del aprovechamiento del suelo bajo riego tecnificado, incorporando sectores sobre ladera y rubros de alto estándar. De esta forma, la seguridad de riego resulta ser un factor clave en el desarrollo productivo sustentable en ambas cuencas, siempre que la disponibilidad de recursos hídricos sea suficiente para suplir estos requerimientos. Por este motivo, se reconoce la necesidad de tener un conocimiento acabado de los recursos hídricos existentes, para su posterior aprovechamiento en forma responsable y eficiente.

La Comisión Nacional de Riego, como organismo responsable de la planificación y de la generación de información para el desarrollo de estrategias y proyectos de inversión en riego, y atendida su necesidad de realizar un análisis de las potencialidades del sistema hídrico subterráneo de las cuencas hidrográficas de los ríos Ligua y Petorca, ha considerado de imprescindible necesidad ejecutar un estudio de diagnóstico de los recursos subterráneos en estos sistemas hídricos.

Para la realización de este estudio se ha planteado objetivos generales y específicos que son los que se señalan textualmente a continuación.

Objetivo General:

- Realizar un análisis de las potencialidades del sistema hídrico subterráneo de las cuencas hidrográficas de los ríos La Ligua y Petorca y determinar la explotación sustentable de las aguas subterráneas de ambos valles.

Objetivos Específicos:

- Establecer las características y volumen de explotación de cada acuífero en la zona de estudio.
- Determinación de la demanda agrícola actual y futura potencial asociada a las explotaciones de aguas subterráneas.
- Evaluar las extracciones y recargas al sistema subterráneo.
- Determinar el valor de los parámetros representativos de los acuíferos.
- Implementar modelos hidrogeológicos para la zona en análisis.
- Analizar escenarios de explotación del recurso hídrico y determinar la explotación sustentable de los sistemas acuíferos.

En este contexto, se ha realizado el presente estudio, cuyo Informe contiene todos los antecedentes que han sido recopilados y generados para alcanzar los objetivos señalados. Ese informe ha sido estructurado sobre la base de 19 capítulos que son:

- Capítulo 1. Introducción y objetivos.
- Capítulo 2. Descripción general del área de estudio.
- Capítulo 3. Recopilación de antecedentes hidrológicos, hidrogeológicos y demandas.
- Capítulo 4. Caracterización hidrológica.
- Capítulo 5. Calidad de aguas.
- Capítulo 6. Caracterización hidrogeológica.
- Capítulo 7. Caracterización de la demanda.
- Capítulo 8. Generalidades sobre la modelación hidrogeológica del área.
- Capítulo 9. Dominio del modelo.
- Capítulo 10. Geometría de los acuíferos.
- Capítulo 11. Componentes del flujo y condiciones de borde.
- Capítulo 12. Calibración.
- Capítulo 13. Balance período histórico.
- Capítulo 14. Comentarios sobre la elaboración y calibración del modelo.
- Capítulo 15. Generalidades sobre la operación del modelo.
- Capítulo 16. Definición de escenarios.
- Capítulo 17. Operación del modelo para los escenarios definidos.
- Capítulo 18. Resultados globales.
- Capítulo 19. Participación ciudadana.
- Capítulo 20. Metodología de monitoreo y actualización del modelo hidrogeológico

Complementan lo anterior los Anexos, Planos y Documentos Internos.

La totalidad de los temas que consigna el índice han sido tratados en profundidad y sus principales resultados presentados en detalle en el Informe Principal. En este Resumen Ejecutivo se ha estimado conveniente presentar aquellos temas que resultaron de mayor relevancia en este trabajo y que corresponden a las actividades

de terreno realizadas, el desarrollo del modelo de simulación hidrogeológico y la modelación de los diferentes escenarios que fueron definidos para ser representados por este modelo.

2 ACTIVIDADES EN TERRENO REALIZADAS

2.1 Catastro de Captaciones Subterráneas

Con el objeto de caracterizar el uso actual de los recursos subterráneos en toda el área de estudio, esto es, en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca, y de modo de contar con un catastro actualizado de las captaciones existentes, se efectuó una completa y exhaustiva campaña de terreno, a través de la cual se han catastrado y encuestado las captaciones de agua subterránea. Entre dichas captaciones, se catastraron pozos, norias importantes, drenes y punteras.

La campaña de terreno fue desarrollada por 4 cuadrillas, entre los meses de agosto de 2010 y febrero de 2011.

En la ejecución de esta actividad, se procuró encuestar a los propietarios y/o usuarios de la totalidad de las captaciones encontradas en terreno, faena que no estuvo exenta de dificultad, en el sentido que a veces no se contó con la cooperación de los propietarios, algunos de los cuales no permitieron el acceso a sus captaciones y no facilitaron información técnica que permitiera la ejecución correcta de esta labor. No obstante, lo señalado hubo en la mayoría de los usuarios buena voluntad de colaboración en toda la zona del estudio.

Por otra parte, muchas captaciones se encuentran actualmente abandonadas o sin uso y en muchos casos tapadas con tierra, debido a que el descenso en los niveles de la napa ha dejado "colgados" los elementos de captación (cribas o ranurados).

Durante la campaña de terreno se logró cumplir con el objetivo de recopilar la totalidad de la información a la que se tuvo acceso, cubriendo por completo los valles de los ríos Ligua y Petorca y sus tributarios.

Respecto al catastro de captaciones menores tipo norias, drenes y punteras, se encuestaron sólo aquellas cuya explotación de aguas subterráneas fuera importante, dejando de lado aquellas utilizadas sólo para consumo de agua potable propio.

Cada encuesta realizada se efectuó, en lo posible, al propietario o usuario de la captación. A través de la entrevista se procuró conocer las principales características geométricas de la captación, así como la producción actual e histórica y los niveles actuales del agua subterránea. Además, la entrevista contó con una sección de participación ciudadana, donde se consultó al entrevistado acerca de su percepción

de la situación actual del riego en la zona, de los problemas que existen para la distribución u obtención del recurso y otras materias relacionadas con el riego.

Para cada una de las captaciones catastradas se tomaron las coordenadas UTM con Datum WGS84, y la cota.

En las Tablas 2-1 y 2-2 se presenta un resumen del catastro efectuado, para las cuencas de los ríos Petorca y Ligua, respectivamente. En estas tablas se aprecia que en el valle del Petorca el aumento de captaciones alcanza hasta 3 veces la cantidad de 1998, en un período de sólo 12 años. Por otro lado, en el río Ligua la situación es muy distinta, habiéndose catastrado cerca de 40% más de captaciones subterráneas. La diferencia entre ambas se debe a la baja cantidad de captaciones que existía en el río Petorca en 1998, en relación al área que cubre el valle.

Se observa además, que el principal destino de las aguas subterráneas en ambas cuencas es el riego, debido al crecimiento que ha tenido el sector agrícola en los últimos años, principalmente relacionado con el cultivo de paltas.

2.2 Pruebas de Bombeo

El objetivo de las pruebas de bombeo realizadas ha sido complementar la información hidrogeológica en sectores que contaban con poca información.

Tanto para la cuenca del río Ligua como del Petorca, se contó con información de planos de construcción de pozos, con sus pruebas de bombeo; en el Ligua con 63 planos de pozos, mientras que en el Petorca sólo con 17 planos.

En el río Petorca, las 17 pruebas se ubican a lo largo del cauce principal, desde el sector Hierro Viejo hacia aguas abajo. No existe información de pruebas de bombeo en el acuífero asociado al estero Las Palmas, así como en el sector de Chincolco.

Las 63 pruebas de bombeo en el valle del Ligua cubrían la totalidad del área de interés para el estudio, esto es el acuífero asociado al cauce principal y a los cauces tributarios, con la excepción del estero Jaururo y la parte baja de la cuenca.

Por tal motivo, en el valle del río Petorca se ejecutaron 4 pruebas de bombeo que complementaron la cobertura del área; dos de estas pruebas fueron ejecutadas en pozos profundos y las restantes en norias. Por su parte, en el río Ligua se ejecutaron también 4 pruebas de bombeo en los sectores que contaban con menos datos.

A partir de los datos obtenidos durante las pruebas de bombeo, fue posible obtener valores de permeabilidad, que permitieron complementar la información existente. En la Tabla 2-3 se muestra el resumen de los valores de permeabilidad obtenidos con las pruebas.

TABLA 2-1
RESUMEN CATASTRO DE CAPTACIONES RÍO PETORCA

Descripción	Pozos		Norias		Drenes		Punteras		Otros		Total	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Nº Total de Captaciones	115	10%	854	75%	53	5%	35	3%	75	7%	1128	100,0%
Captaciones en Uso												
Riego	76	66%	678	79%	42	79%	24	68%	68	90%	886	78,4%
Potable	16	14%	46	6%	8	15%	1	3%	0	0%	69	6,3%
Industrial	3	3%	3	0,4%	0	0%	0	0%	1	2%	7	0,6%
Riego - Potable	0	0%	1	0,2%	0	0%	0	0%	0	0%	1	0,1%
Otro	0	0%	3	0,4%	0	0%	0	0%	0	0%	3	0,3%
Sin Información	6	5%	51	6%	2	4%	0	0%	3	4%	62	5,5%
Captaciones Sin Uso, Abandonados, Sin Información o No Encontrados												
Sin Uso o Abandonados	14	12%	72	9%	1	2%	10	29%	3	4%	100	8,8%

TABLA 2-2
RESUMEN CATASTRO DE CAPTACIONES RÍO LIGUA

Descripción	Pozos		Norias		Drenes		Punteras		Otros		Total	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Nº Total de Captaciones	149	16%	568	62%	15	2%	151	17%	28	3%	911	100,0%
Captaciones en Uso												
Riego	92	62%	399	70%	9	60%	130	86%	22	79%	652	71,6%
Potable	15	10%	44	8%	1	7%	1	1%	0	0%	61	6,7%
Industrial	1	0,7%	2	0%	0	0%	0	0%	0	0%	3	0,3%
Riego - Potable	2	1,3%	5	1%	0	0%	0	0%	0	0%	7	0,8%
Potable - Otro	2	1,3%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	2	0,2%
Otro	1	0,7%	0	0%	0	0%	2	1%	0	0%	3	0,3%
Sin Información	4	3%	37	7%	2	13%	0	0%	3	11%	46	5,0%
Captaciones Sin Uso, Abandonados, Sin Información o No Encontrados												
Sin Uso o Abandonados	32	21%	81	14%	3	20%	18	12%	3	11%	137	15,1%

TABLA 2-3
PERMEABILIDAD A PARTIR DE PRUEBAS DE BOMBEO

UTM NORTE (m)	UTM ESTE (m)	UBICACIÓN	TIPO	USO	TITULAR	PROF. P. (m)	DIÁM. (")	Q (l/s)	N.E. (m)	N.D. (m)	K (m/s)
6.409.154	278.895	Las Salinas de Pullally	Pozo	P	Comité APR Salinas de Pullally	30	10	1,5	0,2	14,45	9,190E-07
6.403.372	287.821	Quebradilla	Pozo	P	A.P.R. Quebradilla Los Maitenes	40	8	3,2	13,3	27,36	9,938E-06
6.410.161	312.407	El Arrayan San Lorenzo	Pozo	R	Comunidad El Arrayán de San Lorenzo	25	15	14,3	9,49	12,8	1,122E-04
6.418.383	280.316	Casas Viejas	Noria	R	Francisco Del Carmen Prado Vivanco	6	1,5	2,2	3,86	4,87	1,880E-05
6.423.745	304.430	Santa Julia	Pozo	R	Lyle Sweeney Donnelly	80	16	13,3	24,57	36,31	1,222E-05
6.435.418	326.748	Chincolco	Pozo	R	Martín Rodillo	30	10	3,1	13,37	24,97	8,461E-06
6.427.569	312.121	Hierro Viejo	Noria	P	Agua Potable Hierro Viejo	7,5	1,5	5,1	5,46	5,83	1,080E-05
6.412.716	322.074	La Viña	Pozo	P	Agua Potable La Viña	50	12	7,4	13,67	19,08	4,113E-05
6.408.132	290.965	Planta Agua Clara	Noria	P	ESVAL S.A.	13	2	2,5	6,83	7,10	2,666E-05

2.3 Estudio Geofísico

En la ejecución del estudio geofísico se elaboraron perfiles gravimétricos y TEM.

El estudio gravimétrico consistió en 2 perfiles longitudinales (uno en cada cauce), con estaciones cada 1 Km aproximadamente, además de 11 perfiles transversales en el río Ligua y 8 perfiles en el Petorca, con estaciones cada 250 m aproximadamente.

Por su parte, el estudio con estaciones TEM, consistió en 10 perfiles transversales a lo largo del río Ligua y 3 en Petorca. En este último cauce, no fue posible obtener la autorización de los propietarios para instalar el instrumental de varios de los TEM considerados inicialmente, por lo que sólo se pudieron concretar 3 perfiles. La separación de las estaciones TEM fue de aproximadamente 200 m.

2.4 Caracterización Hidrogeológica

A partir de la información obtenida durante la Campaña de Terreno, fueron generadas las curvas equipotenciales que posteriormente se utilizaron para definir las condiciones de borde en el Modelo Hidrogeológico.

Respecto a los niveles medidos en el valle del río Petorca, éstos se encuentran en promedio en torno a los 6 m de profundidad, pudiendo encontrarse en algunas captaciones tipo pozo profundo, incluso hasta 57 m bajo el nivel de terreno

Para el valle del río Ligua, en promedio el nivel del agua subterránea se encuentra entre 7 y 8 m bajo el nivel de terreno, pudiendo encontrarse en algunas captaciones hasta a los 34 m de profundidad.

En cuanto a afloramientos de napa a lo largo de ambos valles, durante la campaña de terreno no se detectaron puntos donde se observaran recuperaciones de agua del río o afloramientos. Aunque en épocas anteriores éstos efectivamente existían, en la actualidad no aparecen, debido en gran medida a la situación de escasez hídrica y a la intensa explotación a que están siendo sometidos los acuíferos, por el incremento en las áreas de cultivo.

Para la determinación de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos de ambas cuencas se utilizó la información de planos de pozos, con estratigrafía del material atravesado, habilitación y datos de la prueba de bombeo de gasto variable, además de datos de las pruebas de bombeo efectuadas en este trabajo. En la Tabla 6-4 se consignan los valores de parámetros hidrogeológicos obtenidos.

En la parte baja de la cuenca del río Petorca los valores de permeabilidad alcanzan en promedio $4 \cdot 10^{-5}$ m/s, mientras que hacia aguas arriba de Longotoma, hasta el sector de Hierro Viejo, la permeabilidad es en promedio superior, alcanzando los $2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Por su parte, en el sector de Chicolco, en la parte alta de la cuenca, se observa una permeabilidad bastante menor, llegando sólo a los $8 \cdot 10^{-6}$ m/s. Por su parte, los valores de permeabilidad en el estero las Palmas llega a $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

En la parte baja de la cuenca del río Ligua se observa una permeabilidad similar a la del sector de Longotoma, llegando en promedio a un valor de $2 \cdot 10^{-5}$ m/s. En la parte media de la cuenca, desde aguas arriba de la ciudad de La Ligua hasta aguas abajo de San Lorenzo, los valores de permeabilidad son del orden de $4 \cdot 10^{-3}$ m/s, mientras que en la parte alta de la cuenca, aguas arriba de San Lorenzo, descienden en promedio hasta $2 \cdot 10^{-4}$ m/s. Respecto a los cauces tributarios, en general presentan valores de permeabilidad muy inferiores a los del acuífero principal. En el estero Jaururo se observa un valor de $K=5 \cdot 10^{-6}$ m/s, en La Patagua $K=3 \cdot 10^{-7}$ m/s y finalmente, el acuífero asociado al estero Los Ángeles tiene un valor promedio de $K=3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

En relación con el coeficiente de almacenamiento, por no existir pruebas de bombeo de gasto constante con pozos de observación, a partir de las cuales se pudiera calcular este coeficiente, se han estimado esos valores haciendo uso de la estratigrafía de los pozos. Para el valle del río Petorca, el valor de S está en el orden de 5% a 15%, mientras que para el río Ligua, entre 10% y 15%.

A partir de los niveles y de parámetros hidrogeológicos, se determinó el flujo potencial que pasa por distintas secciones de escurrimiento. Se estableció en primer lugar las distribuciones espaciales de permeabilidad, mientras que para la geometría, morfología y estratigrafía de los cuerpos acuíferos se usaron la información de los TEM, de las prospecciones geofísicas y de los planos de construcción de pozos. Aplicando la Ley de Darcy se obtuvo los caudales subterráneos pasantes por 11 secciones transversales de los cauces (5 en el Petorca y 6 en el Ligua). Estos flujos van de entre unos pocos l/s hasta más de 1 m³/s en las distintas secciones de los cauces de ambos valles.

2.5 Demandas de Agua Subterránea

Las demandas de aguas subterráneas en ambas cuencas fueron determinadas a partir de la información de los catastros realizados, como uso actual, de antecedentes de estudios recientes y de información de catastros frutícolas y censos agropecuarios. Las demandas se individualizaron según el destino de las aguas en Riego, Agua Potable e Industrial y Minero.

A partir de ciertas consideraciones sobre el uso histórico de las aguas subterráneas se pudo establecer las demandas históricas, que fueron de gran utilidad posteriormente, cuando se modelaron distintos escenarios. Del mismo modo, se definió demandas futuras, de acuerdo a los estudios de factibilidad de obras de embalse, a catastros poblacionales y a estudios específicos de demanda industrial y minera.

2.6 Derechos de Agua Subterránea

Con el objetivo de determinar la demanda legal de aguas subterráneas en las cuencas de Petorca y Ligua, se solicitó a la DGA, la información de derechos de aguas subterráneas constituidos, en trámite y denegados en el área de las cuencas de ambos ríos.

En la cuenca del río Petorca hay un total de 2.448 expedientes ingresados en el período Febrero 1956 a Enero 2010, los cuales se dividen entre derechos constituidos (1114), solicitudes denegadas (531) y solicitudes pendientes (803).

Por su parte, en la cuenca del río Ligua hay 1.887 solicitudes de derechos de aguas subterráneas, de las cuales 872 corresponden a derechos constituidos, 464 denegados y 551 pendientes.

Debe señalarse que las solicitudes de derechos pendientes podrían aprobarse pasando a constituir derechos provisionales de aguas subterráneas, hasta no más allá del 25% de los derechos constituidos, tal como lo establecen las Normas de Procedimiento de la DGA para estos efectos.

3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

3.1 Dominio del Modelo

El dominio definido para el área a modelar se extiende entre coordenadas U.T.M. Este 270.000 m y 338.000 m (68 km, 340 columnas) / Norte 6.392.000 m y 6.444.000 m (52 km, 260 filas), según Datum WGS 84, con celdas de 200·200 m.

3.2 Geometría de los Acuíferos

En el acuífero del sistema estudiado no existe una diferenciación clara de acuíferos, como ocurre en otros casos donde coexisten rellenos de propiedades marcadamente diferentes. En los rellenos de los ríos Ligua y Petorca se han observado napas predominantemente libres y sólo variaciones estratigráficas locales, no reproducibles con un modelo regional como el elaborado.

De acuerdo a lo anterior, se optó por representar el relleno a través de un estrato único, de propiedades conductivas y de almacenamiento equivalentes.

GCF Ingenieros Limitada

- **Nivel de terreno**

Para definir las elevaciones de terreno se usaron curvas cada 2.5 m que cubren los valles, obtenidas de la cartografía de la CNR escala 1:10.000; el resto del dominio se completó con los datos de un ráster SRTM. Integrando ambas fuentes de información topográfica se estimaron las elevaciones para cada celda del modelo.

- **Espesor del relleno**

El límite inferior de la malla se definió utilizando los datos generados por las prospecciones geofísicas realizadas en la zona para el estudio. Con estas prospecciones se obtuvo la posición del basamento (perfiles gravimétricos) y una interpretación de medios que conforman el relleno (TEMs).

Combinando esos datos se generó la superficie del fondo del relleno, en que las elevaciones de esa superficie en áreas sin información se estimaron interpolando. Para efectos de la modelación, se suavizó la superficie obtenida.

El basamento representado en la malla corresponde a una idealización del fondo real (suavizado). Esa idealización se hace para hacer converger el modelo, en particular en los bordes del relleno, donde los estratos de elevada pendiente y espesor reducido tienden a secarse, generando inestabilidad en el proceso de cálculo. Para evitarlo, se usa un espesor mayor al real, con una permeabilidad menor, lo que equivale a modificar la geometría, manteniendo la transmisibilidad.

3.3 Componentes del Flujo y Condiciones de Borde

Las componentes de entrada y salida del flujo se detallan a continuación.

- **Recarga por infiltración de precipitaciones**

La recarga distribuida fuera de los cauces principales, depende, entre otros, del agua de lluvia disponible para infiltrar y de la capacidad de conducción vertical de los medios permeables.

Se dispone de estadísticas de lluvias mensuales rellenadas en 14 estaciones pluviométricas ubicadas en el entorno de las cuencas de los ríos Ligua y Petorca. La recarga por precipitaciones fue estimada en función de los datos de lluvia registrados en las estaciones mencionadas; la distribución y cuantía de ésta se determinó iterativamente, operando el modelo.

Para cada estación, se sumaron las lluvias anuales acumuladas para el período 1950/1951 a 2009/2010 y se calculó la variación de cada año con relación al promedio anual histórico registrado en cada estación. La variación histórica de la recarga por lluvia para el dominio modelado, se calculó en función de la variación promedio de las lluvias anuales registradas en las estaciones consideradas.

- **Recarga superficial por infiltración de excedentes de riego**

Para cuantificar las recargas provenientes de las pérdidas del riego, se usó la información del censo agropecuario de 2007¹; que presenta la distribución de superficies, según tipo de riego, en la zona de interés. A dichas superficies se les asoció la eficiencia de riego de cada método, según lo indicado en el Reglamento de la Ley 18.450 de Fomento a la Inversión Privada en Obras de Riego y Drenaje.

La eficiencia promedio para la zona de estudio se calculó como el promedio ponderado de las eficiencias con las superficies obtenidas del censo agropecuario; el resultado es 0.761. Según esto, es posible asumir que un 23.9 % (factor de pérdida de aplicación) del agua usada para riego, recarga a la napa. En rigor, parte de ella se evapora y no llega al acuífero, aunque existen pérdidas de conducción en la red de canales que suman al caudal de recarga; por esto, se considera razonable adoptar dicho porcentaje como recarga promedio por riego actual.

Para la variación del porcentaje de infiltración de la recarga por riego a través del tiempo, se consideró que el cambio mayor de sistemas de riego tradicionales a tecnificados, se produjo en los 80, debido al boom de los frutales. Se adoptó que en 1950 el riego era principalmente tradicional, por lo que la eficiencia de aplicación era del 60 %, con un 40 % para infiltración, según las mismas simplificaciones explicadas anteriormente. Desde 1950 a 1985, se usó una variación lineal para las mejoras en tecnificación y por consiguiente, para el porcentaje del riego que infiltra.

Los caudales aplicados a las zonas de riego también han variado a través del tiempo². El riego de origen subterráneo se supuso equivalente al bombeo de los pozos, lo que es una simplificación razonable, ya que la mayor parte del bombeo en la zona es para riego. Los caudales de recarga al sistema modelado se calcularon ponderando el caudal de riego total (subterráneo + superficial) por factores de infiltración a través del tiempo.

- **Flujos río-napa y napa-río**

Se definieron los cauces naturales principales y se representaron a través de celdas del tipo río. Las conductancias de esas celdas se ajustaron en la calibración del modelo. El procedimiento se hizo en paralelo, partiendo con un valor bajo de conductancia (10 m²/día), adoptado según la experiencia. Ese valor permite representar ríos con poca influencia sobre el acuífero o que presentan flujos intermitentes. Esa condición base se adoptó para representar los ríos en el modelo.

Al buscar reproducir los niveles medidos en algunos puntos, con caudales estimados de explotación, las conductancias se fueron aumentando gradualmente en algunas áreas. Así se pudo representar relaciones río-napa que posibilitan una explotación intensa sin grandes descensos. En zonas donde se usó conductancias altas, el río recarga más el acuífero, estabilizando los niveles de agua subterránea.

¹ VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal, 2007.

² Modelación integral de los recursos hídricos de los valles de los ríos la Ligua y Petorca. Elaborado por P. Isensee para la Dirección de Obras Hidráulicas en 2004.

Dependiendo de las características de los medios, de las condiciones de recarga y del nivel de explotación, en algunos sectores se producen aportes desde los cauces a los acuíferos (flujo río-napa) y en otros, recuperaciones (flujo napa-río).

- **Bombeo desde captaciones de agua subterránea**

Los datos de explotación de agua subterránea se obtuvieron de encuestas realizadas en terreno en que se catastraron las captaciones actualmente existentes en el área. Entre éstas se identificaron pozos profundos, norias, punteras, drenes y zanjas, además de captaciones mixtas, tales como norias-drenes.

Los caudales de bombeo se estimaron de la información de las encuestas, donde se consultó sobre el caudal de bombeo y la frecuencia de uso en semestres de verano (octubre-marzo) e invierno (abril-septiembre). En función de esos datos, se calculó los caudales de bombeo promedio y se incorporó al modelo en períodos anuales, partiendo en la fecha de construcción de cada captación.

El total de 1.717 captaciones se ingresaron al modelo individualmente (730 en Ligua y 987 en Petorca). De ese total, se excluyeron las captaciones sin coordenadas, las sin uso, las que se ubican fuera del dominio modelado y aquellas que se encuentran en zonas consideradas como inactivas (roca, cerros, etc.).

- **Afloramientos fuera de cauces (vertientes)**

En zonas con baja capacidad de conducción, los medios se saturan completamente y se produce surgencia de aguas; es decir, el nivel freático tiende a superar el nivel de terreno, generando un afloramiento. Frecuentemente dicha surgencia ocurre en áreas bajas y origina recuperaciones en cauces menores y zonas de vegas.

Los afloramientos han sido representados en el modelo mediante celdas del tipo dren, ya que éstas permiten la salida de los excesos de agua, lográndose representar los afloramientos, recuperaciones y vertientes.

- **Flujo subterráneo de salida al mar**

La descarga del flujo subterráneo se representó imponiendo elevación 0 m.s.n.m. en celdas de nivel constante.

3.4 Calibración del Modelo

El proceso de calibración consistió en la modificación de parámetros y operación sucesiva del modelo elaborado para reproducir la variación histórica de los niveles de agua medidos en puntos de control.

Los parámetros de ajuste fueron las permeabilidades y los coeficientes de almacenamiento. También se ajustaron variables asociadas a las componentes del flujo y condiciones de borde, tales como las recargas y las conductancias de las celdas de tipo río.

- **Pozos de observación**

Se cuenta con 32 pozos pertenecientes a la red de monitoreo de niveles de agua subterránea de la DGA. En la Tabla 9-1, sus principales características.

Tabla 9-1. Pozos de observación

Identificador pozo en modelo	Identificación de pozo de observación	Código BNA	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Elevación terreno [m.s.n.m.]	Prof. de nivel mín. [m]	Prof. de nivel máx. [m]
ob1	Agua potable valle Los Olmos	05100008-0	328526	6434016	694.1	1.3	6.0
ob2	Parcelas Luis Silva	05100009-9	329284	6434090	713.4	2.1	6.8
ob3	Escuela Chalaco	05100010-2	329909	6437428	719.9	2.9	14.2
ob4	Los Olmos - Chalaco	05101007-8	329885	6437274	721.3	1.4	10.9
ob5	Agua potable Polcura	05110004-2	323658	6432301	581.9	1.1	6.6
ob6	Agua potable Hierro Viejo	05110005-0	310537	6426764	388.6	1.1	5.1
ob7	Sociedad agrícola Bellavista	05110006-9	319082	6430433	514.8	0.9	3.9
ob8	Santa Julia	05111005-6	305837	6422084	302.4	0.2	4.1
ob9	Agua potable Pullancón	05120009-8	292174	6422274	99.2	0.1	7.0
ob10	Agua potable La Canela	05120010-1	295720	6417756	178.9	0.8	6.3
ob11	Asentamiento Los Tigres	05120011-K	295516	6420062	126.3	1.6	4.0
ob12	Agua potable Longotoma	05120013-6	277172	6414311	8.5	0.7	5.5
ob13	Agua potable Santa Marta	05120015-2	294676	6420199	124.9	0.1	6.2
ob14	Agua potable Pedegua	05120016-0	305253	6418468	260.8	0.7	10.4
ob15	Agua potable El Trapiche	05120017-9	285549	6422536	51.8	0.1	5.2
ob16	Parcela Piwonka	05120018-7	289120	6424430	96.5	2.2	2.5
ob17	Asentamiento V. Aconcagua	05210003-8	321115	6413247	392.9	1.3	11.1
ob18	Asentamiento Piliún	05210004-6	324218	6415150	444.9	1.9	8.0
ob19	Asentamiento Bartolillo	05210005-4	327355	6415205	560.4	2.3	16.9
ob20	Fundo El Molle	05210006-2	319580	6411371	333.4	8.6	23.5
ob21	Reserva La Vega	05210007-0	316480	6409466	291.5	2.1	12.2
ob22	Asentamiento San Lorenzo	05210008-9	311778	6409379	243.3	2.1	9.5
ob23	Agua potable Cabildo	05220009-1	307041	6411138	187.3	1.6	5.7
ob24	La Higuera	05220010-5	295871	6403892	87.2	0.4	3.3
ob25	Fundo Montegrande	05220011-3	303203	6408229	149.2	0.7	3.3
ob26	Parcela El Boldo	05220012-1	299362	6416134	169.9	2.1	2.4
ob27	Pozo Dren Cabildo	05220013-K	309398	6410875	209.3	4.3	7.0
ob28	Agua potable Papudo y Zapallar	05221007-0	281999	6408777	10.6	0.0	6.1
ob29	Agua potable Ligua	05221008-9	291441	6407129	53.0	1.4	7.7
ob30	Agua potable Placilla	05221009-7	283719	6407798	15.9	0.1	4.9
ob31	Agua potable Valle Hermoso (1)	05221010-0	293476	6407294	63.3	0.7	7.0
ob32	Agua potable Valle Hermoso (2)	05221011-9	293449	6407325	63.3	0.6	6.5

- **Régimen Permanente**

Se realizó un ajuste de niveles en régimen permanente, lo que puede considerarse como representativo de la condición promedio del acuífero antes de 1950.

El error cuadrático medio normalizado ("Normalized RMS" en VMF) resultó de 0.7 %, por lo que el ajuste obtenido se consideró adecuado.

- **Régimen impermanente**

La calibración del modelo en régimen impermanente cubre el período 1950-2010. Los intervalos de tiempo considerados son anuales.

Las variaciones de niveles obtenidos en algunos puntos difieren un poco de los datos medidos, sin embargo se considera que los resultados son aceptables. Se debe tener en cuenta que las extracciones utilizadas pueden tener un error importante, ya que provienen de las respuestas de los usuarios a la consulta respectiva. Los flujos de recarga por riego, estimados de acuerdo con los caudales de riego, se basan en varios supuestos que podrían involucrar diferencias

relevantes con los caudales que realmente infiltran en las áreas cultivadas. Por ello, se estima que el tiempo y esfuerzo invertidos en la calibración del modelo en condición impermanente es coherente con la dificultad que involucra el proceso, para ajustar de manera precisa niveles medidos y simulados.

No obstante lo señalado, el modelo elaborado entrega flujos y niveles en los órdenes de magnitud reales y con los antecedentes con que se cuenta, es posible obtener resultados aceptables y de utilidad práctica.

- **Coefficientes de almacenamiento**

Para efectos de la representación matemática del sistema acuífero, el agua almacenada se considera como una componente más del flujo; por ello, una entrega de agua desde el almacenamiento, en Visual Modflow se contabiliza como un flujo de entrada al balance.

De forma análoga, un incremento del volumen de agua almacenado, equivale a un flujo de salida, en términos del balance.

La cuantía de los flujos asociados al almacenamiento depende de los coeficientes de almacenamiento adoptados. Éstos fueron ajustados con la calibración del modelo.

- **Permeabilidades y transmisibilidades**

El proceso de calibración partió con una distribución aproximada de permeabilidades, obtenida de los valores puntuales calculados en función de datos registrados en pruebas de bombeo.

Operando el modelo en régimen permanente e impermanente y efectuando cambios graduales en las permeabilidades, se obtuvo la distribución final adoptada para el modelo. Los valores utilizados se encuentran dentro de los rangos obtenidos en las pruebas de bombeo realizadas en los pozos existentes en el área de estudio.

Los valores calculados en las pruebas de bombeo varían entre $3 \cdot 10^{-7}$ y $2 \cdot 10^{-2}$ m/s y los utilizados en el modelo, entre 10^{-8} y $5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Dichos rangos son adecuados, puesto que las permeabilidades medidas describen los estratos superficiales, atravesados por la captación en la que se hizo la prueba, y los valores del modelo, representan la permeabilidad equivalente de todo el espesor saturado del relleno. El adoptar una permeabilidad de $2 \cdot 10^{-2}$ m/s (arena-grava) en un acuífero de 200 m de espesor es claramente irreal y subdimensiona la respuesta en depresiones del acuífero representado con el modelo.

Con los valores de permeabilidad obtenidos y los espesores de relleno, se calcularon los rangos de transmisibilidades resultantes.

3.5 Balance Período Histórico

Con el modelo calibrado para el período 1950-2010 es posible generar resultados de salida que permiten visualizar las componentes del flujo a través del tiempo.

Con dichos resultados ha sido posible establecer que el flujo subterráneo de descarga al mar se ha reducido en el tiempo, debido a que los gradientes han disminuido producto de los descensos generados por la extracción de agua subterránea en los valles.

Por otra parte, los afloramientos y las recuperaciones en cauces han ido disminuyendo sostenidamente a través del tiempo. El caudal de afloramiento promedio actual (252 l/s) es prácticamente un cuarto del estimado en 1950. Los bombeos han deprimido los niveles en la mayor parte de los valles; por ello, los afloramientos han disminuido y se concentran en torno a los ríos y en los meses de invierno.

A su vez, la recarga (riego + lluvia) se ha mantenido estable; esto se debe a que la disminución esperada en los excedentes de riego, debido a la mejora en la eficiencia de aplicación, ha estado ligada a un aumento de la superficie cultivada y a una entrega mayor (en volumen de agua) debido al paulatino aumento del bombeo para riego.

Se puede observar que la recarga total (riego + lluvia + aporte del río) ha crecido en el tiempo. El descenso de los niveles freáticos en algunos sectores, debido al bombeo, ha generado un vaciamiento del almacenamiento y un incremento del gradiente río-napa, posibilitando que aumente el aporte desde los cauces a los acuíferos. Se debe tener en cuenta que los flujos superficiales no son continuos y dicho aporte sólo se verifica en los períodos húmedos, en los cuales existe disponibilidad de flujo superficial.

Finalmente, se ha determinado una tendencia de descenso promedio en el volumen almacenado en los acuíferos entre 1950 y 2010 de 91 millones de m³, equivalentes a 48 l/s (27 l/s en Ligua y 21 l/s en Petorca). La entrega creciente desde el embalse subterráneo ha permitido el aumento de la explotación de agua subterránea. Además del agua proveniente del almacenamiento, se debe considerar una mayor recarga de los cauces en períodos húmedos y menores recuperaciones y afloramientos.

3.6 Conclusiones de la Elaboración y Calibración del Modelo

La recarga real al acuífero fue estimada iterativamente operando el modelo. Los volúmenes que efectivamente recargan el acuífero dependen de muchos factores, varios de los cuales son prácticamente imposibles de medir. A pesar de ello, se logró cuantificar los flujos de recarga de manera consistente con el funcionamiento global del sistema, la hidrología y las solicitudes a las que éste está sometido.

Evidentemente el sistema estudiado no se encuentra en equilibrio. La explotación de agua subterránea creciente, ha generado un vaciamiento gradual del agua

almacenada. La extracción actual estimada alcanza a aproximadamente 1.600 l/s como promedio anual y la recarga proveniente de las lluvias y el riego es, en promedio, de aproximadamente 870 l/s. La diferencia es cubierta por el agua almacenada y los aportes río-napa.

En términos prácticos, en un futuro cercano el nivel creciente de explotación de los acuíferos comenzará a generar problemas locales, puesto que en algunos sectores el descenso de los niveles secará las captaciones más someras y reducirá el rendimiento de los pozos más profundos. Sin embargo, los niveles medidos en los pozos de control muestran que la situación aún no es crítica, y en la mayoría de los pozos de monitoreo de la DGA aún se advierte una estacionalidad de los niveles, sin que se vea una marcada tendencia al descenso que dé una señal de agotamiento.

La red de la DGA es limitada y no cubre todos los sectores que interesa estudiar, por lo que podrían existir áreas críticas que no son evidenciadas por los niveles medidos en los pozos de la DGA.

4 MODELACIÓN DE ESCENARIOS

4.1 Definición de los Escenarios de Modelación

El modelo calibrado fue utilizado para analizar la respuesta del sistema acuífero, ante distintos escenarios de extracción. Se modeló un período de tiempo de 60 años (2010 a 2070). La condición hidrológica adoptada para las simulaciones futuras, corresponde al período 1950-2010, usada en la calibración del modelo.

A continuación se resumen las principales características de los escenarios definidos para la modelación.

Escenario 1: Extracción Actual

Este escenario consiste en prolongar en el tiempo el uso real actual, es decir, el bombeo considerado en la calibración del modelo para el año hidrológico 2009-2010 (01-04-2009 a 01-04-2010).

Los caudales de extracción para este escenario coinciden con la realidad actual observada en las cuencas; la información base, usada para la estimación de dichos caudales, proviene de las encuestas realizadas para el presente estudio.

Las recargas y las conductancias de las celdas tipo río corresponden a las mismas usadas en la calibración del modelo (período 1950-2010).

Escenarios 2 y 3: Demandas Actual y Futura

Estos escenarios consideran demandas hídricas actual y futura. Los bombeos se definieron adoptando la distribución de pozos y caudales del uso actual (escenario

1), ponderando las extracciones en cada captación por la relación entre los caudales totales demandados por cuenca y los caudales actualmente bombeados.

Las recargas y las conductancias de las celdas tipo río corresponden a las mismas usadas en la calibración del modelo (período 1950-2010).

El escenario 2 define caudales de extracción a los correspondientes a demandas de situación actual, según distribución de captaciones de uso actual (escenario 1).

El escenario 3 considera como caudales de extracción, los correspondientes a las demandas de situación futura (a 10 años), según la distribución de captaciones del uso actual (escenario 1).

Escenarios 4, 5 y 6 Asociados a Derechos de Agua

Para los 3 escenarios de derechos (4, 5 y 6), las recargas y las conductancias de las celdas tipo río corresponden a las mismas usadas en la calibración del modelo (período 1950-2010).

En los expedientes de derechos no se detalla el uso. Para efectos de la operación, según la situación legal, se asumió que todos corresponden al uso riego. Su uso real generalmente es bastante menor al derecho de aprovechamiento. Se consideró un 20 % del caudal de derecho (otorgado o solicitado, según el caso).

En los escenarios modelados se incluyeron los caudales según el uso real, es decir, los caudales de los expedientes ponderados por 0.2.

El escenario 4 consiste en adoptar el bombeo correspondiente a los caudales de uso real de los derechos constituidos. Se ingresó al modelo un total de 1630 captaciones con sus correspondientes ubicaciones y caudales de uso real. El detalle por cuenca es: Petorca 858 l/s, Ligua 975 l/s y total 1833 l/s.

El escenario 5 corresponde al bombeo de caudales reales de derechos aprobados y pendientes. Se ingresó al modelo un total de 2759 captaciones (1630 aprobados + 1129 pendientes), con sus correspondientes ubicaciones y caudales de uso real.

El caudal total de bombeo de partida es de 2374 l/s (1833 l/s + 541 l/s).

El escenario 6 incluye las captaciones del escenario anterior más las de los expedientes denegados, con un total de 3535 puntos de extracción (1630 aprobados + 1129 pendientes + 776 denegados).

En cuanto a caudales, se parte bombeando 4557 l/s (1833 l/s + 541 l/s + 2183 l/s).

Escenarios 7 y 8 de Sustentabilidad DGA

Estos escenarios fueron definidos bajo un criterio de sustentabilidad, que considera que no se produzcan efectos adversos al acuífero, como se indica a continuación. De acuerdo a lo establecido en el Artículo 31 de la Resolución DGA N°425, del 31 de diciembre de 2007, que deja sin efecto la Resolución DGA N°341 de 2005 y

establece un nuevo texto de resolución que dispone normas de exploración y explotación de aguas subterráneas, la DGA deberá declarar un determinado sector hidrogeológico de aprovechamiento común como área de restricción para nuevas explotaciones de aguas subterráneas, de oficio o a petición de cualquier usuario del respectivo sector, cuando los estudios técnicos demuestren que la explotación previsible del acuífero ocasionará efectos adversos.

Los efectos adversos mencionados se detallan a continuación:

- a. Que los descensos generalizados provoquen el agotamiento de algunas zonas del acuífero, imposibilitando la extracción de aguas subterráneas de derechos de aprovechamiento existentes en dichas zonas.
- b. Que la recarga del acuífero sea superada, produciendo descensos sostenidos de sus niveles, hasta provocar reducciones mayores al 5% del volumen almacenado en un plazo de 50 años.
- c. Que se produzca afección a los caudales de los cursos de aguas superficiales y vertientes en más de 10% del caudal medio de estiaje del año con un 85% de probabilidad de excedencia, afectando derechos de aprovechamiento existentes.
- d. Que exista peligro de contaminación del acuífero por desplazamiento de aguas contaminadas o de la interfase agua dulce-salada en sectores próximos a aguas salobres, comprometiendo las captaciones existentes.
- e. Que exista peligro de afección al medio ambiente en los sectores protegidos indicados en el artículo 22 letra f) de la misma resolución.

Estos escenarios se modelaron a partir del bombeo actual (escenario 1) y éste se fue reduciendo gradualmente hasta no producir efectos adversos según la DGA.

En los escenarios de sustentabilidad DGA, las recargas y las conductancias de las celdas tipo río son las mismas usadas en la calibración del modelo (1950-2010).

El escenario 7 considera las restricciones descritas y particularmente la del límite en la reducción del volumen almacenado en un 5%, para un período de 50 años.

Por su parte, el escenario 8 es semejante al anterior, pero modificando el valor límite del volumen permitido de extraer desde el embalse subterráneo, aumentándolo de 5% a 30%, en el mismo período de 50 años.

Escenarios 9 y 10 de Recargas Inducidas y por la Operación de Embalses

El escenario 9 se configuró como la condición de bombeo correspondiente al uso actual (escenario 1), más recargas adicionales, inducidas en sectores específicos.

Los sectores de recarga definidos son los siguientes:

- i. Sectores ubicados aguas abajo de las plantas de tratamiento de aguas servidas de Petorca, Chicolco, La Ligua y Cabildo.
- ii. Sectores específicos de cada cauce (ríos Petorca y Ligua), donde sería factible construir espigones que permitan aumentar el tiempo de tránsito de las aguas superficiales. Se busca aumentar las tasas de infiltración en el lecho especialmente durante las crecidas y períodos inmediatamente posteriores.

Con el escenario 10 se procuró modelar el efecto integral sobre los acuíferos que tendría la materialización de los proyectos de embalses que se están desarrollando para la zona de estudio. Los principales efectos son:

- a) Aumento de Recargas por Excedentes de Riego
- b) Infiltración desde Lagos de Embalses Proyectados
- c) Variación de Aporte Neto Río-Napa

4.2 Operación del Modelo para los Escenarios Definidos

Como se indicó, cada escenario definido se simuló para un período de de 60 años (2010 a 2070). La condición hidrológica utilizada para las simulaciones futuras, corresponde al período 1950-2010, usada en la calibración del modelo.

Se usó intervalos de modelación anuales , coincidentes con los años hidrológicos.

La recarga estimada para el año hidrológico 1950/-1951 se usó para modelar el año 2010/-2011 de los escenarios de operación. Siguiendo dicha secuencia, la recarga histórica del año 2009-2010 se asoció al año 2069-2070.

Debido a que los caudales de bombeo de todos los escenarios de extracción, en alguna medida exceden la capacidad del acuífero, se operó cada escenario de forma iterativa, partiendo con los caudales establecidos en cada caso. Tras finalizar cada ejecución, se identificaron las celdas con descensos excesivos (celdas secas) y los pozos ubicados en las mismas fueron desactivados para ejecutar la siguiente iteración del modelo. Con ese procedimiento, se logró reducir los caudales impuestos de forma gradual, obteniendo límites globales de solicitud del sistema, para cada configuración definida por los escenarios de operación.

El principal resultado de la modelación son los caudales explotación admisibles de cada escenario. Se entiende por caudales admisibles, aquellos bombeos que no generan descensos exagerados en los niveles de agua subterránea en un sector; es decir, son caudales admisibles que no producen disminuciones en los rendimientos de los pozos del área. El caso extremo de influencia negativa de un bombeo elevado, es dejar captaciones colgadas (nivel dinámico bajo el fondo de la captación), lo que el modelo representa a través del secado de celdas.

- Escenario 1: Extracción Actual

Los caudales de bombeo admisibles en este escenario son los de la Tabla 4-1.

Tabla 4-1
Caudales de Bombeo Admisibles

Cuenca	Caudal Inicial [l/s]	Caudal admisible [l/s]	Reducción [l/s]	Reducción [%]
Petorca	602	557	45	7.4
Ligua	992	884	108	10.9
Total	1594	1442	152	9.5

De la Tabla 4-1 se observa que los caudales actuales de extracción exceden la capacidad sostenible del acuífero (suma de los caudales admisibles). Con una disminución cercana al 10 %, se llegaría a una explotación admisible en el tiempo.

- **Escenario 2: Demanda Actual**

Los caudales de bombeo admisibles en este escenario serían los de la Tabla 4-2.

Tabla 4-2
Caudales de Bombeo Admisibles

Cuenca	Caudal Inicial [l/s]	Caudal admisible [l/s]	Reducción [l/s]	Reducción [%]
Petorca	1603	635	968	60.4
Ligua	2526	1623	903	35.7
Total	4129	2258	1871	45.3

El caudal admisible en este escenario resultó mayor que el actual y se producen efectos no deseados en las zonas costeras debido a que el bombeo es tal que reduce el flujo pasante y la descarga hacia el mar (se genera un flujo en sentido contrario), lo que genera la salinización del acuífero en áreas cercanas a la costa.

- **Escenario 3: Demanda Futura**

Los caudales de bombeo para este escenario se presentan en la Tabla 4-3.

Los caudales admisibles para este escenario resultaron mayores que los de extracción actual, y semejantes, aunque levemente inferiores a los de demanda actual. Se produce el mismo efecto de intrusión del escenario de demanda actual.

Tabla 4-3
Caudales de Bombeo Admisibles

Cuenca	Caudal Inicial [l/s]	Caudal admisible [l/s]	Reducción [l/s]	Reducción [%]
Petorca	3470	558	2912	83.9
Ligua	4720	1686	3034	64.3
Total	8190	2243	5947	72.6

- **Escenario 4: Derechos Constituidos**

Los caudales admisibles para este escenario son los de la Tabla 4-4.

Tabla 4-4
Caudales de Bombeo Admisibles

Cuenca	Caudal admisible esc. uso actual [l/s]	Caudal Inicial [l/s]	Caudal admisible [l/s]	Reducción [l/s]	Reducción [%]
Petorca	557	858	732	126	14.7
Ligua	884	975	798	177	18.1
Total	1442	1833	1530	303	16.5

Los caudales admisibles en este caso resultaron mayores en Petorca que en Ligua, en comparación a los caudales admisibles del escenario de uso actual. Esto se debe a que la distribución de captaciones con derechos y los caudales otorgados no coinciden con la distribución de captaciones usadas realmente (uso actual).

- **Escenario 5: Derechos Pendientes**

Los caudales de bombeo admisibles de este escenario son los de la Tabla 4-5.

Tabla 4-5
Caudales de Bombeo Admisibles

Cuenca	Caudal admisible esc. uso actual [l/s]	Caudal Inicial [l/s]	Caudal admisible [l/s]	Reducción [l/s]	Reducción [%]
Petorca	557	1201	852	349	29.1
Ligua	884	1173	942	230	19.6
Total	1442	2374	1794	579	24.4

Los caudales admisibles en este caso son mayores para ambas cuencas, comparados con los caudales admisibles del escenario de uso actual. Esto se debe a que la distribución de captaciones con derechos otorgados y pendientes y sus correspondientes caudales asociados, no coinciden con la distribución de captaciones que actualmente son usadas (uso actual).

- **Escenario 6: Derechos Denegados**

Los caudales de bombeo admisibles para este escenario son los de la Tabla 4-6.

Los resultados obtenidos para este escenario son semejantes a los escenarios anteriores, con flujos de intrusión importantes.

Tabla 4-6
Caudales de Bombeo Admisibles

Cuenca	Caudal admisible esc. uso actual [l/s]	Caudal Inicial [l/s]	Caudal admisible [l/s]	Reducción [l/s]	Reducción [%]
Petorca	557	2360	723	1638	69.4
Ligua	884	2197	1134	1063	48.4
Total	1442	4557	1856	2701	59.3

- **Escenario 7: Sustentabilidad DGA 5%**

Los caudales de bombeo admisibles para este escenario (sin celdas secas) son los de la Tabla 4-7A, iguales a los del escenario 1. En esa condición, los vaciamientos promedios al año 50 serían los consignados en la Tabla 4-7B

Tabla 4-7A
Caudales de Bombeo Admisibles

Cuenca	Caudal Inicial [l/s]	Caudal admisible [l/s]	Reducción %
Petorca	602	557	7.5
Ligua	992	884	10.9
Total	1595	1442	9.6

Tabla 4-7B
Vaciamiento de Agua Almacenada

Cuenca	Vaciamiento en 50 años [%]
Ligua	4.2
Petorca	6.3
Global	5.2

Las celdas secas son las mismas del escenario 1.

Las siguientes iteraciones del modelo se realizaron para verificar que el aporte río-napa no excediese el 10% del caudal de estiaje de un año 85%. Sólo en la cuenca del río Petorca se debió reducir el bombeo para cumplir con esa condición. En la Tabla 13-7C se muestran los caudales resultantes de imponer las restricciones DGA. Los vaciamientos promedios al año 50 resultantes son los de la Tabla 4-7D.

Tabla 4-7C
Caudales de Bombeo Resultantes al Verificar la restricción de aportes río-napa

Cuenca	Caudal actual Q_0 [l/s]	Caudal admisible sin celdas secas Q_1 [l/s]	Caudal admisible sin exceder aporte del río Q_2 [l/s]	Reducción c/r a Q_1 [%]	Reducción c/r a Q_2 [%]
Petorca	602	557	463	23.1	16.9
Ligua	992	884	884	10.9	0.0
Total	1595	1442	1347	15.5	6.6

Tabla 4-7D
Vaciamiento de Agua Almacenada

Cuenca	Vaciamiento en 50 años [%]
Ligua	4.2
Petorca	4.6
Global	4.4

Con lo que se cumple la restricción de reducción del volumen almacenado, menos de un 5 % en 50 años.

- **Escenario 8: Sustentabilidad DGA 30%**

La condición de que no se produzcan descensos excesivos (celdas secas), es más restrictiva que la condición de vaciamiento máximo de un 30 % en 50 años.

Los resultados de la Tabla 4-8 para este escenario, corresponden a valores extrapolados del vaciamiento en función del bombeo, puesto que no es posible llegar a un vaciamiento del 30 %, sin que se produzcan grandes depresiones en algunos sectores, inhabilitando el bombeo.

Se analizaron escenarios donde se impusieron mayores bombeos (escenarios 3 y 6); en ellos, debido a la extracción elevada, las celdas se secan y el bombeo se detiene allí por el secado, recuperándose el área circundante y distorsionando el cálculo. Para el caso de la cuenca del río La Ligua, el descenso máximo calculado está en torno al 20 %, considerando las celdas secas como vaciadas en un 100 %.

Se operó el modelo con los caudales estimados para este escenario en la Tabla 4-8 y se obtuvieron vaciamientos de 19 % y 28 % para las cuencas de Ligua y Petorca, respectivamente.

No se llegó al 30 % en el caso de la cuenca de Ligua, por lo indicado anteriormente. El secado de celdas detiene el bombeo en los pozos coincidentes con las celdas secas; para el año 50 la extracción en Ligua es de 1468 l/s, en vez de los 3231 l/s impuestos, asociados al vaciamiento del 30 %.

Tabla 4-8
Porcentajes de Vaciamiento del Volumen Almacenado al año 50,
respecto al Estado Actual y Caudales de Bombeo Admisibles

Esc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cuenca	Vaciamiento [%]									
Ligua	4.2	9.6	7.6	5.6	7.4	7.1	4.2	30	4.0	3.4
Petorca	6.3	8.6	7.3	14.8	18.1	9.5	4.6	30	6.0	4.5
Global	5.2	9.1	7.5	9.8	12.3	8.3	4.4	30	5.0	3.9
Cuenca	Caudales admisibles (sin celdas secas) [l/s]									
Ligua	884	1623	1686	798	942	1134	884	3231[*]	884	927
Petorca	557	635	558	732	852	723	463	1210[*]	557	564
Total	1442	2258	2243	1530	1794	1856	1347	4441	1441	1491

[*]: Valores extrapolados

Tal como en los escenarios anteriores, la descarga al mar se reduce en gran medida, induciendo flujos intrusivos.

- Escenario 9: Recargas Inducidas

Los resultados obtenidos para este escenario se presentan en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9
Caudales de Bombeo Admisibles

Cuenca	Caudal Inicial [l/s]	Caudal admisible [l/s]	Reducción [l/s]	Reducción [%]
Petorca	602	557	45	7.4
Ligua	992	884	108	10.9
Total	1594	1442	152	9.5

GCF Ingenieros Limitada

Se aprecia que las recargas impuestas no influyen en el caudal admisible de bombeo, que resulta igual al del escenario 1. No obstante, las recargas inducidas generan efectos sobre las restantes componentes del flujo. Por otra parte, las zonas con descensos excesivos se ven reducidas.

Los caudales de descarga hacia el mar disminuyen con relación a los valores históricos, no obstante, los flujos permanecen en el sentido oriente-poniente sin que se induzcan intrusiones.

Los aportes río-napa se mantienen en torno a los valores que se obtienen en los últimos años del período histórico.

- **Escenario 10: Recargas por Embalses**

La Tabla 4-10 muestra los caudales de bombeo admisibles de este escenario.

Tabla 4-10
Caudales de Bombeo Admisibles

Cuenca	Caudal Inicial [l/s]	Caudal admisible [l/s]	Reducción %
Petorca	602	564	6.3
Ligua	992	937	5.5
Total	1595	1502	5.8

La reducción del bombeo inicial es de un 6 % (en el escenario 1 era es del 10 %). En este escenario, además, el secado de celdas es menor que en el escenario 1.

El aporte de los ríos a las napas revela el efecto de mayor disponibilidad hídrica que generan los embalses. Los flujos río-napa del escenario sin embalses son mayores al caso con embalses. Esto ocurre debido al aumento de la recarga, que produce niveles de napa superiores con respecto al escenario sin embalses.

Los embalses aumentan la seguridad de riego, lo que se aprecia en la recarga por excedentes de riego y en la recarga total (lluvia+riego). Ésta aumenta y se reduce su amplitud, por causa de la regulación de los embalses.

Los afloramientos fueron disminuyendo en el tiempo junto con el incremento de la explotación de los valles. Para este escenario ellos aumentan con relación al caso sin embalses, debido al aumento de las recargas y la mayor saturación de las napas.

La tendencia de disminución promedio leve del volumen almacenado es atenuada con la operación de los embalses.

Los caudales de descarga al mar se mantienen estables, un poco menores a los históricos, pero sin que produzcan flujos de intrusión marina.

5 CONCLUSIONES GENERALES

Del desarrollo de este trabajo y, particularmente, según los resultados de la modelación del período histórico, algunas de las principales conclusiones globales del funcionamiento del sistema, para ese período son:

a) Las extracciones de aguas subterráneas han ido aumentando sostenidamente a través del tiempo.

b) La recarga superficial por riego se ha mantenido relativamente estable. En el pasado se usaban métodos más ineficientes de riego que generaban una infiltración importante. En el transcurso del tiempo, fueron mejorando esos sistemas, por lo que las pérdidas se redujeron. Lo anterior fue compensado con el aumento de la cobertura del riego. Es decir, disminuyeron las recargas unitarias por riego, pero aumentó el área de recarga total.

c) El incremento de la extracción ha generado descensos progresivos en los afloramientos y el flujo de salida al mar. Por otro lado, el vaciamiento de los acuíferos ha inducido un creciente aporte río-napa.

d) Según los resultados de la modelación superficial, en promedio llegan $6.1 \text{ m}^3/\text{s}$ al mar (Ligua: efluente Nodo 14= $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y Petorca: efluente Nodo 13= $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$). Esos recursos no son aprovechados debido a la temporalidad de su ocurrencia. Esta disponibilidad en el tiempo hay ido decreciendo, según la tasa de aumento del aporte río-napa antes mencionado.

e) Los niveles en los pozos de observación no revelan tendencias definitivas al descenso. Muestran variaciones estacionales marcadas. Probablemente, existen zonas críticas con gran explotación que actualmente no son monitoreadas.

f) Los déficit de recursos subterráneos obedecen a la distribución temporal de las recargas y las extracciones. Ciertamente los acuíferos se recuperan, pero la recarga en algunos lugares no alcanza a cubrir la demanda creciente en períodos de estiaje.

g) En términos de un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos, se confirma que el efecto de los embalses genera los mayores beneficios en términos de disponibilidad global de recursos hídricos (superficial y subterránea).

h) Con respecto a la posibilidad de recargar las napas artificialmente, preliminarmente se puede decir sólo que al menos esto es factible en términos de disponibilidad de recursos superficiales, los que actualmente están llegando al mar.