



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

INFORME TÉCNICO

**ANÁLISIS DE LA RECARGA EN EL ACUÍFERO DE
TENÓ-LONTUÉ**

REALIZADO POR:

División de Estudios y Planificación

SDT N° 360

Santiago, Septiembre de 2014

Equipo de Trabajo

Miguel Ángel Caro H.

Franco Calderón M.

Pablo Schnake

Guillermo Tapia M.

Adrián Lillo Z.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ENFOQUE METODOLÓGICO, ÁREA DE ESTUDIO Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	2
3	DESCRIPCIÓN DE LAS REFERENCIAS CONSIDERADAS	4
3.1	ESTUDIO INTEGRAL DE RIEGO DE LA CUENCA DEL RÍO MATAQUITO, CNR/CICA- 1978.	4
3.2	DIAGNÓSTICO DE CAUDALES DISPONIBLES EN CUENCAS NO CONTROLADAS DE RECUPERACIÓN, CUENCAS DE MAULE, MATAQUITO Y RAPEL, CNR/GCF-2008.	4
3.3	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MATAQUITO, DGA/AQUATERRA-2012.	4
4	SITUACIÓN DE LOS DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL RÍO MATAQUITO.	5
5	CONDICIONES DE EXPLOTACIÓN Y NIVEL FREÁTICO	9
6	ESTIMACIONES DE RECARGA AL ACUÍFERO TENO-LONTUÉ	13
6.1	ANÁLISIS DE LAS ESTIMACIONES DE RECARGA	13
6.1.1	<i>Estudio CNR/CICA-1978</i>	13
6.1.2	<i>Estudio DGA/AQUATERRA-2012</i>	26
6.1.3	<i>Estudio Diagnóstico de Caudales Disponibles en Cuencas no Controladas de Recuperación, Cuencas de Maule, Mataquito y Rapel CNR/GCF-2008</i>	32
7	ANÁLISIS DE LA RECARGA	35
8	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE EXPLOTACIÓN SUSTENTABLE	37
8.1	RESULTADOS	40
9	CONCLUSIONES	42

1 INTRODUCCIÓN

El presente reporte técnico presenta los resultados del análisis de la recarga renovable y el volumen de explotación sustentable del acuífero Teno-Lontué, en la Región del Maule, a partir de la información disponible en tres estudios realizados en la cuenca del río Mataquito.

Se analizaron críticamente los valores de recarga estimados en cada estudio y se determinó un valor adecuado para el acuífero denominado Teno-Lontué.

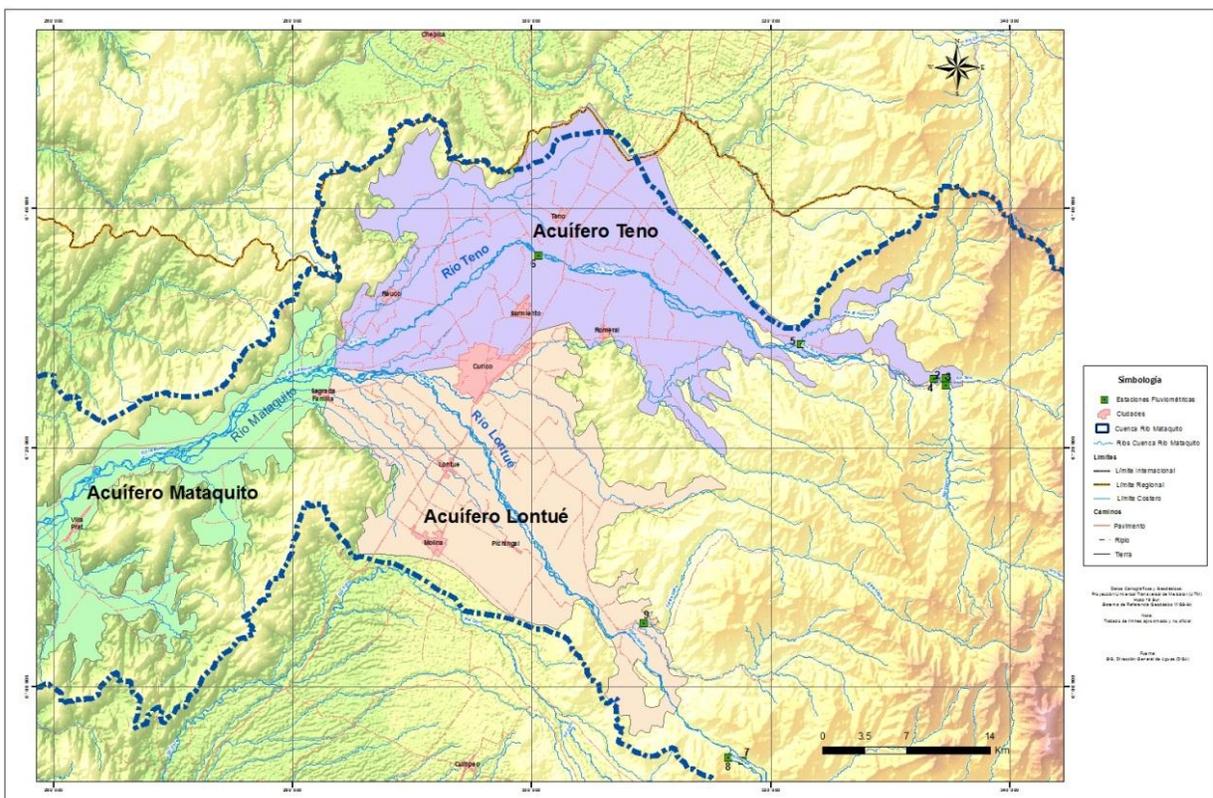
Se determinó el caudal equivalente al volumen de explotación sustentable del acuífero Teno-Lontué utilizando las diferencias entre escenarios modelados a través de la operación modelo MAGIC en la cuenca del río Mataquito, desarrollado en el estudio "Diagnóstico de Caudales Disponibles en Cuencas no Controladas de Recuperación, Cuencas de Maule, Mataquito y Rapel", (CNR/GCF-2008) y los caudales de explotación previsibles de la demanda actual.

Se transcribió buena parte del análisis realizado en el "Estudio Integral de Riego de la Cuenca del Río Mataquito", CNR/CICA-1978, en cuanto al análisis del balance hidrogeológico, pues se consideró que el robusto análisis aporta al entendimiento del sistema Teno-Lontué.

Cabe notar que el presente estudio, constituye una propuesta metodológica para la determinación del volumen sustentable conforme a los criterios de interferencia establecidos por el Decreto Supremo N° 203 del 20 de mayo de 2013 que aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas.

2 ENFOQUE METODOLÓGICO, ÁREA DE ESTUDIO Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

El enfoque metodológico utilizado para la determinación de la recarga renovable y del volumen de explotación sustentable del acuífero, considera como área de análisis el acuífero constituido por el relleno sedimentario asociado a las cuencas de los ríos Teno y Lontué, comprendiendo principalmente el Valle Central, desde el inicio de los respectivos rellenos sedimentarios en la precordillera, hasta la conjunción de ambos ríos que da inicio al río Mataquito, cercano a la localidad de Sagrada Familia. Este sistema acuífero será denominado Teno-Lontué. Cabe señalar que esta zona está incluida en su totalidad dentro de la Cuenca del Río Mataquito (Figura 1).



Este enfoque considera:

- La determinación de la recarga renovable se realizará a partir del análisis de la información contenida en tres estudios que abordan la determinación de los recursos hídricos de la cuenca.

- La determinación del volumen de explotación sustentable a partir del caudal asociado a la explotación sustentable del acuífero y la interferencia río-acuífero.

El análisis fue realizado considerando los siguientes tres estudios:

REF 1. "Estudio Integral de Riego de la Cuenca del Río Mataquito", CNR/CICA-1978.

REF 2. "Diagnóstico de Caudales Disponibles en Cuencas no Controladas de Recuperación, Cuencas de Maule, Mataquito y Rapel", CNR/GCF-2008.

REF 3. "Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Río Mataquito". DGA/AQUATERRA-2012.

En los tres estudios considerados, se estimó una recarga al acuífero a partir de la utilización de modelos.

Considerando las hipótesis utilizadas en cada modelo, la información disponible al momento de su realización y la disponible en la actualidad, es posible discriminar un valor adecuado para la recarga al acuífero, lo cual corresponde a uno de los objetivos del presente informe.

Los tres estudios coinciden en la definición de los distintos sectores acuíferos; acuífero del Río Teno, acuífero del Río Lontué y acuífero del Río Mataquito. Para el presente análisis sólo se consideró los acuíferos del río Teno y del Río Lontué, los que se unieron para formar un solo acuífero denominado Teno-Lontué, tal como se (Figura 1).

Una vez definida la recarga se estimará el volumen sustentable. Para esto es necesario establecer el grado de interferencia que se produce entre los recursos hídricos superficiales y los subterráneos cuando estos últimos se ejercen. En esta fase, será de gran utilidad el uso del modelo MAGIC desarrollado en el estudio CNR/GCF-2008 para simular los escenarios adecuados.

3 DESCRIPCIÓN DE LAS REFERENCIAS CONSIDERADAS

3.1 ESTUDIO INTEGRAL DE RIEGO DE LA CUENCA DEL RÍO MATAQUITO, CNR/CICA-1978.

Este estudio fue encargado por la Comisión Nacional de Riego (CNR) a la Comunidad de Ingenieros Consultores Asociados (CICA) en alianza con Binnie and Partners (B&P) y Hunting Technical Services Ltd. (HTS) el que fue concluido en marzo de 1978.

El informe consta de nueve volúmenes y una carpeta de mapas, en el que se desarrollan los tópicos necesarios para cuantificar los recursos naturales disponibles; formular un plan de desarrollo agropecuario y de riego; estudiar las demandas de agua actuales y futuras; determinar los déficits y excedentes hídricos; proponer las obras necesarias para el aprovechamiento del recurso y efectuar una evaluación económica preliminar de dichas obras y de las alternativas de desarrollo agropecuario propuestas.

3.2 DIAGNÓSTICO DE CAUDALES DISPONIBLES EN CUENCAS NO CONTROLADAS DE RECUPERACIÓN, CUENCAS DE MAULE, MATAQUITO Y RAPEL, CNR/GCF-2008.

Este estudio fue encargado por la División de Estudios y Desarrollo de la Comisión Nacional de Riego a GCF Ingenieros Ltda., el que fue concluido en agosto de 2008.

El estudio consta de 2 volúmenes en el que se desarrolla una actualización de la Interfaz SIG-MAGIC, la que permite el llenado amigable de la base de datos del programa de asignación de aguas denominado MAGIC. Además se implementan tres sendos modelos en MAGIC en las cuencas de los Ríos Rapel, Mataquito y Maule, con la finalidad de cuantificar el monto de derrames y recuperaciones captados y reutilizados en riego.

3.3 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MATAQUITO, DGA/AQUATERRA-2012.

Este estudio fue encargado por la Dirección General de Aguas a través de su División de Estudios y Planificación a Aquaterra Ingenieros Ltda., el que fue concluido en diciembre de 2012.

El estudio consta de 4 volúmenes en los cuales se desarrolla un levantamiento de información hidrogeológica para la creación de un modelo conceptual y un modelo numérico que capture y represente adecuadamente el funcionamiento del sistema hídrico de la cuenca del río Mataquito. El modelo numérico de aguas subterráneas fue desarrollado bajo la plataforma Modflow.

4 SITUACIÓN DE LOS DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL RÍO MATAQUITO.

Considerando que el acuífero Teno-Lontué objeto del presente análisis se asocia a la cuenca del río Mataquito, a continuación se presenta un análisis de la situación de derechos de agua en esta cuenca.

Administrativamente, la cuenca del río Mataquito no está sujeta a ninguna restricción, es decir, para el caso de las aguas subterráneas los acuíferos contenidos en la cuenca no han sido declarados como áreas de restricción o prohibición para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento, y en cuanto a los recursos superficiales el río Mataquito no posee declaraciones de agotamiento del recurso.

En la actualidad (mayo de 2014) se han otorgado alrededor de 16.670 l/s en derechos de agua subterránea en la cuenca del río Mataquito (Figura 2.). Considerando solamente los derechos otorgados en el acuífero Teno-Lontué, el nivel de otorgamiento histórico alcanza un valor cercano a 15.000 l/s en derechos de agua subterránea (Figura 3), los que mayoritariamente corresponden a la demanda de actividades agrícolas (83%) seguido de Agua Potable (12%) y de la Industria (5%) (Figura 4).

En efecto, gran parte de las solicitudes de derechos de aprovechamiento se ingresaron después del año 1997 coincidiendo con la expansión de la apertura económica de nuestro país y el aumento en las exportaciones frutícolas.

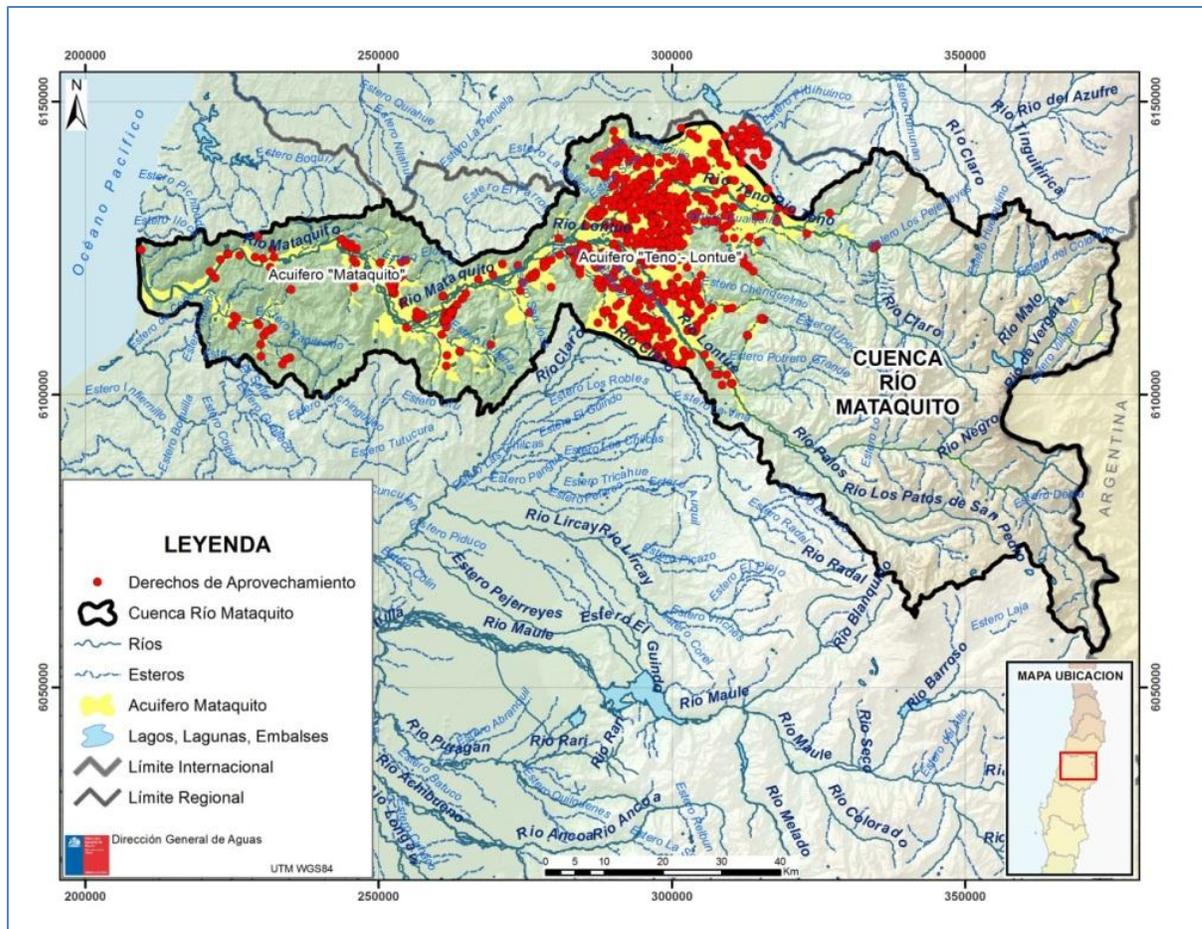


Figura 2. Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados en el sector de la cuenca del río Mataquito (mayo de 2014).

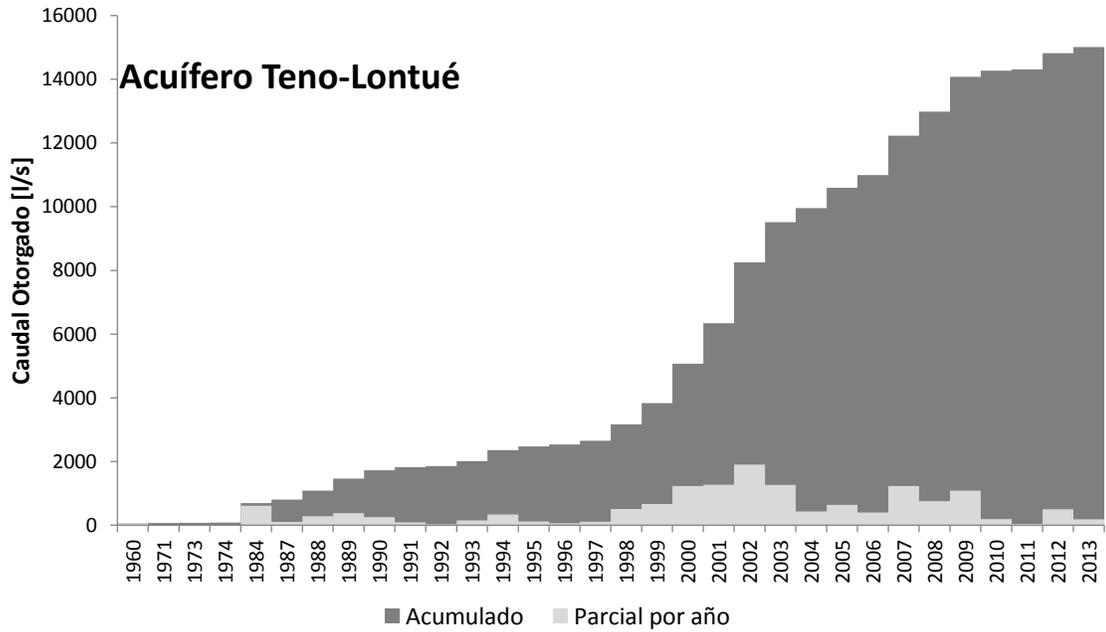


Figura 3. Evolución del otorgamiento de derechos de aprovechamiento subterráneos en la zona del acuífero Teno-Lontué, (mayo de 2014)

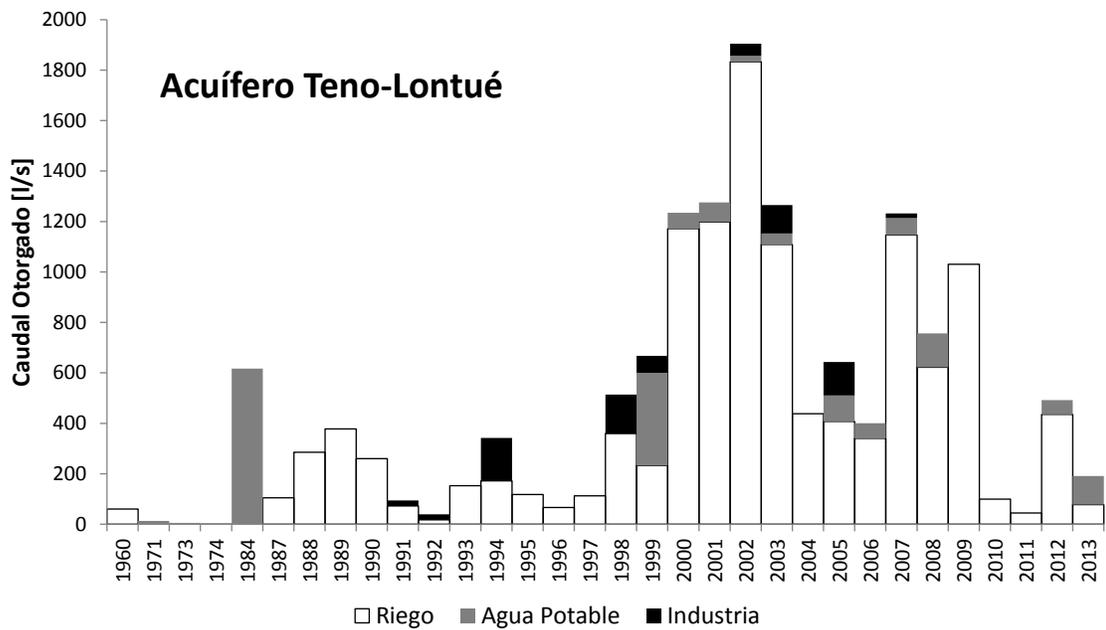


Figura 4. Otorgamiento histórico de derechos de agua subterránea en el acuífero de Teno-Lontué, por tipo de uso (mayo de 2014).

Por su parte, existen solicitudes de derechos pendientes en la zona del acuífero Teno-Lontué que alcanzan alrededor de 5.538 l/s en alrededor de 204 captaciones que se estima con uso mayoritario agrícola.

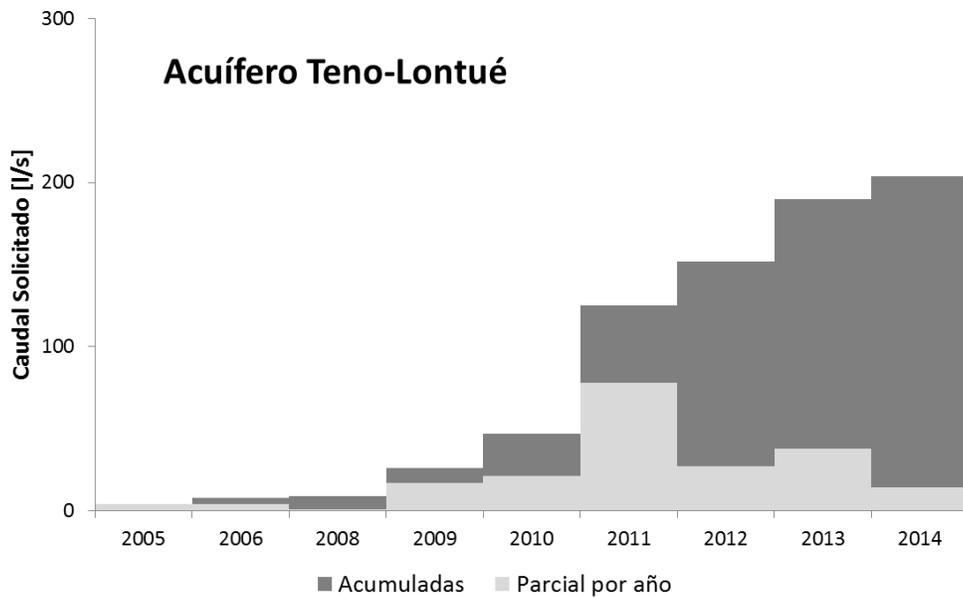


Figura 5. Solicitudes pendientes de derechos de agua subterránea en el acuífero de Teno-Lontué, por fecha de solicitud, a mayo de 2014

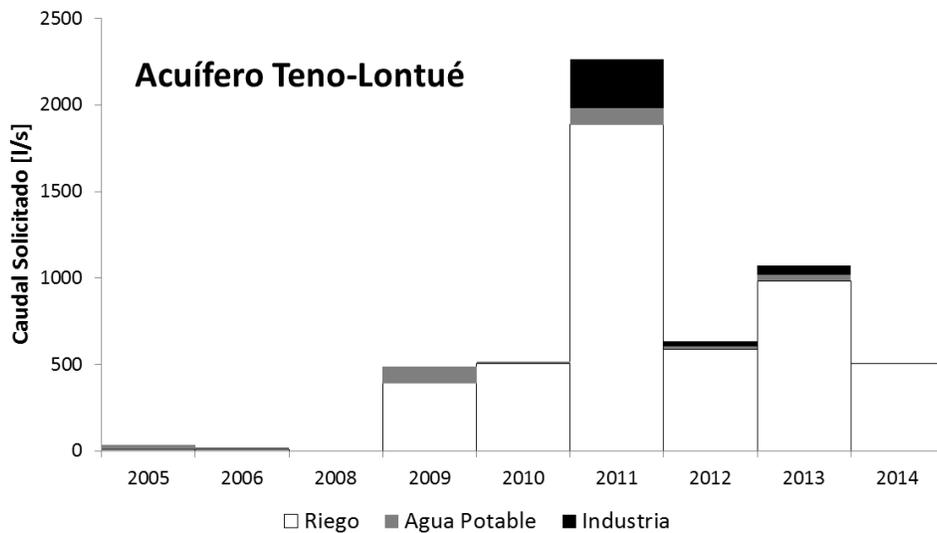


Figura 6. Solicitudes pendientes de derechos de agua subterránea en el acuífero de Teno-Lontué, por uso, a mayo de 2014

5 CONDICIONES DE EXPLOTACIÓN Y NIVEL FREÁTICO

De acuerdo con la información de la red hidrométrica DGA, en la cuenca del Río Teno existen 7 pozos de monitoreo y 6 pozos en la cuenca del Río Lontué (Figura 7), sin embargo, sólo fue posible obtener datos de niveles de siete pozos de monitoreo, seis de los cuales solo tienen datos supeditados al periodo 1969-1972 y el pozo AP-Teno además tiene un periodo de datos entre 1986-1989 (Figura 8), a partir de estos datos no es posible inferir tendencias, sólo es posible afirmar que no hay variaciones importantes en el pasado, salvo en el pozo Fundo Santa Ana con leve tendencia al alza de niveles en el periodo 1969 a 1972, periodo en el cual el acuífero Teno-Lontué tenía muy poca explotación (alrededor de 400 l/s, según CNR/CICA-1978).

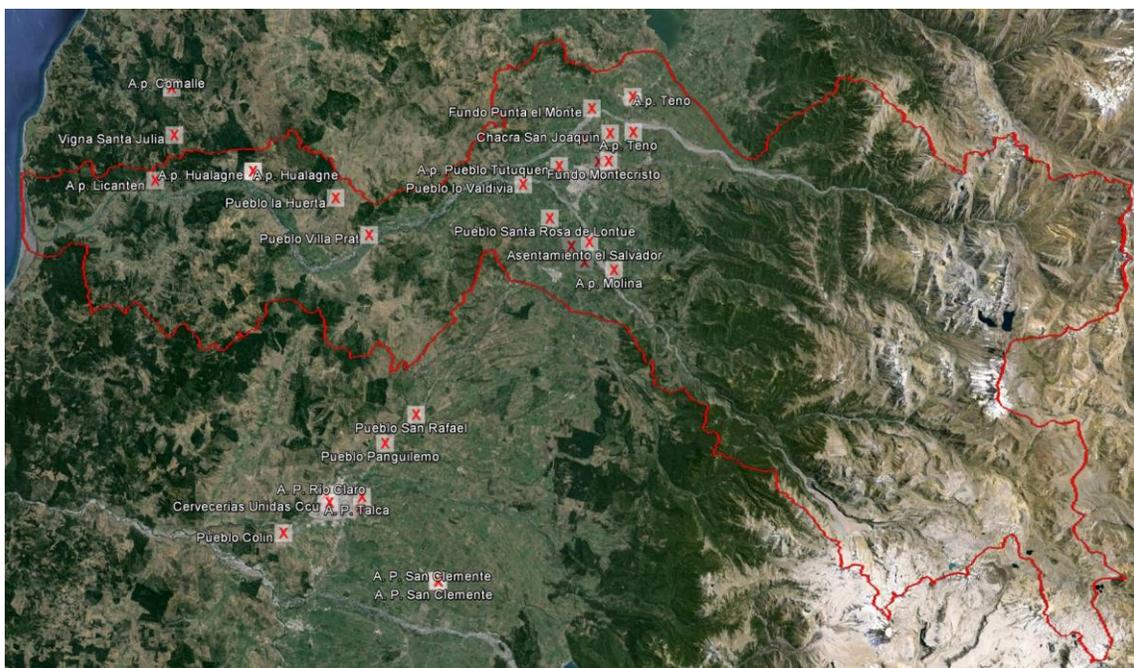


Figura 7 Red de monitoreo de aguas subterráneas de la cuenca del río Mataquito

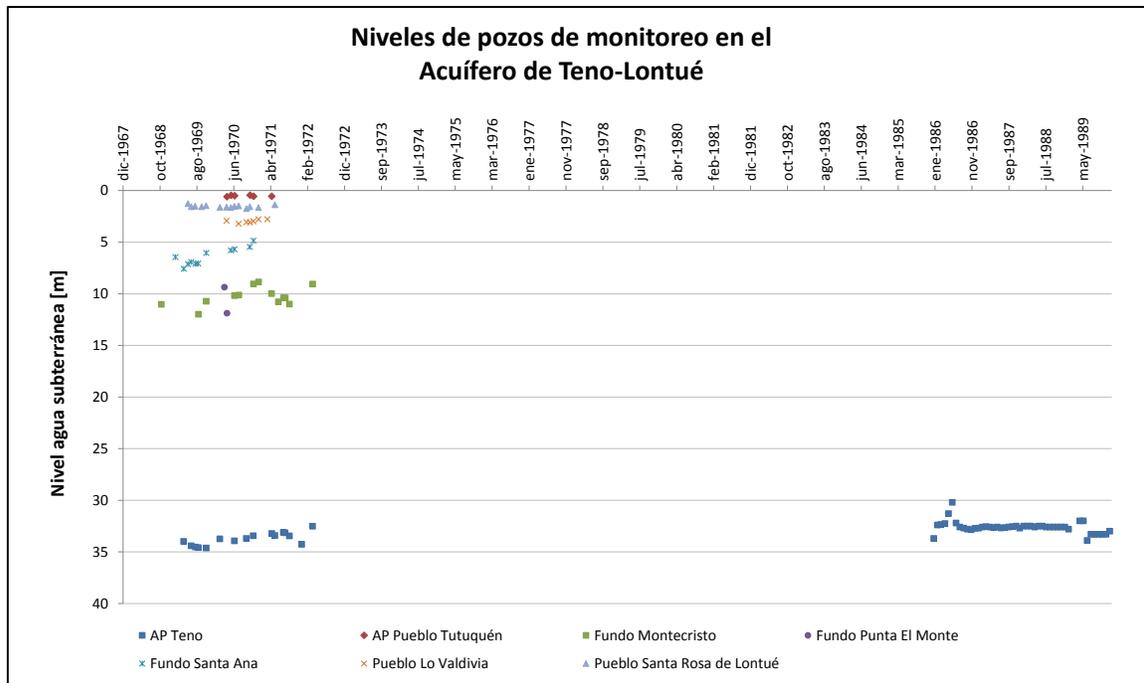


Figura 8. Niveles de pozos en acuífero Teno-Lontué

El estudio CNR/CICA-1978 presentó un mapa de isopropundidad del nivel freático a partir de la situación de los niveles estáticos en abril de 1971 (Figura 9).

Comparando el mapa anterior por el realizado por DGA/AQUATERRA-2012 (Figura 10) lo único que se puede deducir es que la profundidad del nivel freático en las cabeceras del acuífero ha aumentado debido al mayor grado de explotación, sobretodo en el acuífero de Teno donde se han producido profundos descensos focalizados debido a la concentración de la explotación.

Por otro lado, los niveles freáticos cercanos a la confluencia de los ríos Teno y Lontué se mantienen cercanos a la superficie de terreno (zona de descarga del acuífero).

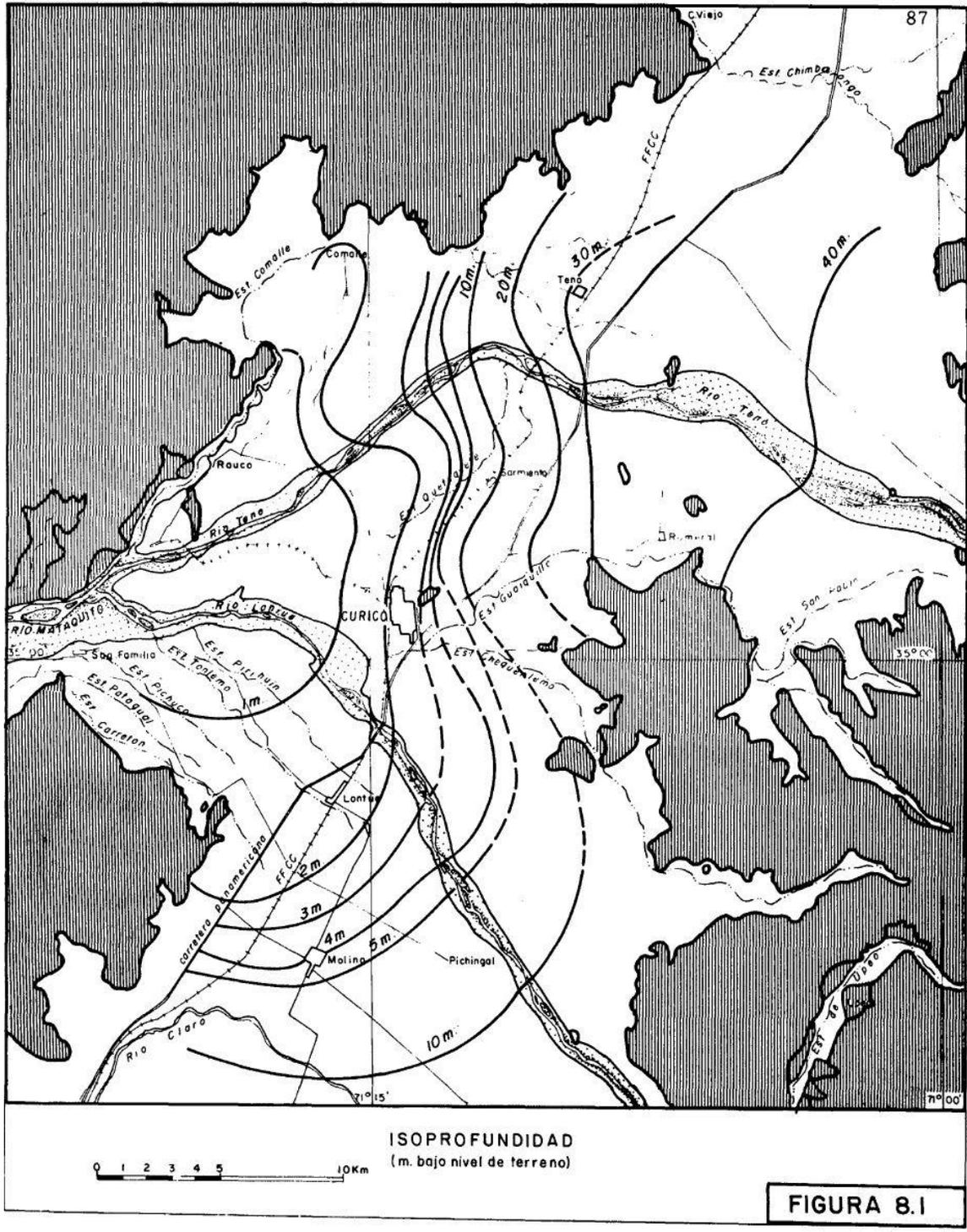


Figura 9 Mapa de Isopropfundidad acuífero Teno-Lontué (1971)

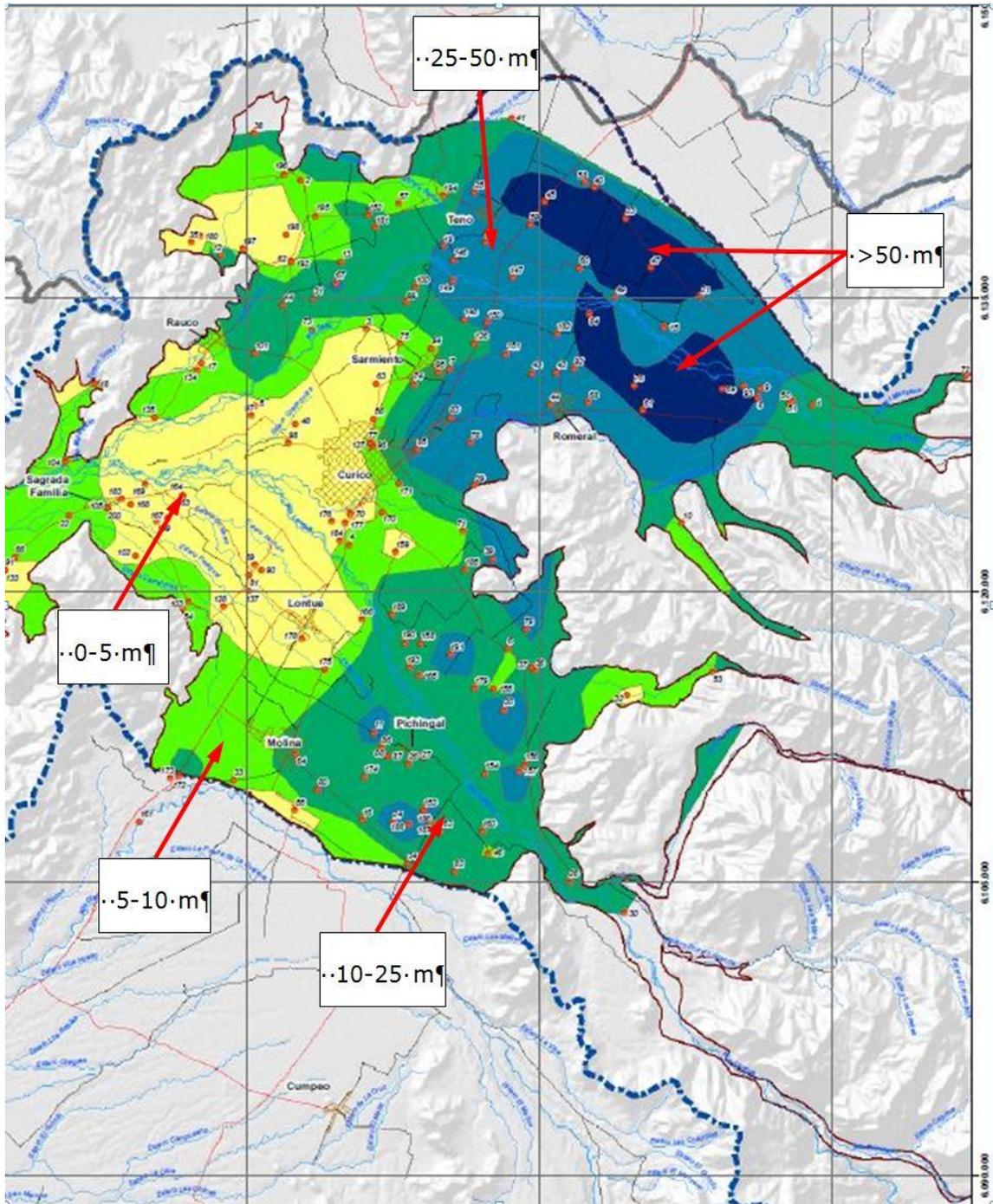


Figura 10 Mapa de isoprofundidades acuífero Teno-Lontué (2012)

6 ESTIMACIONES DE RECARGA AL ACUÍFERO TENO-LONTUÉ

El estudio CNR/CICA-1978 estima una recarga renovable en zonas de infiltración de 16,6 m³/s y en zona de afloramiento del acuífero Teno-Lontué de 2,7 m³/s. Esta última recarga es denominada potencial pues sólo se hace efectiva en la medida en que baje el nivel freático del acuífero en las zonas de afloramiento. Los valores finales de recarga debida al riego se determinaron utilizando un modelo agronómico que realiza un balance en los primeros horizontes de suelo.

Por otro lado, el estudio CNR/GCF-2008 estima una recarga al acuífero Teno-Lontué de 43,3 m³/s. Esta recarga fue estimada utilizando el modelo de asignación de aguas MAGIC. El valor de la recarga corresponde al promedio de todos los aportes al acuífero, es decir, tramos de río, canales, precipitación y zonas de riego.

Finalmente el estudio DGA/AQUATERRA-2012 determina una recarga al acuífero Teno-Lontué equivalente a 14,6 m³/s obtenidos de la calibración del modelo numérico MODFLOW para flujos de agua subterránea en medios saturados.

Los tres valores de recarga están respaldados por la conceptualización intrínseca de cada modelo utilizado, sin embargo, se realizará un análisis más detallado de estas estimaciones dadas las diferencias entre éstos.

6.1 ANÁLISIS DE LAS ESTIMACIONES DE RECARGA

6.1.1 ESTUDIO CNR/CICA-1978

De acuerdo con este estudio, existen tres factores que intervienen en la alimentación del sistema subterráneo de la cuenca del río Mataquito: conexión río-acuífero, infiltración de las precipitaciones y agua de regadío.

6.1.1.1 INFILTRACIÓN PRODUCTO DEL REGADÍO

La unidad básica de análisis utilizada en el estudio, corresponde a la zona de riego, considerando para ello la interrelación entre derrames y área regada la cual influye en la percolación total a nivel de cada unidad. El movimiento del agua de riego en el subsuelo y como ésta alimenta las raíces de la cobertura agrícola fue

conceptualizada a través de un modelo de infiltración que realiza un balance hídrico a nivel de suelo. El esquema de funcionamiento de este modelo se presenta la Figura 11.

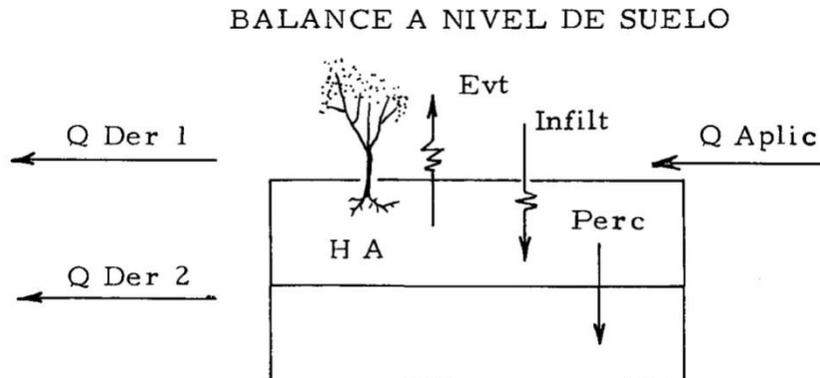


Figura 11 Modelo de Balance para cada zona de Riego

El modelo recibe el agua aplicada, la que corresponde a la suma de los derechos de cada zona y a los derrames que ingresan a ella, luego procede a separar, según las características de infiltración de cada suelo, la fracción que corresponde a derrames superficiales de aquella correspondiente a infiltración. Deducida la infiltración, dicho volumen, se analiza en función de las necesidades de humedad que posee el suelo, la capacidad de campo y las características propias del sustrato del suelo agrícola, para deducir como remanente, la percolación hacia el sistema subterráneo.

En el análisis de los procesos de infiltración se seleccionaron doce series de suelo, estimadas como las más representativas de la zona de estudio. A estas series se les asociaron tres ecuaciones de infiltración acumulada. De estas últimas ecuaciones, es posible derivar el tiempo de retención que debe tener el agua que está en contacto con el suelo en cada periodo de riego, lo cual a su vez conduce a la determinación del volumen de agua que se requiere infiltrar en cada aplicación del riego.

El volumen infiltrado se consumirá en reponer inicialmente el déficit de humedad del suelo y el exceso, dependiendo de las características del sustrato de suelo, se distribuirá entre derrame sub-superficial y percolación. Esta última separación se realiza a través de una relación entre permeabilidades y gradientes y el flujo vertical y horizontal.

La humedad aprovechable para el crecimiento vegetativo de los primeros horizontes de suelo, queda retenida durante algún tiempo, definiendo con esto el periodo que

media entre cada riego. En el Chile de la época en el que se desarrolló el estudio, la práctica de riego generalizada fijó la oportunidad de riego para el momento en que se ha consumido el 75% de la humedad aprovechable. Ello supone que para un riego sin pérdidas por derrame (100% de eficiencia) el tiempo de riego debería ser aquel que permita la infiltración de ese 75% consumido. Se sabe, sin embargo que dicha situación no corresponde a la práctica habitual en nuestro país, en la época en que se desarrolló el estudio. Es por ello que se consideró la utilización de un tiempo real equivalente a dos veces el tiempo óptimo de riego. Este hecho fija un determinado volumen de agua que se utilizará en los procesos de infiltración.

En caso de no existir un sustrato que limite la percolación, la diferencia entre humedad repuesta y volumen infiltrado corresponderá íntegramente a la percolación.

La percolación, por tanto, sólo depende de las características edafológicas de una determinada asociación de suelos y del tiempo de riego que se adopte.

Analizada las bases que han sustentado la determinación de la recarga por regadío, la Tabla 1 presenta un resumen de la recarga por riego para los acuíferos de Teno y Lontué.

CUENCA	AÑO 50%		AÑO 85%	
	Millones de [m ³]	[m ³ /s]	Millones de [m ³]	[m ³ /s]
TENO	117.80	3.74	104.30	3.31
LONTUE	128.60	4.08	118.50	3.76
TOTAL	246.40	7.81	222.80	7.06

Tabla 1 Recarga efectiva por riego

Los valores señalados en la Tabla 1 corresponden a la recarga efectiva que se produce principalmente en la zona fuera del área de afloramientos, no considera la recarga potencial producto del riego de las zonas definidas como sectores de recuperación. Se ha separado ambas recargas, dado que la recarga susceptible de producirse en las zonas de recuperación se incorporará a un acuífero que se encuentra con su nivel de saturación muy cercano a la superficie lo cual significará una rápida aparición de dicho volumen aguas abajo.

La Tabla 2 muestra los valores de recarga obtenidos por el modelo para las zonas de recuperación.

CUENCA	AÑO 50%		AÑO 85%	
	Millones de [m ³]	[m ³ /s]	Millones de [m ³]	[m ³ /s]
TENO	19.60	0.62	19.60	0.62
LONTUE	29.00	0.92	29.00	0.92
TOTAL	48.60	1.54	48.60	1.54

Tabla 2 Recarga potencial en zonas de recuperación

La recarga total debida al riego se presenta en la Tabla 3

CUENCA	AÑO 50%		AÑO 85%	
	Millones de [m ³]	[m ³ /s]	Millones de [m ³]	[m ³ /s]
TENO	137.40	4.36	123.90	3.93
LONTUE	157.60	5.00	147.50	4.68
TOTAL	295.00	9.35	271.40	8.61

Tabla 3 Recarga total debida al riego

6.1.1.2 INFILTRACIÓN DEBIDO A LAS PRECIPITACIONES

En forma similar al caso del riego, la recarga por precipitaciones ha sido analizada a través de un balance de suelo, considerando el agua aplicada a la lámina producto de las precipitaciones. Como área receptora se ha considerado el área originada por el contacto roca relleno, coincidiendo prácticamente con el área susceptible de regar.

El balance se realiza para cada lluvia, por cada mes, para cada suelo y por cada zona de riego.

Inicialmente se compara la intensidad media de cada lluvia con la velocidad de infiltración, contraste que permite separar la escorrentía superficial de aquella parte del agua caída que ingresa al suelo.

La integración de las diversas lluvias en el mes permite conocer, al cabo de dicho periodo, el volumen infiltrado.

El volumen infiltrado es tratado en forma similar al caso de regadío, partiendo de una situación de humedad inicial del suelo la cual, agregada a la lámina de agua que se ha infiltrado y descontada la evapotranspiración, determinará la lámina neta disponible para percolar. Si dicha lámina resulta inferior a la capacidad de campo no habrá disponibilidad para percolar. En cambio, si dicha capacidad de campo es superada, el exceso podrá distribuirse entre escurrimiento sub-superficial y percolación en caso que las condiciones del sustrato así lo obliguen. Al igual que en el caso de riego, la separación entre ambos flujos se realiza mediante una razón de permeabilidades y gradientes. Ante la ausencia de estratos limitantes el exceso por sobre la capacidad de campo percolará íntegramente.

La recarga anual por precipitaciones fuera de las zonas de recuperaciones se muestra en la Tabla 4:

CUENCA	AÑO 50%		AÑO 85%	
	Millones de [m ³]	[m ³ /s]	Millones de [m ³]	[m ³ /s]
TENO	78.90	2.50	53.00	1.68
LONTUE	120.30	3.81	84.30	2.67
TOTAL	199.20	6.32	137.30	4.35

Tabla 4 Recarga anual por precipitaciones

En forma similar al caso de regadío se ha separado la recarga que ocurre sobre las zonas de recuperación, considerando que para efectos prácticos ella constituiría recarga real sólo cuando el nivel estático general de las zonas descendiera más allá de 2 metros. Bajo la situación de compromisos de los recursos hídricos, la recarga sólo puede considerarse potencial y por ello se ha separado en la tabla siguiente:

CUENCA	AÑO 50%		AÑO 85%	
	Millones de [m ³]	[m ³ /s]	Millones de [m ³]	[m ³ /s]
TENO	13.92	0.44	9.35	0.30
LONTUE	17.73	0.56	11.98	0.38
TOTAL	31.65	1.00	21.33	0.68

Tabla 5 Recarga anual potencial por precipitaciones sobre zonas de recuperación

La recarga total por concepto de lluvia se muestra en la Tabla 6.

CUENCA	AÑO 50%		AÑO 85%	
	Millones de [m ³]	[m ³ /s]	Millones de [m ³]	[m ³ /s]
TENO	92.82	2.94	62.35	1.98
LONTUE	138.03	4.38	96.28	3.05
TOTAL	230.85	7.32	158.63	5.03

Tabla 6 Recarga anual total debida a las precipitaciones

6.1.1.3 CONEXIÓN RÍO-ACUÍFERO

La interrelación río-acuífero constituye el último de los factores de recarga con incidencia en la alimentación del sistema. Como desde el punto de vista de la alimentación del sistema, sólo poseen incidencias las pérdidas en el lecho de cada río, las conclusiones hidrológicas se han adaptaron a este esquema.

De esta forma, la interrelación río-acuífero considera lo siguiente:

RÍO TENO

El Teno acusa pérdidas definidas y permanentes, es decir, infiltración hacia el acuífero, en el sector que abarca desde Los Queñes hasta la carretera Panamericana. Ello concuerda con la situación de niveles y sus fluctuaciones. Cuantitativamente, el sector señalado presenta diferentes tasas que se resumen en dos sub-sectores:

- Los Queñes-Cerrillo Verde
- Cerrillo Verde-Panamericana.

Al primero se le ha asignado una tasa de 85 l/s/km que equivale a un caudal de 1.8 m³/s, en tanto que el segundo acusa una tasa muy superior, en torno a los 185 l/s/km y más en un tramo de menor longitud el que conduce un caudal de 2.1 m³/s.

El río presenta una situación dual en el sector entre la carretera Panamericana y puente Rauco. De acuerdo a los antecedentes disponibles las pérdidas se producirían

a partir del mes de enero a una tasa de 31 l/s/km equivalentes a 0.5 m³/s para el tramo, permaneciendo tal situación hasta el inicio de la primavera. Si bien este último sector se encuentra netamente incluido desde el punto de vista hidrogeológico en la zona considerada saturada, la estacionalidad de la infiltración acusa una perfecta coincidencia con la caracterización de la fluctuación de niveles. La situación de saturación señalada explicaría por otra parte, la escasa magnitud de infiltración en este sector.

No existen antecedentes para determinar variaciones estacionales en el régimen de infiltración de Teno. Además como las determinaciones se han efectuado para diferentes caudales de entrada, representativos de los caudales medios mensuales de invierno o de verano, es posible aceptar que las cifras señaladas corresponden a la situación constatada a lo largo de todo el año.

La Tabla 7 presenta el volumen que por concepto de pérdidas se incorporará al sistema subterráneo. Desde luego las mismas limitaciones ya señaladas impiden distinguir situaciones para distintas condiciones hidrológicas, por lo cual se ha asignado un volumen único, es conocida sin embargo la constancia que presenta el régimen de pérdidas y recuperaciones en los ríos, a excepción de años extremadamente críticos. Semejante consideración avalaría la adopción de un volumen único.

Millones de [m ³]	[m ³ /s]
121.3	3.85

Tabla 7 Recarga anual río Teno

Pese a constatarse infiltración en las zonas con un acuífero prácticamente saturado, se ha optado por considerar tal recarga como potencial. Tanto su magnitud como su probable variación en función de la situación del acuífero, justifican tal medida.

Millones de [m ³]	[m ³ /s]
10.4	0.33

Tabla 8 Recarga potencial anual río Teno

RÍO LONTUÉ

Los antecedentes disponibles permiten afirmar la ausencia de pérdidas en el sistema Lontué, a lo menos, en el sector comprendido entre Pichingal y Panamericana.

Ello significaría que bajo el conocimiento actual no existe recarga por conexión río-acuífero en el valle.

6.1.1.4 RECARGA TOTAL DEL SISTEMA

La visión de la magnitud de los recursos subterráneos renovables se obtiene integrando cada una de las componentes de recarga analizadas anteriormente por separado.

Integrar los diversos volúmenes de recarga no es una operación de simple adición dada las distintas condiciones de cada uno de ellos. Basta observar que un año hidrológico de cierta probabilidad no corresponde necesariamente al mismo año de precipitaciones; y, por otra parte los años hidrológicos de cada valle son desde luego también distintos.

Aunque sería deseable lograr una visión para distintas condiciones de ocurrencia, no es posible a menos que se analice una secuencia histórica de la cual se obtengan las conclusiones del caso. Dicho análisis, por tanto, se encuentra ligado a la operación global del sistema Mataquito; se ha optado por reflejar las condiciones medias de ocurrencia.

Procurando por lo tanto concretar la magnitud del volumen renovable tanto de Teno como Lontué, se ha definido la recarga media como aquella que es producto de una situación intermedia entre los años 50% y 85%. Debe entenderse que semejante decisión procura reflejar el comportamiento de la cuenca para condiciones medias, pero no elude sentar las bases y metodología para abordar cualquier condición tal como se ha señalado.

Bajo tales bases la recarga media total anual se refleja en las siguientes tablas:

CUENCA	Regadío [m ³ /s]	Precipitaciones [m ³ /s]	Conexión río-acuífero [m ³ /s]	TOTAL [m ³ /s]
TENO	3.5	2.1	3.8	9.5
LONTUE	3.9	3.2	0.0	7.2
TOTAL	7.4	5.3	3.8	16.6

Tabla 9 Recarga media anual al sistema acuífero en zonas de recarga

CUENCA	Regadío [m ³ /s]	Precipitaciones [m ³ /s]	Conexión río-acuífero [m ³ /s]	TOTAL [m ³ /s]
TENO	0.6	0.4	0.3	1.3
LONTUE	0.9	0.5	0.0	1.4
TOTAL	1.5	0.8	0.3	2.7

Tabla 10 Recarga media potencial anual al sistema acuífero en zonas de recuperación

CUENCA	Regadío [m ³ /s]	Precipitaciones [m ³ /s]	Conexión río-acuífero [m ³ /s]	TOTAL [m ³ /s]
TENO	4.1	2.5	4.2	10.8
LONTUE	4.8	3.7	0.0	8.6
TOTAL	9.0	6.2	4.2	19.3

Tabla 11 Recarga media total anual al sistema acuífero en zonas de recarga y de recuperación

Puede apreciarse que Teno se encuentra respaldado fuertemente por la existencia de infiltración en el lecho del río, situación que no resulta ser igual para Lontué.

6.1.1.5 DESCARGA

La descarga, parte integrante del equilibrio de un sistema, representa la pérdida de recursos subterráneos que éste experimenta. Básicamente se distinguen dos tipos de descargas: natural y artificial. Ambas serán tratadas en forma separada para poder reflejar la pérdida global que presentan Teno y Lontué.

i. DESCARGA NATURAL

Bajo descarga natural se engloban aquellas pérdidas que experimenta un sistema hidrogeológico, producto de tres factores fundamentales: recuperaciones en el lecho del río, consumo de freatófitas y evaporación directa desde zonas de nivel estático superficial.

Tanto en el caso de Teno como Lontué, el segundo factor se considera ausente por no existir áreas de importancia que tengan vegetación freatófica.

a. DESCARGA RÍO-ACUÍFERO

A continuación se presenta la determinación de las descargas del acuífero Teno-Lontué.

RÍO TENO

Este río presenta un régimen de recuperaciones coincidente con las zonas identificadas como sectores de nivel estático en torno a 1 metro de profundidad.

La zona abarca desde la Carretera Panamericana hasta la confluencia con el río Lontué y en ella se distinguen dos situaciones conectadas a la estacionalidad.

Desde el inicio de la zona Carretera Panamericana hasta el puente Rauco el río presenta recuperaciones durante el periodo de primavera (octubre-diciembre) que alcanzan un valor promedio de 1.5 m³/s. Aguas abajo de dicha referencia, el régimen de recuperaciones, existiendo sólo un registro, presenta un aumento el cual indica a lo menos un caudal de 2 m³/s durante el periodo de riego. Considerando sin embargo la situación del nivel estático en el sector, se estima posible la permanencia de dicho caudal a lo largo del año. Por otro lado, manteniendo el criterio de utilizar cifras índices, ante la ausencia de antecedentes, se ha aceptado el caudal señalado como válido, aún cuando pudiera ser superior.

CUENCA	Millones de [m ³]	[m ³ /s]
TENO	73.9	2.34

Tabla 12 Recuperaciones en el Río Teno

Río LONTUÉ

Los antecedentes disponibles del río Lontué considerados como confiables, han obligado a reducir los tramos del río factibles de caracterizarse, sólo al sector comprendido entre Pichingal y el puente sobre la Carretera Panamericana.

Es necesario señalar que el conocimiento actual sólo permite orientar el fenómeno que regula las recuperaciones del sistema; por lo tanto, las cifras que se adopten deben considerarse preliminares.

Bajo tales limitaciones, el río Lontué mostraría recuperaciones, en el sector señalado, de un caudal medio equivalente a 2.25 m³/s (200 l/s/km), cifra que aumentaría levemente hacia el término de la temporada de riego.

Si se extrapola el valor unitario más allá del puente carretero y hasta la confluencia, situación que cualitativamente se encontraría en coincidencia con la superficie piezométrica, se obtendría un caudal medio tentativo de 4.9 m³/s para el tramo total. Cabe señalar que esta cifra estaría reflejando en forma preliminar recuperaciones netas del lecho dado que los retornos de regadío se encuentran regulados por la extensa red de drenaje que conforman los esteros Carretones, Pirihuín, Río Seco, Pichunco y Patagual. Precisamente dicha red es la que induce a identificar las ganancias de caudal observadas en el estero Río Seco como provenientes fundamentalmente de retornos de regadío, sin desconocer el probable aporte imposible de cuantificar hoy día producido por el afloramiento de aguas subterráneas.

En forma similar al caso de Teno, y procurando allanar el camino hacia el balance del sistema, se adoptará la cifra señalada para Lontué sobre la cual existen fundadas razones para atribuirle a descarga del acuífero. Se considerará nulo el aporte subterráneo en el Río Seco. Si bien existe conciencia de ser éste el caso límite, los antecedentes no permiten adoptar decisiones mejor fundadas.

Bajo tales condiciones la descarga anual del sistema queda reflejada en la tabla siguiente:

CUENCA	Millones de [m3]	[m3/s]
LONTUE	152.4	4.83

Tabla 13 Recuperaciones Río Lontué

b. DESCARGA POR EVAPORACIÓN

La descarga por evaporación engloba las pérdidas que se producen en zonas de nivel estático elevado. Sin embargo, tanto en Teno como en Lontué las zonas que abarcan dicho nivel son cultivadas y por ello la pérdida neta se encuentra incluida en los balances a nivel de suelo al considerar la evapotranspiración.

Aunque a nivel de cuenca su importancia no es notoria, la pérdida de recursos que representa la evaporación en la caja del río, se ha cuantificado. Naturalmente esta cuantificación se ha efectuado en las zonas donde el nivel permite dicha descarga. La pérdida se ha evaluado en función de la evapotranspiración alcanzándose los siguientes valores:

Cuenca	Superficie de caja río [km ²]	Evapotranspiración Potencial [mm/año]	Volumen Evapotranspiración [m ³]	Caudal Evapotranspiración [m ³ /s]
TENO	11	1018	11,198,000	0.36
LONTUÉ	52	1018	52,936,000	1.68
	63		64,134,000	2.03

Tabla 14 Descarga por evaporación desde la caja de los ríos

Cuenca	Superficie de caja río [km ²]	Evapotranspiración Potencial [mm/año]	Volumen Evapotranspiración [m ³]	Caudal Evapotranspiración [m ³ /s]
TENO	58	1018	59,044,000	1.87
LONTUÉ	29	1018	29,522,000	0.94
	87		88,566,000	2.81

Tabla 15 Descarga por evaporación desde la caja de los ríos, con datos de Google Earth

ii. DESCARGA ARTIFICIAL

Unida íntimamente a la descarga natural, se encuentra la denominada descarga artificial que es la ocasionada por la explotación de sondajes en la cuenca.

Los niveles que alcanza dicha explotación son reflejo de la intensidad de utilización del agua subterránea en el área.

La información se presenta separada por uso al que se destina el recurso y por zona de riego.

Dado que los antecedentes disponibles salvo los de consumo de agua potable no provienen de un catastro de explotación, la utilización mensual se ha estimado a partir de indicadores obtenidos para otras zonas del país. Se ha recurrido a antecedentes recopilados por CORFO, que señalan como periodos reales de utilización de sondajes, los siguientes:

Actividad	% de horas al año
Regadío	16,4
Industrial	40

Tabla 16 Uso real de agua subterráneo por actividad

A partir de lo anterior, se deducen los siguientes datos:

CUENCA	Riego [m ³]	Agua Potable [m ³]	Industria [m ³]	Volumen Total [m ³]	Caudal Total [m ³ /s]
TENO	5,629,742	3,314,283	1,387,587	10,331,612	0.328
LONTUÉ	387,892	1,003,088	1,072,227	2,463,207	0.078
MATAQUITO	0	766,503	0	766,503	0.024
TOTAL	6,017,634	5,083,874	2,459,814	13,561,322	0.430

Tabla 17 Descarga artificial anual

Las cifras representadas son el fiel reflejo del reducido nivel de extracción de recursos subterráneos que presentan Teno y Lontué.(año 1978) El total de Teno y Lontué supera levemente un caudal continuo de 0.4 m³/s.

6.1.2 ESTUDIO DGA/AQUATERRA-2012

Este trabajo fue realizado por la empresa Aquaterra Ingenieros Ltda., concluyendo su informe final en diciembre de 2012. El reporte aborda los trabajos necesarios para la materialización de un modelo numérico que se ajuste adecuadamente al funcionamiento del sistema hidrogeológico de la cuenca del río Mataquito.

Se realizó un análisis pluviométrico considerando 20 estaciones meteorológicas ubicadas alrededor y en el área de estudio, abarcando un perfil de alturas entre 18 y 734 m.s.n.m.

El análisis pluviométrico se complementó con un análisis fluviométrico que consideró 12 estaciones dentro y fuera de la cuenca de estudio.

Para caracterizar la geometría del acuífero se materializó un estudio geofísico en terreno, materializando 15 perfiles de prospección geofísica a través de 157 estaciones gravimétricas.

La caracterización hidrogeológica se realizó a través de los datos aportados por la geología regional y de sub-superficie derivada de los perfiles estratigráficos de 69 pozos con antecedentes. Se realizó un catastro de terreno para la obtención de la superficie piezométrica. Con los antecedentes del catastro de terreno, los del Catastro Público de Aguas y los datos aportados por catastros anteriores (estudios: Estudio de calidad de aguas subterráneas en las cuencas de Huasco y Mataquito CNR/GCF-2006 y Mejoramiento y ampliación de la red de aguas subterráneas,

regiones VII a X DGA/CONIC-BF-2010) se generó una base de datos con antecedentes de 1000 pozos existentes en la zona.

La recarga se determinó utilizando un modelo hidrológico simplificado, el cual simula las condiciones hidrológicas de oferta y demanda hídrica a nivel de sectores de riego. Para la cuenca completa se consideraron 26 sectores de riego los cuales evapotranspiran y percolan junto a los cauces determinando la recarga al sistema acuífero para un año hidrológico tipo (20%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia).

El modelo numérico para flujo de aguas subterráneas se implementó en Visual Modflow versión 4.2. Para este modelo se consideró un acuífero formado por dos estratos, el más somero de un espesor aproximado de 200 metros y el profundo desde los 200 hasta la roca basal. El modelo recibe la recarga determinada por el modelo hidrológico, generando los flujos subterráneos correspondientes y determinando los niveles piezométricos derivados de estos flujos. La calibración del modelo numérico fue realizada en régimen permanente, utilizando como contraste la superficie piezométrica generada para este estudio.

RECARGA

La recarga considerada para el análisis en este caso será la aceptada en el modelo numérico de flujo de aguas subterráneas ModFlow-Mataquito.

De acuerdo con lo mostrado en la Figura 12, el modelo numérico dividió el acuífero de la cuenca del río Mataquito en dos grandes áreas, el acuífero subyacente a los ríos Teno y Lontué y el acuífero correspondiente a los rellenos fluviales del río Mataquito.

El interés estará en analizar el acuífero correspondiente a los ríos Teno y Lontué.

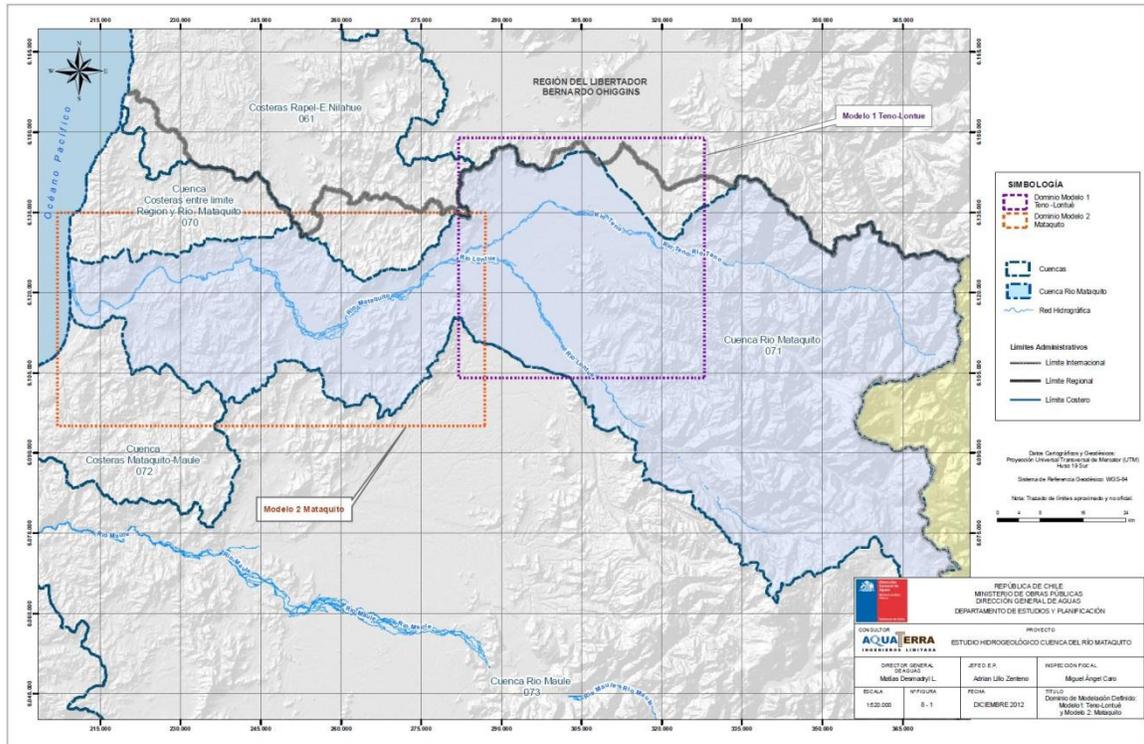


Figura 12 Área de estudio del modelo numérico de aguas subterráneas

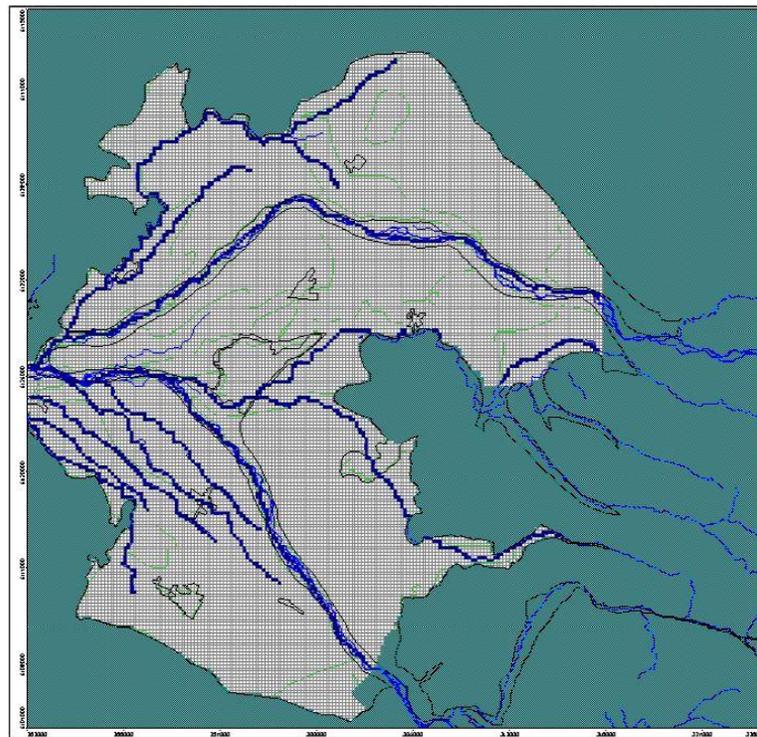


Figura 13 Dominio del acuífero Teno-Lontué, DGA/Aquater-2012

La Figura 13 muestra el dominio de la modelación correspondiente a la zona del acuífero Teno-Lontué interés del presente informe..

El modelo se implementó con condiciones de borde del tipo nivel constante en las cabeceras de los ríos Teno (400 msnm) y Lontué (340 msnm) y en el sector de la confluencia al inicio del encajonamiento del río Mataquito (140 msnm), además se consideraron celdas del tipo río para simular el efecto de los ríos Teno y Lontué sobre el sistema acuífero.

La recarga areal inicial utilizada corresponde a la entregada por el modelo hidrológico.

El modelo fue calibrado para representar las condiciones medias de funcionamiento del acuífero. El contraste utilizado fue la superficie piezométrica obtenida en la campaña de terreno del año 2012.

Los resultados se muestran en la Tabla 18.

Entradas			Salidas		
Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)	Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)
Flujo Subterráneo	108247	1.3	Descarga Pozos	390650	4.5
Recarga Areal	691230	8.0	Afloramientos Río	770370	8.9
Recarga Río	459900	5.3	Flujo subterráneo	98354	1.1
					0.0
Total	1259377	14.6	Total	1259374	14.6
Error: 0.000%					

Tabla 18 Resultados de la calibración del modelo ModFlow

De los resultados anteriores se deduce una recarga total al sistema de 14.6 m³/s.

Además de los resultados de la calibración se corrieron 5 escenarios de explotación:

1. Recarga con 50% de probabilidad de Excedencia.
2. Inclusión del total de captaciones incorporadas al modelo (con factor de uso)
3. Multiplicación de los factores de uso por 1.5 (Esc 3a)
4. Multiplicación de los factores de uso por 3.0 (Esc 3b)
5. Factor de uso 1 para todos los pozos.

Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

Entradas			Salidas		
Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)	Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)
Flujo Subterráneo	85099	1.0	Descarga Pozos	390650	4.5
Recarga Areal	923290	10.7	Afloramientos Río	910510	10.5
Recarga Río	394745	4.6	Flujo subterráneo	101980	1.2
					0.0
Total	1403134	16.2	Total	1403140	16.2
Error: 0.000%					

Tabla 19 Recarga con 50% de probabilidad de Excedencia

Entradas			Salidas		
Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)	Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)
Flujo Subterráneo	116279	1.3	Descarga Pozos	563090	6.5
Recarga Areal	691230	8.0	Afloramientos Río	667640	7.7
Recarga Río	520360	6.0	Flujo subterráneo	97147	1.1
					0.0
Total	1327869	15.4	Total	1327877	15.4
Error: 0.001%					

Tabla 20 Escenario considerando derechos constituidos y en trámite (con factor de uso) a la fecha del estudio DGA/Aquaterra-2012

Entradas			Salidas		
Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)	Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)
Flujo Subterráneo	118701	1.4	Descarga Pozos	539340	6.2
Recarga Areal	691230	8.0	Afloramientos Río	688140	8.0
Recarga Río	513560	5.9	Flujo subterráneo	95711	1.1
					0.0
Total	1323491	15.3	Total	1323191	15.3
Error: -0.023%					

Tabla 21 Escenario considerando un incremento en 50% de los factores de uso (Esc 3a)

Entradas			Salidas		
Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)	Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)
Flujo Subterráneo	133246	1.5	Descarga Pozos	695660	8.1
Recarga Areal	691230	8.0	Afloramientos Río	612670	7.1
Recarga Río	577080	6.7	Flujo subterráneo	93240	1.1
					0.0
Total	1401556	16.2	Total	1401570	16.2
Error: 0.001%					

Tabla 22 Escenario considerando un incremento en 200% de los factores de uso (Esc 3b)

Entradas			Salidas		
Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)	Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)
Flujo Subterráneo	143923	1.7	Descarga Pozos	851470	9.9
Recarga Areal	691190	8.0	Afloramientos Río	536790	6.2
Recarga Río	643200	7.4	Flujo subterráneo	90056	1.0
					0.0
Total	1478313	17.1	Total	1478316	17.1
Error: 0.000%					

Tabla 23 Escenario considerando factor de uso 1 para todos los pozos

El resumen de los efectos sobre la recarga se aprecia en la Tabla 24.

	Flujo entrada [m ³ /s]	Recarga riego [m ³ /s]	Recarga río [m ³ /s]	Recarga total [m ³ /s]	Recarga río-riego [m ³ /s]	Bombeo [m ³ /s]	Afloramiento [m ³ /s]	Flujo salida [m ³ /s]	Diferencia recarga total respecto Esc Calibración [%]	Diferencia recarga total respecto Esc Calibración [%]
Calibración	1.3	8.0	5.3	14.6	13.3	4.5	8.9	1.1		
Recarga_50	1.0	10.7	4.6	16.2	15.3	4.5	10.5	1.2	11.4%	18.2%
Total_captaciones	1.3	8.0	6.0	15.4	14.0	6.5	7.7	1.1	5.4%	-13.3%
Esc_a	1.4	8.0	5.9	15.3	13.9	6.2	8.0	1.1	5.1%	-10.7%
Esc_b	1.5	8.0	6.7	16.2	14.7	8.1	7.1	1.1	11.3%	-20.5%
Esc_c	1.7	8.0	7.4	17.1	15.4	9.9	6.2	1.0	17.4%	-30.3%

Tabla 24 Resumen de resultados

Los resultados de la Tabla 24, indican que un aumento en el bombeo induce un aumento de la recarga y una disminución de los afloramientos.

6.1.3 ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE CAUDALES DISPONIBLES EN CUENCAS NO CONTROLADAS DE RECUPERACIÓN, CUENCAS DE MAULE, MATAQUITO Y RAPEL CNR/GCF-2008

Este estudio fue realizado por GCF Ingenieros Ltda. para la CNR y fue terminado a fines del año 2008. El estudio se desarrolló bajo el influjo de dos grandes motivaciones:

1. Cuantificación de caudales en zonas de recuperación como fuentes de recursos hídricos para el riego en cuencas controladas así como no controladas de Rapel, Mataquito y Maule, y
2. Mejora de la Interfaz SIG-MAGIC.

MAGIC es un modelo de asignación de agua basado en 13 objetos capaces de representar un sistema hídrico cualquiera. Para el caso de la cuenca del río Mataquito, ésta se representó a través de 4 acuíferos (Teno, Lontué, Mataquito y Curepto), 19 zonas de riego, 7 subcuencas de cabecera o aportes naturales, 16 cuencas laterales, sectores urbanos, captaciones puntuales, entre otras, la Figura 14 muestra la topología desarrollada para la cuenca del río Mataquito.

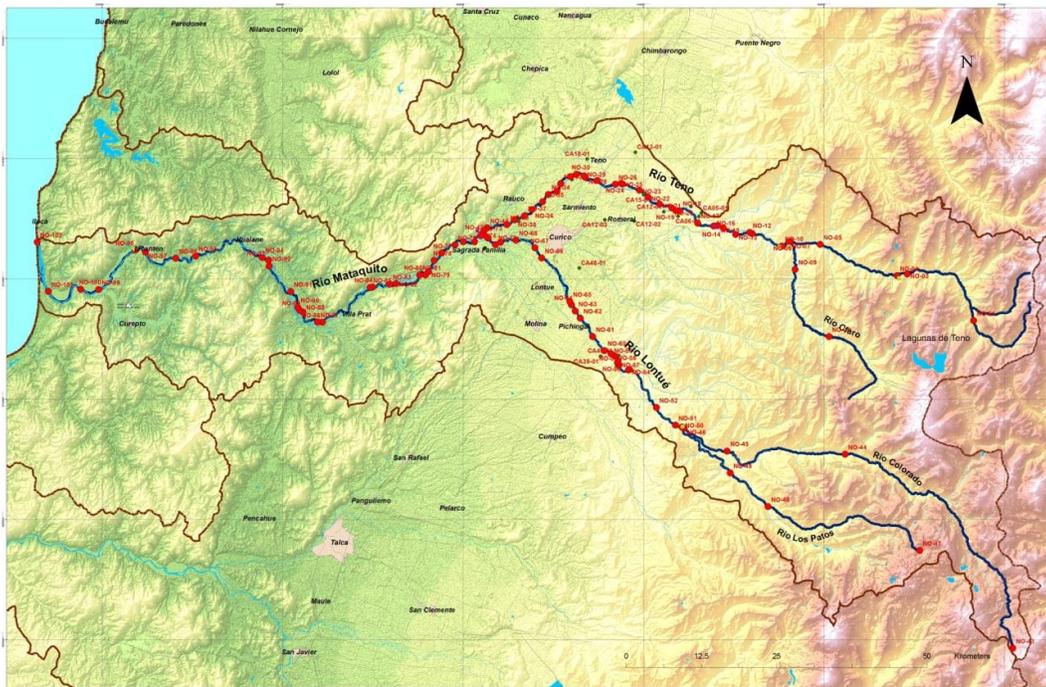


Figura 14 Topología MAGIC de la cuenca del río Mataquito

MAGIC conecta internamente los distintos objetos de manera de representar adecuadamente el funcionamiento de la cuenca.

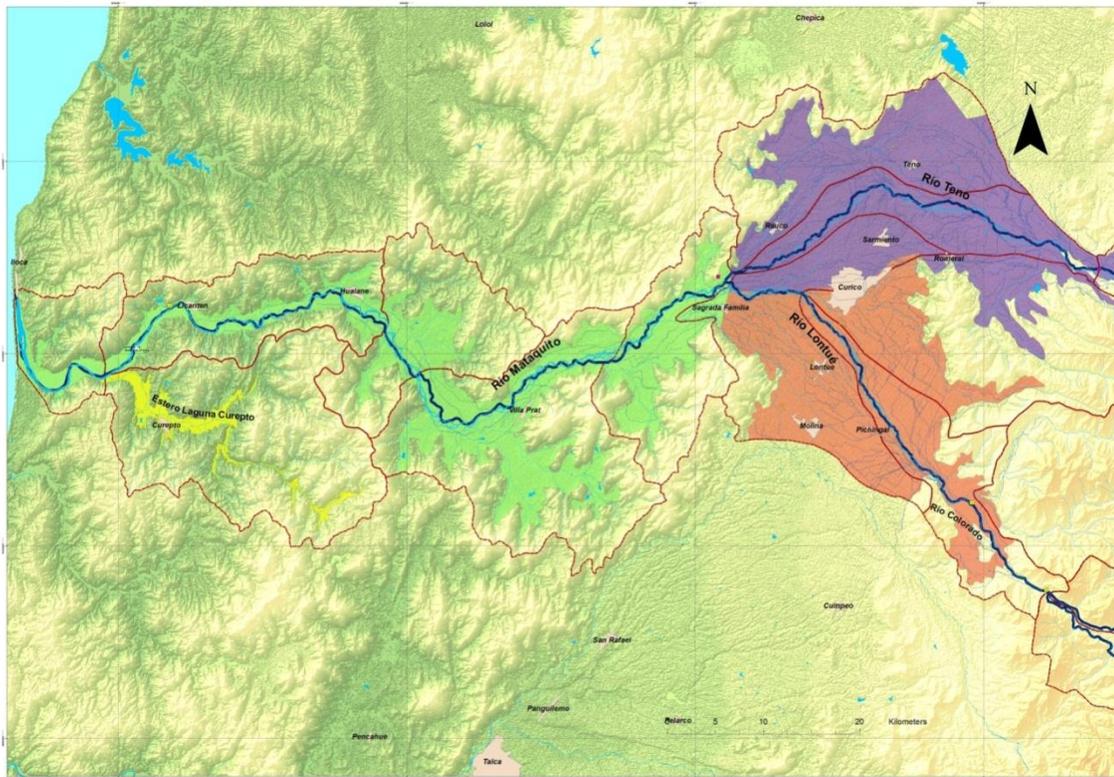


Figura 15 Acuíferos considerados para la cuenca del río Mataquito

La representación acuífera del sistema es la que muestra la Figura 15, en la cual se aprecian 4 acuíferos: Teno, Lontué, Mataquito y Curepto. El número de zonas de riego alcanzó a 19, las que se muestran en la Figura 16, para el caso de los acuíferos Teno-Lontué estas zonas cubren completamente los rellenos.

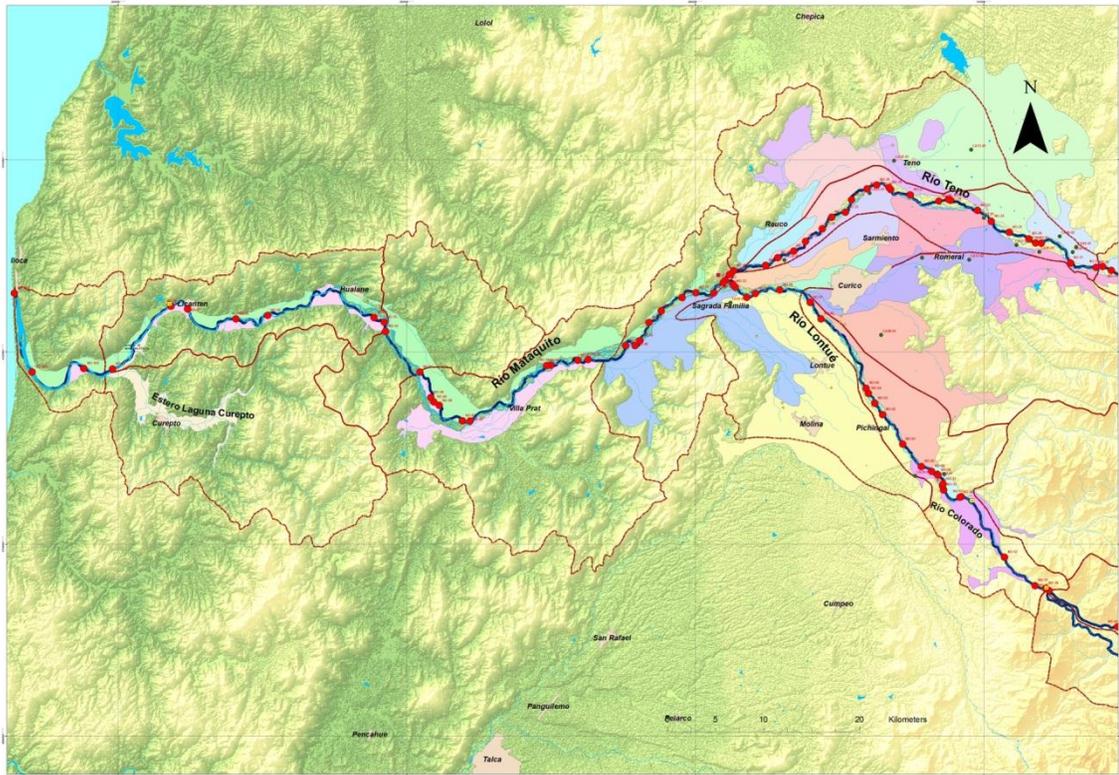


Figura 16 Zonas de riego consideradas en la modelación de la cuenca del río Mataquito

Los resultados obtenidos del modelo para el escenario de calibración definen una recarga de 43,3 m³/s para el acuífero Teno-Lontué. La cual corresponde a los aportes de las percolaciones de las zonas de riego, de canales y ríos.

7 ANÁLISIS DE LA RECARGA

Se dispone de 3 valores para la recarga renovable del sistema acuífero Teno-Lontué. En el caso del estudio CNR/CICA-1978 no se considerará la recarga potencial pues ésta depende de los niveles freáticos de la zona de descarga del acuífero; si el nivel baja por sobre los 2 metros comenzará la recarga en ese sector, esto significa que los niveles en la parte alta del acuífero tendrían un descenso significativo lo cual implicaría una posible sobreexplotación del acuífero. Así se tiene:

a. Recarga estimada por estudio CNR/CICA-1978	16,6 m ³ /s.
b. Recarga estimada por estudio CNR/GCF-2008	43,3 m ³ /s.
c. Recarga estimada por estudio DGA/AQUATERRA-2012	14,6 m ³ /s.

La recarga del estudio CNR/CICA-1978 puede considerarse levemente sobreestimada debido principalmente a que el modelo utilizado en su determinación no tiene un receptáculo que permita establecer un límite a la percolación. La cantidad de percolación está determinada por la frecuencia de riego, supeditada a su vez por las prácticas de riego agrícola utilizadas en aquella época (1978), la cual es diferente en la actualidad debido al aumento en la eficiencia del uso del agua (tecnificación).

Por su parte el estudio DGA/AQUATERRA-2012 establece un valor de recarga basada en los resultados del modelo numérico de flujos subterráneos ModFlow el cual fue calibrado en régimen permanente, ajustando los resultados a la superficie piezométrica determinada con los niveles de pozos del catastro realizado para este estudio. De esta forma, los niveles actuales en promedio están bien representados por el modelo. Adicionalmente, se ha calculado el flujo de salida del acuífero Teno-Lontué utilizando la ley de Darcy. En este caso, el área de la sección de salida se determinó a través de los resultados del perfil gravimétrico realizado en esta zona y el gradiente y permeabilidad utilizados corresponden a los estimados en el mismo estudio; el valor del flujo de salida es de alrededor de 900 l/s, valor que es bastante cercano al valor promedio determinado por el modelo (Figura 17) de 1100 l/s.

Entradas			Salidas		
Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)	Componente	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /s)
Flujo Subterráneo	108247	1.3	Descarga Pozos	390650	4.5
Recarga Areal	691230	8.0	Afloramientos Río	770370	8.9
Recarga Río	459900	5.3	Flujo subterráneo	98354	1.1
					0.0
Total	1259377	14.6	Total	1259374	14.6
Error: 0.000%					

Figura 17 Resultados de la calibración modelo ModFlow DGA/AQUATERRA-2012

Lo anterior permite validar la estimación de recarga realiza en el estudio DGA/AQUATERRA-2012 y considerar que el valor de la recarga estimada en el estudio CNR/GCF-2008 de 43,3 m³/s se encuentra sobrestimada.

Finalmente, se podría considerar cualquiera de los dos valores más bajos de recarga (CICA/DGA 1978 o DGA/Aquaterra-2012) como el valor a adoptar en el acuífero de Teno-Lontué, sin embargo, se adoptará el estimado en el estudio DGA/Aquaterra-2012 por las consideraciones expuestas en los subcapítulos previos.

En conclusión, el valor adoptado de Recarga renovable al acuífero Teno-Lontué es de 14,6 m³/s.

8 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE EXPLOTACIÓN SUSTENTABLE

La estimación del volumen de explotación sustentable del acuífero Teno-Lontué se realizó considerando la interferencia río-acuífero debido principalmente a que el sistema subterráneo está estrechamente interrelacionado con el superficial.

Para ello se aplicará el criterio establecido en el artículo 30 letra d) del Decreto Supremo N° 203 del 20 de mayo de 2013 (DS N° 203 de 2013), el cual aprueba el reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas, el cual en síntesis señala:

"La Dirección General de Aguas deberá..." declarar un determinado Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común como área de restricción para nuevas explotaciones de aguas subterráneas,..." cuando ocurra al menos una de las siguientes situaciones:

"Los estudios técnicos que indiquen que la demanda comprometida producirá una afección a los caudales de los cursos de aguas superficiales en más de un diez por ciento del caudal medio mensual asociado al ochenta y cinco por ciento de probabilidad de excedencia, durante seis meses consecutivos"

Para lo anterior fue necesario generar las series de caudales medios mensuales en la salida del sistema Teno-Lontué, utilizando como herramienta la modelación MAGIC de la cuenca del río Mataquito (MAGIC-Mataquito), CNR/GCF 2008 del estudio denominado "Diagnóstico de Caudales Disponibles en Cuencas no controladas de Recuperación, cuencas del Maule, Mataquito y Rapel".

Si bien, como se mencionó en el capítulo anterior, este modelo no refleja adecuadamente la recarga que se genera en el acuífero, sin embargo, sus conexiones entre los diferentes objetos están correctamente establecidas para representar adecuadamente el sistema. Por su parte, el modelo está calibrado en seis estaciones fluviométricas representando con bajo error (RMS inferior a 7%) las señales de caudales medios mensuales. Por tanto podemos utilizar los resultados relativos de los diferentes escenarios para la determinación del volumen sustentable.

El periodo de modelación consideró 54 años (1950 – 2004), sin embargo, dentro del mismo estudio se advierte que la simulación refleja preferentemente los últimos años de simulación (1980 -2004).

Se estableció como escenario inicial los valores de caudales medios mensuales de la simulación original, el cual considera una explotación previsible de 2,88 m³/s en los acuíferos de Teno y Lontué, que corresponde a una demanda comprometida en derechos de aprovechamientos de 11,89 m³/s para el año 2004, de acuerdo con los antecedentes de la modelación.

La serie de caudales medios mensuales superficiales en el escenario inicial, fueron obtenidos del Nodo N° 42 de la topología MAGIC-Mataquito, correspondiendo al inicio del Río Mataquito en la junta de los Ríos Teno y Lontué, registrando los afloramientos de sus acuíferos y los derrames de las zonas de riego asociados a ellos. El Caudal medio mensual obtenido en este Nodo es de 146,6 m³/s, y sus curvas de variación estacional de caudales asociadas a distintas probabilidades de excedencia se presentan en el Gráfico 1.

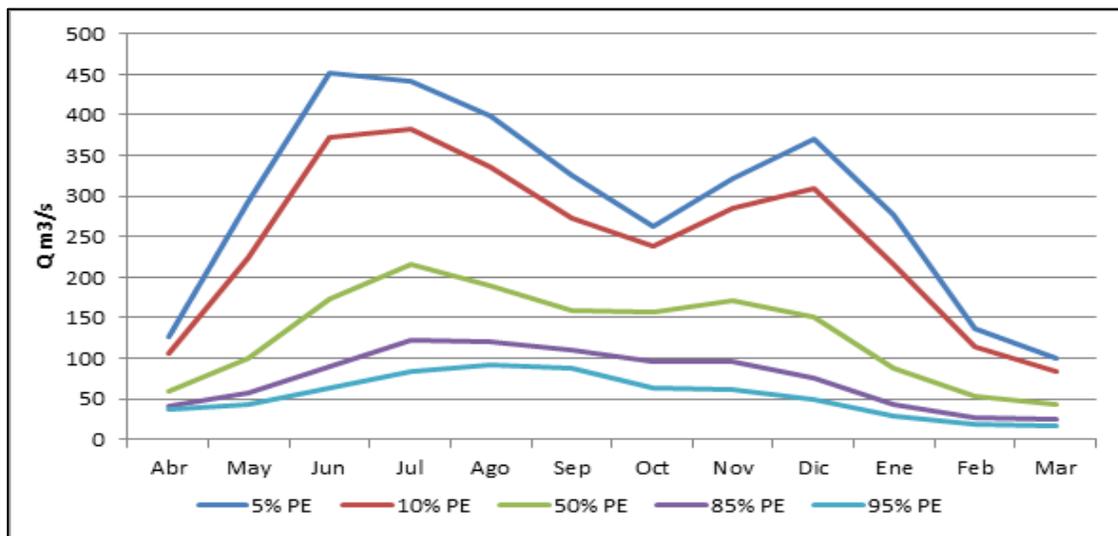


Gráfico 1. Variación estacional de caudales medios mensuales asociados a diferentes probabilidades de excedencia en Nodo N° 42 (Escenario inicial)

Finalmente, se estableció los valores asociado al 10 % de caudales medios mensuales con 85% de probabilidad de excedencia en el nodo 42, obtenidos de los resultados del escenario base.

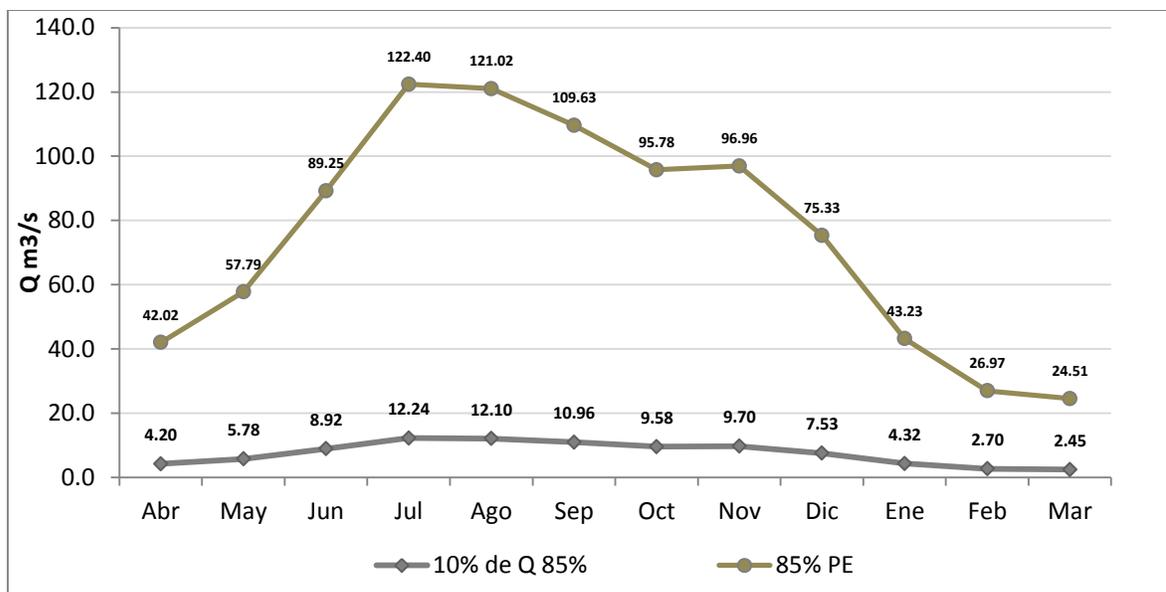


Gráfico 2 . Caudales medios mensuales asociados al 10% del Q 85% de probabilidad de excedencia Nodo 42, Escenario Inicial. (m³/s)

La afección se verificará en virtud de la disminución de caudal promedio de cada mes en este mismo punto (nodo), para diferentes simulaciones con escenarios de explotación crecientes de aguas subterráneas en los acuíferos de Teno y Lontué.

Los escenarios de explotación, se elaboraron aumentando la explotación inicial en cada acuífero desde el caudal total asociado a los derechos considerados hasta encontrar el nivel de explotación que implique sobrepasar el mencionado criterio establecido en el Decreto 203 de 2013. Los escenarios más relevantes se describen en la Tabla 25. Escenarios de simulación con diferentes niveles de explotación más representativos.

Escenario	Explotación impuesta [m ³ /s]	Aumento de Explotación [m ³ /s]	Observación
Inicial	2.88	0	Caudal explotación previsible año 2004
1	9.77	6.89	Escenario generado
2	10.41	7.53	Escenario generado
3	11.92	9.1	Caudal total en derechos escenario inicial (2008)

Tabla 25. Escenarios de simulación con diferentes niveles de explotación más representativos.

Posteriormente, en cada escenario de explotación, se compararon los promedios de disminución de caudal para cada mes con respecto al escenario inicial, verificándose si estas diferencias sobrepasaban el valor máximo de afección tolerado para cada mes.

8.1 RESULTADOS

Los resultados de disminución de caudal promedio para cada mes (afección) y sus correspondientes límites se representan en el Gráfico 3. Disminución de caudal promedio por mes (afección) por escenario de explotación y 10% del Caudal 85% de probabilidad de excedencia mensual (m^3/s).

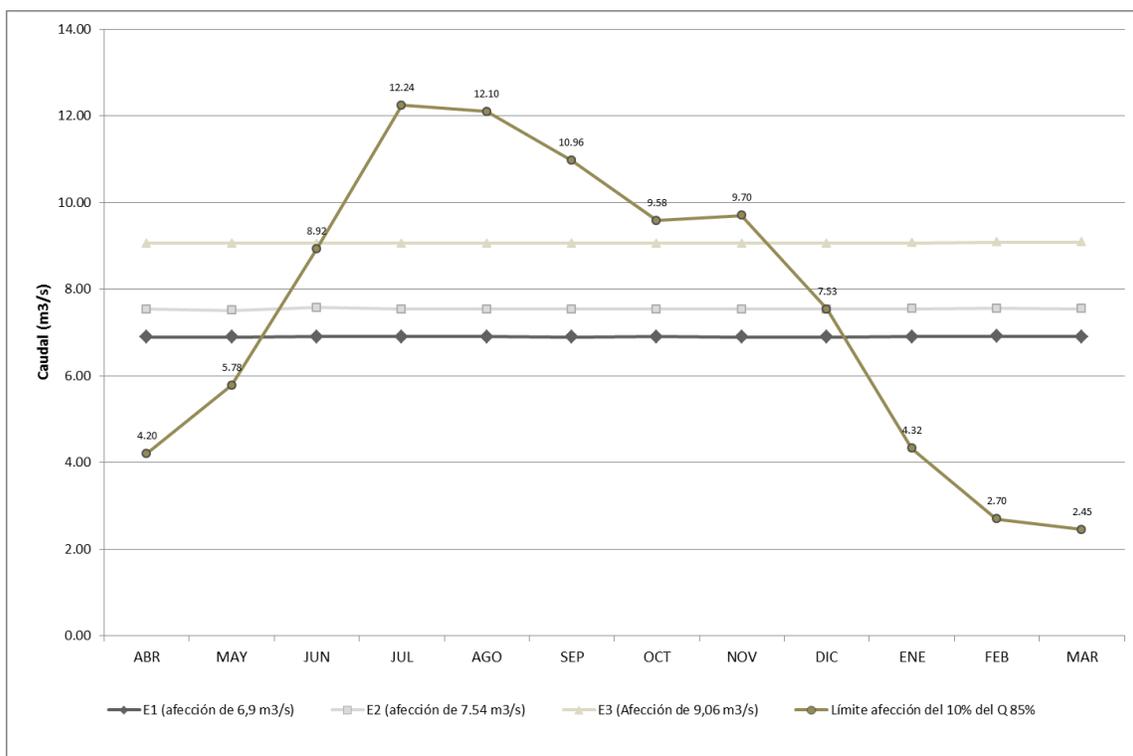


Gráfico 3. Disminución de caudal promedio por mes (afección) por escenario de explotación y 10% del Caudal 85% de probabilidad de excedencia mensual (m^3/s).

La frecuencia mensual en la cual la disminución de caudal (afección), sobrepasa el 10% del caudal medio mensual asociado al ochenta y cinco por ciento de probabilidad de excedencia, según diferentes escenarios de explotación se describe en la Tabla 26. Frecuencia mensual de excedencia del límite de afección a caudales

superficiales establecido en el DS N° 203 de 2013, para cada escenario de explotación.

Escenario	Explotación impuesta [m ³ /s]	Aumento de Explotación [m ³ /s]	Nro de Meses que excede Criterio DS 203	Observación
Inicial	2,88	0	0	Caudal explotación previsible escenario año 2004.
1	9,77	6,89	5	Escenario generado
2	10,41	7,53	6	Escenario generado
3	11,92	9,1	7	Caudal total en derechos escenario inicial (2008)

Tabla 26. Frecuencia mensual de excedencia del límite de afección a caudales superficiales establecido en el DS N° 203 de 2013, para cada escenario de explotación.

De acuerdo al Gráfico N°3 y a la Tabla 26. Frecuencia mensual de excedencia del límite de afección a caudales superficiales establecido en el DS N° 203 de 2013, para cada escenario de explotación. un aumento en la explotación de 7,53 m³/s por sobre la considerada en el escenario inicial, provoca una disminución del caudal superficial de 7,5 m³/s en promedio, la cual implica una afección de un 10% del caudal 85% de probabilidad de excedencia en al menos 6 meses consecutivos.

Cabe hacer presente que el aumento de explotación de 7,53 m³/s en el acuífero, se realiza con cargo a la fracción no utilizada de los derechos otorgados.

En consecuencia, considerando el escenario actual la explotación previsible de aproximadamente 3,94 m³/s (equivalentes a derechos otorgados por un total de 13,65 m³/s), sumado al aumento caudal de explotación que produce la afección a los caudales superficiales (7,5 m³/s), se estima que el volumen de explotación sustentable del acuífero Teno-Lontué es equivalente a un caudal medio anual de 11,5 m³/s.

9 CONCLUSIONES

En el presente reporte técnico se ha estimado una recarga media al acuífero Teno-Lontué en $14,6 \text{ m}^3/\text{s}$, a partir de la información de tres estudios realizados en la cuenca.

El primer estudio (CNR/CICA-1978) aporta fundamentalmente al entendimiento de la dinámica del funcionamiento del sistema, a través de un robusto análisis de la información geológica, hidrológica e hidrogeológica existente a la fecha de su realización.

Del segundo estudio considerado (CNR/GCF-2008) se rescató la implementación del modelo MAGIC-Mataquito, pues representa adecuadamente el funcionamiento del sistema, no así sus valores de recarga. Es por esto que se usó el modelo comparando las diferencias de caudales entre dos escenarios de simulación, obteniendo así un caudal de explotación de aguas subterráneas por sobre un estado inicial definido del sistema, el cual provoca una afección de los caudales superficiales del sistema para un estado final. Este caudal resultó en $7,53 \text{ m}^3/\text{s}$.

De lo anterior y considerando el uso previsible actual, es posible deducir el caudal de explotación correspondiente al volumen sustentable del acuífero Teno-Lontué de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$.