



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

BALANCE HIDRICO PRELIMINAR ACUIFERO RIO MAULE

REALIZADO POR:

División de Estudios y Planificación

SDT N° 319

Santiago, Agosto de 2011

Jefe División de Estudios y Planificación

Carlos Salazar Méndez

Equipo de Trabajo

Julio Cornejo Morales

Miguel Caro Hernández

Luis Rojas Badilla

Francisco Rodríguez Labbé

**BALANCE HIDRICO PRELIMINAR CUENCA DEL RIO MAULE.
MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL**

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	2
2	ANTECEDENTES.....	3
2.1	Estudios Previos.....	3
3	MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO	5
3.1	Niveles de Agua Subterráneas.....	5
3.2	Delimitación de Acuíferos.....	7
3.3	Parámetros Hidrogeológicos	8
3.4	Flujos Subterráneos.....	10
3.5	Zonas de Recuperación.....	12
4	DEMANDA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	13
5	RECARGA NETA	14
6	BALANCE HÍDRICO PRELIMINAR.....	14
7	CONCLUSIONES	15

1 INTRODUCCIÓN

En el marco del Plan de Fuentes de Agua Subterráneas definido por el División de Estudios y Planificación para la Dirección General de Aguas, se ha considerado el acuífero asociado a la cuenca del río Maule como prioritaria, debido a la alta demanda por recursos hídricos subterráneos.

La DGA para algunas de las cuencas del país ha avanzado en el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas sólo de acuerdo a un análisis local, que involucra la evaluación de la disponibilidad a nivel de la fuente, a través de una prueba de bombeo. Este procedimiento es muy válido para el tipo de acuíferos en la zona sur del país, entre ellos el del río Maule, que a pesar de presentar altas demandas de agua subterráneas, tiene también montos de recarga altos y renovables anualmente. En general, estos acuíferos se manifiestan sin problemas para satisfacer la explotación de agua subterránea, sin embargo se requiere conocer el balance hídrico general, que permita avanzar en el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas y poder plantear un sistema de monitoreo de niveles de agua subterránea, que permita a futuro evaluar la sustentabilidad de los acuíferos.

En el caso del río Maule, la demanda por derechos de agua subterránea es importante tanto para fines de riego como para uso domiciliario. En épocas de sequía superficial, es una cuenca que se ha visto vulnerada sobre todo por parte de los usuarios menores (pequeños agricultores y APRs). Dentro de la cuenca además, hay sectores que son de mayor sensibilidad especialmente en la vertiente poniente de la cuenca del Loncomilla (ríos Purapel y Cauquenes) donde la alimentación de los ríos es netamente pluvial, lo cual los hace más vulnerable en períodos de sequía.

Dado lo anterior, la Dirección General de Aguas ha estimado pertinente avanzar en el conocimiento del balance hídrico del acuífero, con el objeto de satisfacer las necesidades crecientes por derechos de agua subterránea, ya sea como respaldo del uso agrícola en periodos secos, como para aumentar superficies regadas y otros usos permanentes. Para ello, se plantea el desarrollo de un balance hídrico preliminar y conservador, conforme a un modelo conceptual que se ajuste a la información disponible, y que servirá como base para la construcción de un modelo hidrogeológico preliminar.

2 ANTECEDENTES

2.1 Estudios Previos

Existe una serie de antecedentes que permiten obtener información de base para realizar un análisis preliminar de la situación de estos acuíferos. A continuación se describe algunos de los estudios realizados en la cuenca del río Maule que aportan información hidrogeológica.

Los estudios usados como antecedentes para el presente informe fueron los siguientes:

“Exploración de los Recursos Hídricos Subterráneos VII región” (DGA, 1999)

Este estudio realiza una caracterización hidrogeológica general de los acuíferos de la cuenca del río Maule, caracterizando la zona norte del Maule incluyendo la ciudad de Talca, la zona centro que corresponde a la parte sur del río Maule abarcando la zona de San Javier hasta Linares y la zona sur con las zonas de Longaví, Retiro, Parral, Cauquenes y Purapel. Este estudio incorpora un balance general para cada una de las 3 zonas, estimando recargas y descarga de los sistemas. Sin embargo, este balance no cierra para la parte sur del Maule, principalmente por la falta de datos para determinar ciertos componentes del balance.

“Bases plan director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Maule, diagnóstico” (DGA, 2003).

Este estudio realizó un catastro pozos (aprox. 700 pozos) considerando localización, usos, caudales y profundidad del nivel estático en algunos casos. Incluye un estudio hidrogeológico general, el cual considera: recargas, transmisividades y mapa de niveles. En este estudio se hace referencia al balance general generado en el estudio de “Exploración de los recursos Hídricos subterráneos de la VII región”.

“Plan director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del río Maule: actualización del modelo de operación del sistema y formulación del plan” (DGA, 2007)

Este estudio desarrolla un modelo de operación superficial de la cuenca del Maule (MAGIC), el cual considera un balance hídrico de los acuíferos, sin embargo, la recarga con la que trabaja este modelo corresponde a un valor potencial muy por sobre la recarga neta buscada. Este estudio contiene una descripción general en cuanto a las características de los sectores acuíferos (área, volumen, transmisividad, etc), se estiman las demandas de los pozos para riego y otros usos, así como las demandas agrícolas de acuerdo a los sectores de riego identificados y sus coeficientes de percolación y derrame. Además se realiza un estudio hidrológico con los datos de precipitación obtenidos de las estaciones pluviométricas de la DGA.

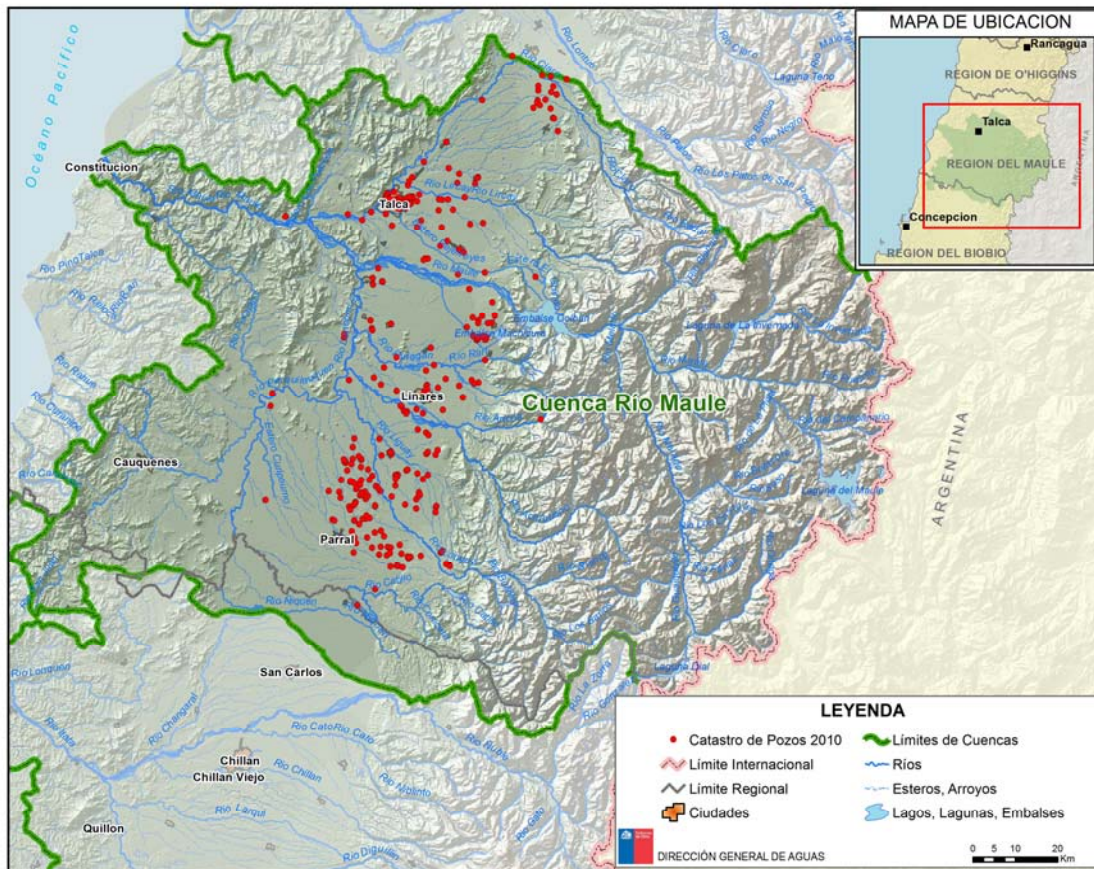
“Horas Profesionales para la Revisión y Generación de Informes, para los Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos” (DGA, 2008)

Este estudio incluye un capítulo sobre el marco Hidrogeológico de la VII y VIII región, donde se recopila información hidrogeológica general de la región desde estudios anteriores. Tiene estimación de recargas y descargas.

“Levantamiento de Información Hidrogeológica para Modelación Cuenca del Río Maule” (DGA, 2010)

Este estudio corresponde a una recopilación y análisis de la información hidrogeológica más relevante contenida en los informes anteriores, así como la generación de nueva información mediante geofísica gravimétrica a nivel regional y la realización de un catastro de 200 pozos con información actualizada del nivel freático. Este estudio finalizó con una geometría del acuífero sedimentario de la depresión intermedia asociada a la cuenca del río Maule y las bases para un modelo matemático en plataforma Visual MODFLOW.

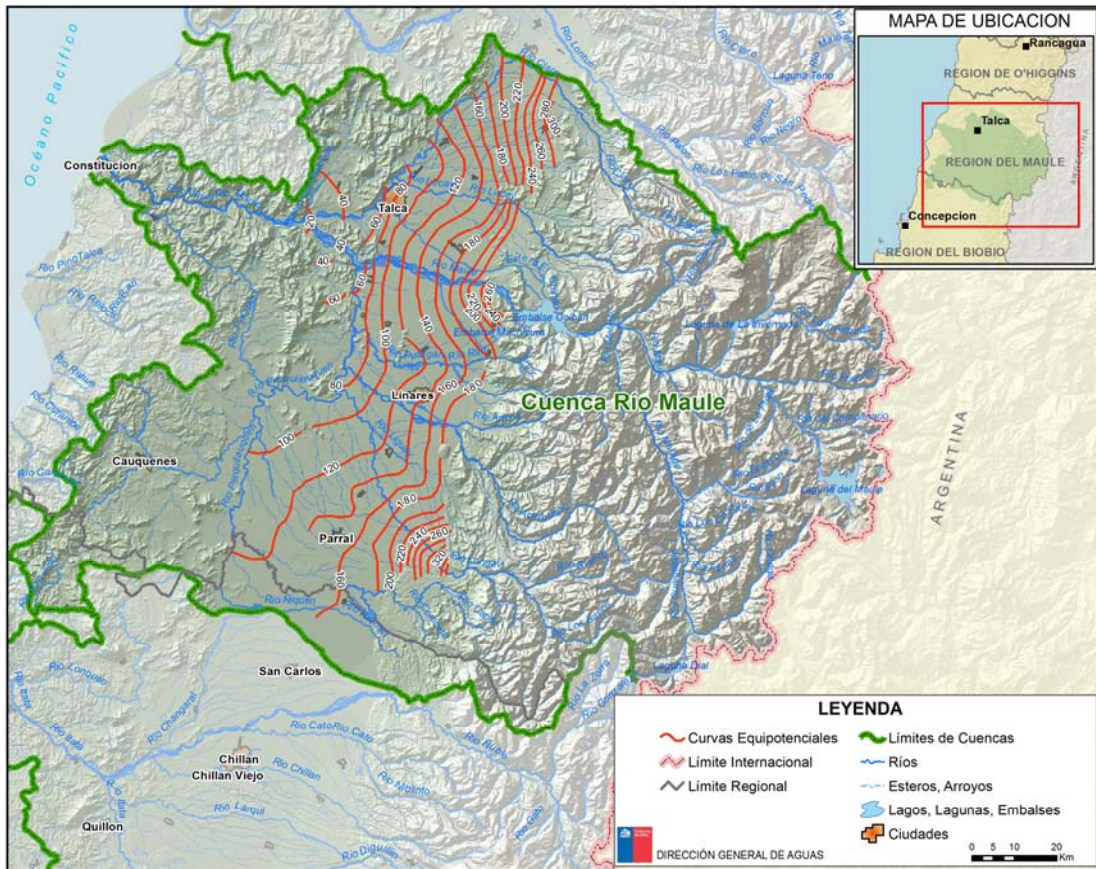
Figura 2. Catastro Pozos DGA 2010



Con los datos profundidades del nivel estático del catastro DGA 1999-2003 y un modelo de elevación digital DEM (USGS), se ha elaborado un mapa de isopiezas para el acuífero del Maule, tal como se muestra en la Figura 3. Del análisis de esta figura, se desprende que al norte del río Maule los flujos de agua subterráneas se transmiten en la dirección E-W, hasta encontrar los límites del acuífero en el cordón de la Cordillera de la Costa, donde aflora por el río Claro. Al sur del Maule, entre el río Maule y el río Longaví, se mantiene la dirección del flujo de agua subterránea E-W mostrándose gran influencia de los ríos Maule, Achibueno y Longaví que fluyen paralelos a las líneas de flujo del acuífero, y teniendo como punto de salida el río Loncomilla al oeste, que drena este sector superficialmente hacia la desembocadura.

En la zona sur del Maule, sin considerar la subcuenca del río Cauquenes, el acuífero drena en la dirección SE-NW en dirección del río Loncomilla. El acuífero del río Cauquenes ha sido previamente descartado de este análisis, en función de su escaso aporte subterráneo al balance hídrico del gran acuífero del Maule que se ubica principalmente en la depresión intermedia.

Figura 3. Curvas Equipotenciales Acuífero de la Cuenca del Maule



3.2 Delimitación de Acuíferos

De acuerdo a los antecedentes hidrogeológicos anteriormente señalados, así como el rol principal del río Maule como única fuente de salida superficial y subterránea de la cuenca es que para efectos de este estudio, el acuífero del río Maule compuesto por en el relleno sedimentario localizado en la depresión intermedia, se ha delimitado en forma preliminar en dos grandes sectores, teniendo como límite el río Maule.

La Figura 4 muestra la delimitación definida para el acuífero, identificando sectores de Maule Norte y Maule Sur.

Tabla 1. Coeficientes Elásticos por Sectores

ÁREA	SUB-ÁREA	T (m2/día)	K (m/s)	S
ÁREA NORTE				
Cumpeo	Panguilemo	400	$4,6 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
	Cumpeo	1.500	$1,7 \cdot 10^{-3}$	10^{-5}
	Pelarco	2.000	$2,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
San Clemente		2.000	$2,3 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}
Talca		2.000	$2,3 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}
ÁREA CENTRAL				
Maule Sur		3.500	$4,1 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}
Linares	Rari	200	$3,3 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
	Yerbas Buenas	200	$2,3 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
	Linares	1.700	$7,9 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
	San Antonio	1.700	$7,9 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
	Terminal Enap	1.000	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4} - 10^{-2}$
	Miraflores	3.500	$2 \cdot 10^{-4}$	
Putagán		200	$2,3 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
San Javier-Villa Alegre		3.500	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
Meloza		500	$5,8 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
Villaseca		1.500	$1,7 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
ÁREA SUR				
Longaví-Niquén		3.000	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$10^{-2} - 10^{-4}$
Perquillauquén Superior		4.500	$1,7 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
Quella		1.500	$8,7 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
Purapel		500	$1,2 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
Valles Cordillera Costa		100	$2,3 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
Perquillauquén Inferior		2.500	$9,6 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}
Vaquería		100	$2,3 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
Valles Andinos		7.800	-	10^{-3}

Fuente: Exploración de los Recursos Hídricos Subterráneos VII región (DGA, 1999)

Por otra parte, en el estudio “Bases plan director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Maule, diagnóstico” (DGA, 2003), se procedió a interpretar 33 pruebas de bombeo obtenidas en expedientes de constitución de derechos de aprovechamiento de aguas existentes en la Dirección General de Aguas. Los resultados de esas interpretaciones se adjuntan en la Tabla 2, donde se señala también el espesor de los acuíferos (H).

Tabla 2 Parámetros elásticos, revisión prueba de bombeos

ZONA	SECTOR	EXPEDIENTE	T (m ² /día)	k (m/s)	H (m)
Norte	Pelarco	ND-702-1224	170	5,50E-05	36
	Pencahue	ND-702-1376	171	6,80E-05	29
	Talca	ND-702-1381	1.589	4,60E-04	40
	Talca	ND-702-1386	207	8,00E-05	30
	Talca	ND-702-1388	49	1,60E-05	36,6
	Maule	ND-702-1436	240	5,10E-05	54,2
	Linares de Perales	ND-702-1375	113	3,20E-05	41
	Curtiduría	ND-702-957	1904	9,20E-04	24
	Paso Nevado	ND-702-1175	212	6,50E-05	38
	Porvenir (Molina)	ND-702-940	2178	3,20E-03	8
	San Rafael	ND-702-946	632	6,10E-04	12
Centro	Yerbas Buenas	ND-703-1212	514	2,00E-04	30,2
	Yerbas Buenas	ND-703-1372	449	1,40E-04	38
	Los Maitenes (Linares)	ND-703-1383	186	1,40E-04	15
	San Antonio Encina	ND-703-1208	100	6,40E-05	18
Sur	San Juan (Linares)	ND-703-904	1765	1,70E-03	12
	Colbún	ND-703-928	1067	1,00E-03	12,3
	Constitución	ND-702-1243	247	1,40E-04	21
	Piedra de Lobo	ND-702-1245	66	7,60E-04	1
	La Tercera (Longaví)	ND-703-1210	625	1,40E-04	52,2
	Retiro	ND-703-1217	30	1,80E-05	20
	Bodega	ND-703-1250	135	1,30E-04	12
	San Isidro (Retiro)	ND-703-1341	340	3,60E-04	11
	Llano las Piedras (Longaví)	ND-703-1369	863	2,00E-04	50
	San Gabriel (Linares)	ND-703-1371	39	4,50E-05	10
	Mesamávida	ND-703-1385	73	3,80E-05	22
	Higuerillas (Retiro)	ND-703-1421	287	1,20E-04	28
	Santa Inés (Retiro)	ND-703-1422	343	8,30E-05	48
	Maitenes (Retiro)	ND-703-1426	89	3,30E-05	31
	Marimaura	ND-703-1440	64	6,40E-05	11,5
	Santo Tomás (Retiro)	ND-703-964	340	2,80E-04	14
	El Tunal (Parral)	ND-703-1182	380	1,10E-04	39
Villa Reina (Parral)	ND-703-1425	795	2,30E-04	40	

Fuente: Bases plan director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Maule, diagnóstico (DGA, 2003)

3.4 Flujos Subterráneos

Como se indicó anteriormente, el movimiento del flujo de agua subterránea se realiza principalmente en la dirección de los cauces de los ríos y esteros, hasta drenar en cauces principales como el río Claro por el norte, el río Maule por el centro y el río Loncomilla por el sur. La Figura muestra las direcciones principales del flujo de agua subterránea.

De acuerdo a estos antecedentes, el caudal pasante subterráneo de salida de la cuenca puede ser estimado a partir de la sección de salida en el punto de confluencia entre los ríos

Claro y Maule, estimado con un largo de 3Km. Para ello, se utiliza la información de curvas equipotenciales y los valores locales de transividad señalados anteriormente. De acuerdo a esto, el flujo subterráneo se determina de la siguiente forma:

$$q_{SALIDA\ SUBT} = T \cdot i \cdot L$$

Donde T corresponde a la transmisividad del medio poroso en m²/día, i es el gradiente hidráulico y L es el ancho medio de la sección transversal al flujo en m.

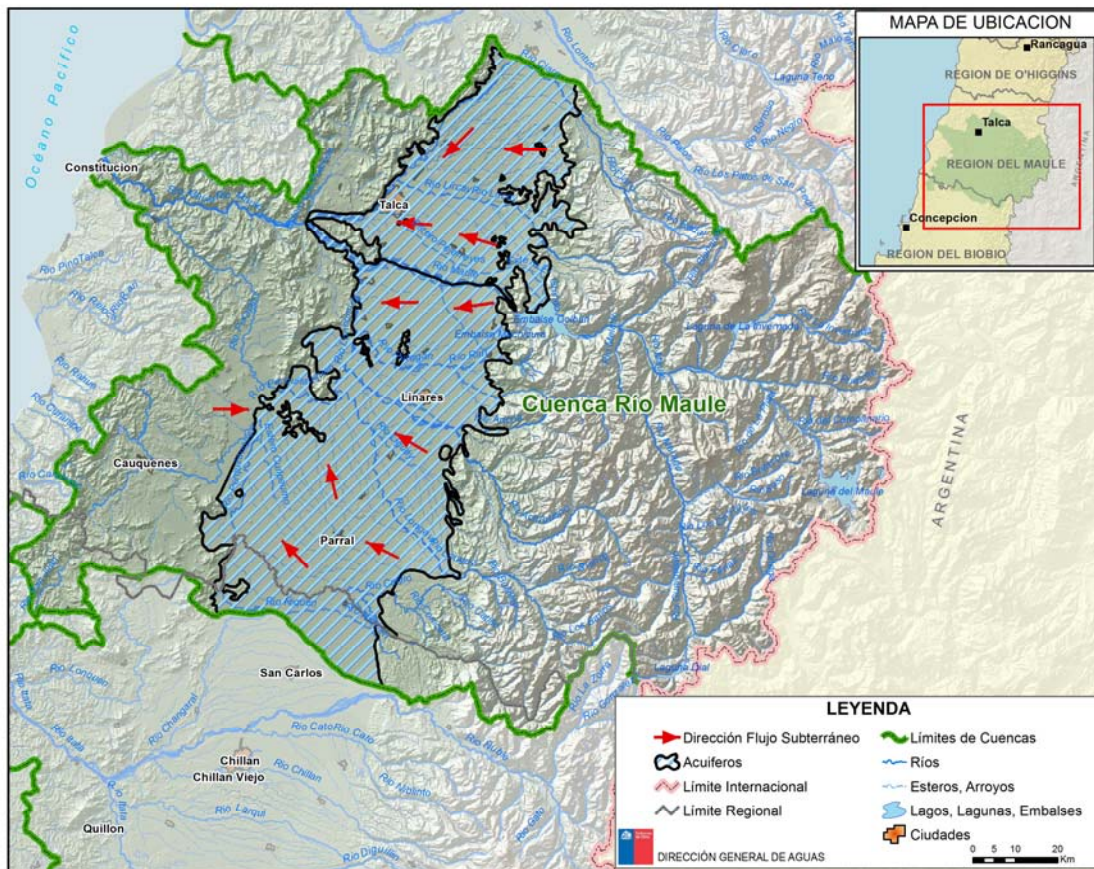
Por lo tanto, considerando una transmisividad asociada a lechos fluviales que varía entre 2000 y 5000 m²/día, y un gradiente hidráulico de 0.003, se tiene que el caudal subterráneo de salida por cada uno de los sectores es:

$$\text{Rio Claro: } q = 0.03472 \text{ m}^2/\text{s} * 0.003 * 2500 \text{ m} = 0.26 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Maule: } q = 0.04629 \text{ m}^2/\text{s} * 0.003 * 1500 \text{ m} = 0.21 \text{ m}^3/\text{s}$$

Finalmente, el flujo subterráneo total que sale por el área de estudio es estimado en 0.5 m³/s aproximadamente. Con ello es posible deducir que prácticamente todo el flujo pasante por el acuífero aflora antes de pasar por la sección de salida, aumentando el caudal superficial de salida de la cuenca.

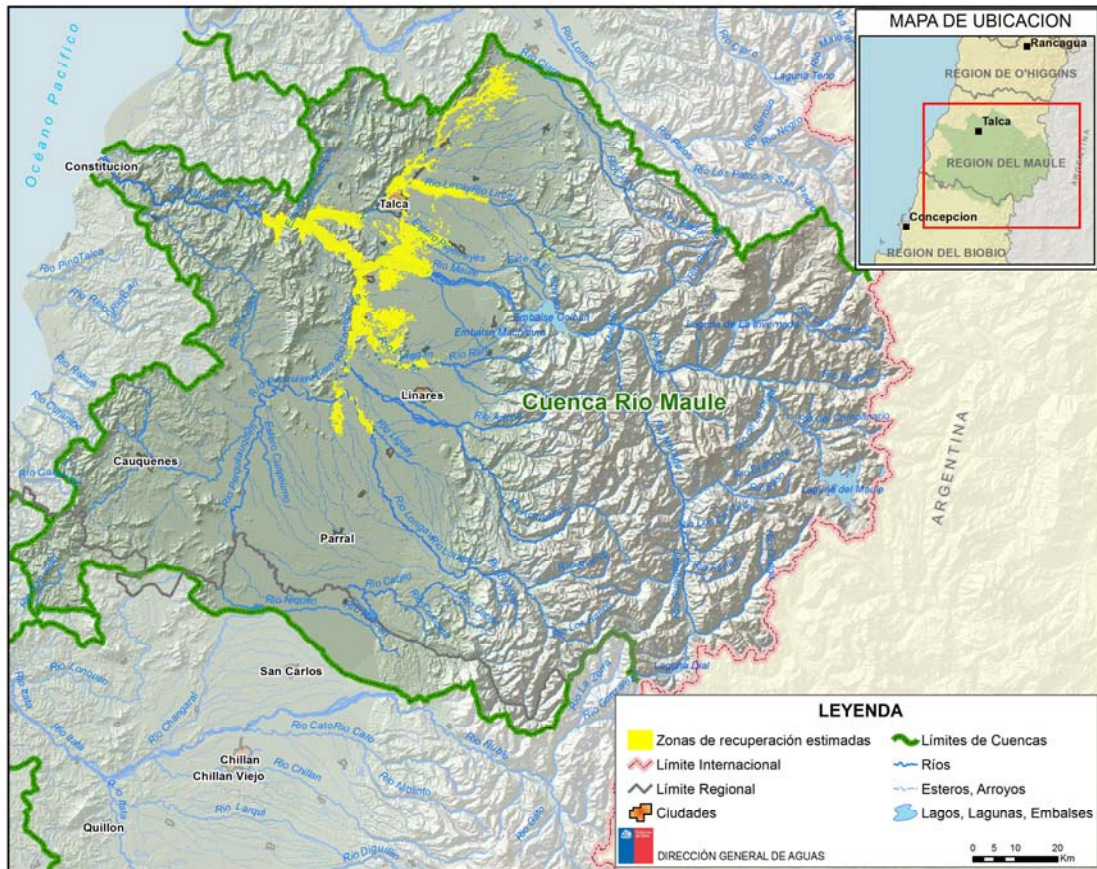
Figura 5. Flujo Subterráneo



3.5 Zonas de Recuperación

A partir de un análisis de los niveles de agua subterránea así como de la campaña de aforos realizada por la Dirección General de Aguas Región del Maule entre mayo y julio del 2011, es posible confirmar la existencia de potenciales zonas de afloramientos del acuífero en sectores situados en las cercanías de la Cordillera de la Costa. En particular, comparando el mapa de curvas equipotenciales y el modelo digital de elevación DEM, se observa niveles someros de agua subterránea en torno a los ríos Claro, Loncomilla y en las partes bajas de sus afluentes. El río Claro con dirección NE-SW y el río Loncomilla en dirección S-N y el río Maule por el centro, actuarían como las principales fuentes de drenaje de agua subterránea del sistema acuífero.

Figura 6. Zonas de Afloramiento de Aguas Subterráneas.



En consecuencia con lo anterior, el estudio Levantamiento de Información Hidrogeológica para Modelación Cuenca del Río Maule (DGA, 2010), determina los caudales de afloramiento por tramos de ríos, los que en promedio pueden aproximarse a valores del orden de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Claro, $20 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Loncomilla y $20 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Maule. La Tabla 3, muestra los valores de afloramiento en los diferentes tramos de río.

Tabla 3. Afloramientos definidos en estudio DGA 2010 (m³/s).

Tramo de Río	Afloramiento
río Claro aguas arriba río Lircay	3,2
río Claro entre ríos Lircay y Maule	5,3
río Maule aguas arriba río Loncomilla	16,1
río Maule entre Loncomilla y Claro	6,1
confluencia Loncomilla y Putagán	6,4
confluencia Loncomilla y Achibueno	3,7
confluencia Loncomilla y Longaví	9,9
TOTAL	50,7

4 DEMANDA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La demanda total por pozos es obtenida de la calibración del modelo de operación superficial MAGIC (DGA, 2007) en que para la simulación histórica se considera un promedio de extracción de 7 m³/s para los sectores de estudio. Cabe resaltar que en la modelación MAGIC de la cuenca del Maule, el criterio de uso de los pozos para riego es del tipo respaldo, es decir, los pozos operan cuando no existe agua superficial suficiente para satisfacer la demanda.

Este análisis considera que en promedio, 2,0 m³/s se utilizan para abastecer la demanda agrícola de la cuenca. La tabla 4 muestra la distribución de la demanda por aguas subterráneas para los acuíferos de interés.

Tabla 4. Demanda de aguas subterráneas.

Acuífero	Demanda de Riego m³/s	Demanda Otros Usos m³/s	Demanda Total m³/s
Maule Norte	1,8	0,7	2,5
Maule Sur	3,2	1,3	4,5
TOTAL	5,0	2,0	7,0

5 RECARGA NETA

Uno de los aspectos relevantes en la determinación del balance hídrico corresponde a la recarga del sistema, en este caso, como se trata de una evaluación preliminar, solo se enfocará en la determinación de la recarga neta, que es aquella que sale definitivamente del sistema ya sea por afloramiento o por bombeo. En el Maule es posible establecer un balance general, cuya recarga neta (R) proviene de los flujos subterráneos de entrada (Q_{ent}), recargas por riego (R_r), recargas por precipitación (R_{PP}), recargas por canales (R_{can}) y recargas por el lecho del río (R_{rio}), y se determinan a través de las salidas del sistema que se generan por las extracciones de pozos (B), los afloramientos (Af) y la salida subterránea por el Maule (Q_{sal}).

$$R = Q_{sal} + Af + B$$

Como una forma de simplificar la distribución de esta recarga neta en los sectores hidrogeológicos definidos Maule Norte y Maule Sur, se ha definido una metodología basada en una distribución proporcional a la superficie de riego contenida por cada sector hidrogeológico. Obteniéndose los resultados señalados en la Tabla 5, cuyos valores son semejantes y coherentes con afloramientos indicados en la Tabla 3.

Tabla 5. Recargas Netas por Sector Hidrogeológico.

Acuífero	Recarga Neta Total m3/s
Maule Norte	15
Maule Sur	43
TOTAL	58

6 BALANCE HÍDRICO PRELIMINAR

Finalmente, es posible obtener una estimación preliminar y conservador del balance hídrico global del acuífero definido, estableciendo las entradas y salidas del sistema hidrogeológico de la depresión intermedia.

De acuerdo a los análisis, un total de 58 m³/s corresponden a las recargas netas asociadas al riego, precipitación, canales y ríos de la cuenca. Las descargas corresponden a las extracciones por bombeo y a los afloramientos, que finalmente afloran generando parte de la componente del flujo base de los ríos Claro, Maule y Loncomilla.

Tabla 6. Balance Hídrico Preliminar del Acuífero del Maule

Componente	Entradas m3/s	Salidas m3/s
Recarga Maule Norte	15	-
Recarga Maule Sur	43	
Afloramientos	-	50
Caudal de Bombeo		7
Flujo Subterráneo		1
TOTAL	58	58

7 CONCLUSIONES

El presente informe ha permitido desarrollar un balance hídrico preliminar de tipo conceptual de las aguas subterráneas de la cuenca del río Maule, que permite establecer de forma conservadora volúmenes sustentables de explotación del acuífero, con el fin de avanzar en la resolución de solicitudes de derechos de aguas, y tener una base para la construcción de un modelo numérico.

Este trabajo permite concluir que el acuífero de la depresión intermedia del Maule, se encuentra en una situación estable, con niveles de agua subterránea que no presentan variaciones importantes, lo que se traduce en una importante recarga y extracciones reales bajas, que se estiman cercanas a los 7,0 m³/s.

Las descargas naturales del sistema acuífero del Maule, corresponden a los afloramientos de las aguas subterráneas en las partes bajas de los ríos Claro, Maule y Loncomilla. El flujo subterráneo de salida que ocurre en la confluencia de los ríos Claro y Maule, en una zona de estrechamiento, se estima inferior a 1m³/s. Esto último significa que casi toda la recarga del sistema termina en zonas de afloramiento.

Se han determinado dos grandes sectores hidrogeológicos, denominados Maule Norte y Maule Sur, los que han permitido establecer balances globales para el acuífero. La división de estos sectores hidrogeológicos corresponde al eje del río Maule.

Los resultados del balance hídrico preliminar muestran que para el acuífero de la depresión intermedia del río Maule, la recarga neta es de 58 m³/s. Por otra parte, la información del Catastro Público de Aguas (CPA) indica que los derechos constituidos ascienden aproximadamente a un total de 20 m³/s. La Tabla 7, define la situación de recarga neta y demanda comprometida para cada sector hidrogeológico definido en este informe.

Tabla 7. Situación de los Sectores Hidrogeológicos del Acuífero del Maule

Sector Hidrogeológico	Recarga Neta (m³/s)	Demanda Comprometida (m³/s)
Maule Norte	15	7
Maule Sur	43	13

Por lo tanto, de acuerdo a los valores obtenidos en este informe, se puede afirmar que los sectores hidrogeológicos denominados Maule Norte y Maule Sur se encuentran abiertos para la constitución de nuevos derechos de agua subterránea.