



Gobierno
de Chile

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

ANÁLISIS INTEGRADO RÍO LOA REGIÓN DE ANTOFAGASTA

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

KNIGHT PIÉSOLD S.A.

S.I.T. N° 339

Santiago, Mayo 2014

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Miguel Ángel Caro Hernández.

KNIGHT PIÉSOLD S.A.

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Félix Pérez Soto

Profesionales

Ingeniero Civil Julio Faúndes S.
Ingeniero Civil Jaime Vargas P.
Ingeniero Civil Felipe Orellana M.
Ingeniero Civil Marcelo Allende B.
Ingeniero Civil Sergio Duarte M.
Ingeniero Civil Andrea Morlans L.
Ingeniero Civil Francisco Chavarría V.
Ingeniero Civil Darío Vargas G.
Ingeniero Rodrigo Friz P.
Cartógrafo Lorena Torres M.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. GENERAL	1
1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	1
1.3. ALCANCE	1
2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES	3
3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	5
3.1. Caracterización Pluviométrica de la Cuenca del Río Loa	5
3.2. Caracterización Fluviométrica de la Cuenca del Río Loa	8
3.3. Estudio de Crecidas.....	10
3.4. Pérdidas y Recuperaciones	11
4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	14
4.1. Marco Geológico de la Cuenca del Río Loa	14
4.2. Marco Hidrogeológico de la Cuenca del Río Loa	14
4.2.1. Unidades Hidrogeológicas	14
4.2.2. Caracterización de los Niveles Subterráneos en la Cuenca del Río Loa	18
4.2.3. Parámetros Hidráulicos de los Acuíferos.....	19
5. SISTEMATIZACIÓN DE DERECHOS DE AGUA	22
5.1. Información de Derechos en DGA	22
5.2. Información de Derechos en CBR	23
6. LEVANTAMIENTO DE DEMANDAS Y CONSUMOS.....	25
7. MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE GLOBAL	27
7.1. Entradas del Sistema	27
7.1.1. Precipitación.....	27
7.1.2. Recarga y Escorrentía Total	27
7.2. Salidas del Sistema	28
7.2.1. Demandas Superficiales	28
7.2.2. Demandas Subterráneas.....	28
7.2.3. Evaporación Embalse Conchi	29
7.2.4. Evaporación desde Cauces Superficiales	29
7.2.5. Río Loa en Desembocadura	30
7.3. Interacciones del Sistema	30

7.3.1. Afloramientos y Recuperaciones	30
7.4. Balance Global de la Cuenca del Río Loa	31
8. DESARROLLO DEL MODELO INTEGRADO.....	33
8.1. Implementación Modelo Integrado en MAGIC	33
8.1.1. Elementos de la Cuenca Definidos en Modelo Integrado	33
8.1.2. Aportes desde Cuencas No Controladas	34
8.1.3. Acuíferos	35
8.1.4. Zonas de Riego	35
8.1.5. Embalse Conchi	36

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERAL

La Dirección General de Aguas (DGA) encargó a Knight Piésold (KP) el desarrollo del presente estudio, con el objeto de contar con un Modelo Hidrológico Integrado actualizado para la cuenca del río Loa, región de Antofagasta, que considere la modelación integrada de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, dada la interacción existente entre ambas fuentes.

Considerando el consenso general existente en torno a la situación precaria de los recursos hídricos en la cuenca del río Loa, dadas las condiciones desérticas y escasa precipitación, resulta necesario que la autoridad cuente con un modelo que le permita evaluar una administración adecuada y óptima de estos recursos. Más aún en una de las hoyas hidrográficas con mayor desarrollo minero del país y que posee la mayor parte de los derechos otorgados en la cuenca.

Dentro del contexto de este estudio, se han desarrollado para la DGA dos modelos numéricos implementados tanto en plataforma MAGIC como Visual MODFLOW que representan la dinámica de las aguas superficiales y subterráneas y su interacción.

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general del estudio fue desarrollar una herramienta flexible de análisis y planificación que permita evaluar situaciones de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Loa y sea una ayuda en la toma de decisiones relacionadas con la gestión y el aprovechamiento integral y multisectorial de estos recursos.

Los objetivos específicos, en tanto, fueron los siguientes:

- Disponer de una herramienta computacional, moderna, amigable e interactiva para la operación y evaluación, que en consecuencia permita una evaluación integral de los recursos hídricos (superficiales y subterráneos), desde el punto de vista hídrico, donde el manejo de datos (entrada o actualización de ellos) y de los archivos resultados sean de fácil interpretación y análisis.
- Actualizar la oferta hídrica de la cuenca.
- Actualizar las demandas hídricas del sistema: extracciones de agua superficial y subterránea (uso real y demanda legal vigente) y demanda evapotranspirativa.
- Evaluar y cuantificar las recargas al sistema acuífero, de forma de poder estimar con mejor precisión las explotaciones y extracciones sustentables, temporal y espacialmente.

1.3. ALCANCE

El presente estudio se enfocó principalmente en la implementación del modelo integral utilizando las plataformas computacionales MAGIC (Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas) y Visual MODFLOW.

El modelo integrado desarrollado en este estudio, fue calibrado y validado con información recopilada en las distintas fuentes de información, así como también la obtenida en los trabajos de terreno y la experiencia de este consultor. Este modelo simula

condiciones medias mensuales, con un horizonte de modelación que contempla los años hidrológicos 1975 a 2012.

En el caso del modelo subterráneo MODFLOW se realizó una calibración en régimen permanente del modelo numérico del acuífero de Loa-Calama desarrollado para el estudio "Modelación Acuífero de Calama, sector medio de la cuenca del Loa, Región de Antofagasta", utilizando la información recopilada en el catastro de uso real del agua, recargas del modelo superficial, e información proporcionada por la DGA.

2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Para el desarrollo del estudio se recopilaron una serie de antecedentes relacionados con los recursos hídricos de la cuenca del río Loa, los que se revisaron en profundidad con motivo de la realización del presente informe. Parte de estos antecedentes fueron estudios facilitados por la DGA mientras que otros se obtuvieron desde entidades como el INE, CODELOC, CORFO, etc. Por otro lado, la DGA facilitó también información estadística del tipo hidrológica, principalmente datos de caudales y precipitaciones en estaciones hidrometeorológicas, junto con registros de niveles subterráneos medidos en pozos de observación que forman parte de la red de monitoreo hidrogeológico, caudales y volúmenes diarios de las principales captaciones superficiales de ADASA, CODELCO, FCAB y SQM (Enero a Marzo 2011).

Asimismo se obtuvo el volumen acumulado en el Embalse Conchi, de manera semestral y con información desde el año 2004, proporcionado a través de la página web de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

En el Cuadro 2.1-1, se presentan un resumen de los antecedentes más relevantes consultados.

Cuadro 2.1-1 Resumen de Antecedentes

Estudio	Antecedente Aportante
Proyecto CHI-535: Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande. CORFO, 1977.	<ul style="list-style-type: none"> • Información geológica e hidrogeológica generada para los sectores de Ojos de San Pedro y Turi. • Datos litológicos y estratigráficos de pozos construidos en los sectores. • Parámetros hidrogeológicos estimados de pruebas de bombeo.
Estudio de la Hidrología del Alto Loa: Contrato N° 218412-021. Agua Ingenieros Consultores, 1987.	<ul style="list-style-type: none"> • Información geológica e hidrogeológica de la cuenca del río San Pedro de Inacaliri. • Parámetros hidrogeológicos estimados de pruebas de bombeo. • Caudales subterráneos entrantes y salientes del área de estudio. • Volumen de agua subterránea embalsada.
Análisis de la Oferta y Demanda de Recursos Hídricos en Cuencas Críticas de Loa, Rapel y Mataquito. Figueredo Ferraz Consultoría e Ingeniería de Proyecto. 1996.	<ul style="list-style-type: none"> • Información de demandas y disponibilidad de recursos hídricos. • Infraestructura de canales. • Derechos superficiales constituidos. • Caudales máximos de explotación. • Diagrama unifilar de la red hídrica del río Loa.
Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa. MOP, 2003.	<ul style="list-style-type: none"> • Información geológica general a nivel cuenca. • Modelo hidrogeológico en sector de Calama • Balance hidrológico en régimen natural a nivel cuenca. • Información de derechos superficiales y subterráneos. • Estimación de factores de uso para riego, agua potable, y minería.
Censo Nacional Agropecuario y Forestal. INE, <i>Varios Años</i> .	<ul style="list-style-type: none"> • Superficies de cultivo, clasificadas por tipo de cultivo y comuna.
Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda., 2007.	<ul style="list-style-type: none"> • Datos de evapotranspiración, usos de suelo, coeficientes de cultivos. • Demandas asociadas al uso de agua potable.

Cuadro 2.1-1 Resumen de Antecedentes

Estudio	Antecedente Aportante
	<ul style="list-style-type: none"> • Consumos de agua dentro del sector minero. • Descargas de aguas servidas en Calama. • Estimación del caudal ecológico para tramos de principales cauces superficiales de la cuenca.
Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. Pramar Ambiental Consultores, 2008.	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización hidrogeológica sector Salar de Llamara. • Modelo conceptual y numérico. • Parámetros hidrogeológicos estimados de pruebas de bombeo. • Cuantificación de recarga y descargas del acuífero.
Resumen de los Resultados del Desarrollo y Aplicación de un Modelo de Flujo de Agua Subterránea en la Cuenca del Río Loa. Minera El Tesoro – Montgomery & Associates, 2009.	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción hidrogeológica de la cuenca de Calama. • Modelo conceptual y numérico. • Niveles freáticos y piezométricos obtenidos de la modelación.
Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO – Knight Piésold, 2010.	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización geológica e hidrogeológica del sector de Calama. • Parámetros hidrogeológicos estimados para unidades acuíferas. • Modelo conceptual y numérico.
Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores, 2012.	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización de los recursos hídricos superficiales y subterráneos: análisis de datos pluviométricos y fluviométricos. • Estimación de demandas hídricas por uso: minería, industria, riego, etc. • Diagnóstico de capacidad y cobertura de infraestructura hídrica: catastro de canales, infraestructuras de regulación, etc.
Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. DGA – Matraz, 2012.	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción geológica e hidrogeológica. • Rangos de parámetros hidrogeológicos en unidades acuíferas desde estudios. • Modelo conceptual y numérico del acuífero de Calama.
Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. DGA - Mayco Consultores, 2013.	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización hidrogeológica de 4 sectores: Pampa Puno, Polapi, San Pedro de Inacaliri y Llalqui. • Niveles freáticos, parámetros elásticos del acuífero, valores de recargas y descargas del acuífero, volumen almacenado, etc.
Información DGA	<ul style="list-style-type: none"> • Información SIG de elementos a nivel cuenca. • Estadística pluviométrica y fluviométrica. • Caudales y volúmenes diarios para captaciones superficiales de ADASA, CODELCO, FCAB y SQM. • Derechos otorgados superficiales y subterráneos. • Niveles subterráneos en pozos DGA.
Información DOH	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen acumulado Embalse Conchi

Fuente: Elaboración propia.

3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

En este capítulo se analizó básicamente la información pluviométrica y fluviométrica disponible para la cuenca del río Loa, además de incluir un estudio de crecidas y un análisis de pérdidas y recuperaciones de agua en los cauces de la zona de interés.

3.1. Caracterización Pluviométrica de la Cuenca del Río Loa

La caracterización pluviométrica consistió en el análisis de la estadística pluviométrica proveniente de los registros históricos de lluvias mensuales facilitados por la DGA correspondientes tanto a estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del Loa como de cuencas vecinas. Esta información pluviométrica fue rellenada y extendida al período de modelación considerado (1974 – 2012). Análogamente, se elaboraron curvas de variación estacional considerando distintas probabilidades de excedencia, así como también curvas isoyetas de precipitación media anual con probabilidad de excedencia de 50%.

Las estaciones meteorológicas utilizadas en la estadística de precipitaciones se presentan en el Cuadro 3.1-1, mientras que las curvas isoyetas obtenidas se muestran en la Figura 3.1-1.

**CUADRO 3.1-1
ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS**

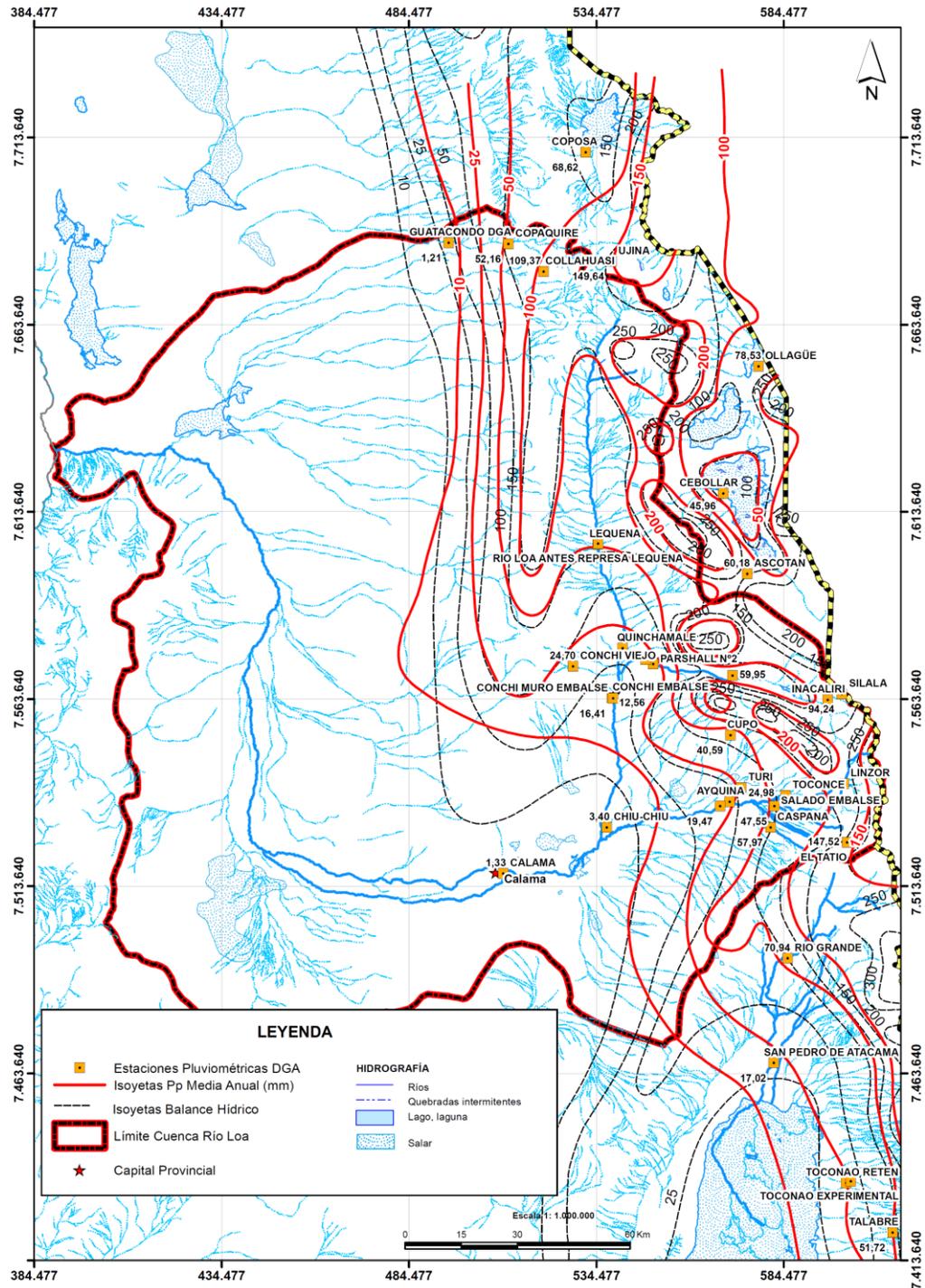
Nº	Estación	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Altura (m s. n. m.)	PP Media Anual (mm)
1	Ayquina	570.021	7.536.159	3.031	41,2
2	Calama	509.626	7.517.036	2.300	4,3
3	Caspana	580.918	7.529.311	3.260	82,2
4	Chiu-chiu	537.208	7.529.354	2.524	5,8
5	Conchi Embalse	538.581	7.563.972	3.010	20,4
6	Conchi Muro Embalse	538.925	7.563.787	3.000	20,8
7	Conchi Viejo	528.304	7.572.296	3.491	40,8
8	Cupo	570.273	7.553.931	3.370	73,2
9	El Tatio	601.377	7.525.377	4.370	156,2
10	Inacaliri	596.177	7.563.418	4.040	128,9
11	Lequena	534.858	7.604.905	3.320	94,1
12	Linzor	600.506	7.541.035	4.100	180,3
13	Ojos de San Pedro	570.746	7.569.887	3.800	63,2
14	Parshall Nº2	549.619	7.573.043	3.318	29,0
15	Quillagua	444.352	7.604.294	802	0,2
16	Quinchamale	541.483	7.577.217	3.080	27,1
17	Río Loa antes Represa Lequena	534.949	7.605.229	3.315	68,1

**CUADRO 3.1-1
ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS**

Nº	Estación	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Altura (m s. n. m.)	PP Media Anual (mm)
18	Río Salado en Sifón Ayquina	567.487	7.534.983	2.980	27,1
19	Salado Embalse	581.921	7.534.963	3.200	75,1
20	San Pedro de Conchi	547.672	7.574.094	3.217	37,7
21	Silala	600.028	7.564.931	4.305	88,9
22	Toconce	584.970	7.537.868	3.310	91,8
23	Turi	573.159	7.539.958	3.070	37,2
24	Collahuasi	520.379	7.677.884	4.250	162,3
25	Copaquire	511.000	7.685.179	3.540	84,4
26	Guatacondo DGA	495.056	7.685.520	2.460	22,9
27	San Pedro de Atacama	581.811	7.466.358	2.450	27,6
28	Ujina	538.515	7.680.588	4.300	171,5
29	Coposa	531.640	7.709.684	3.760	92,9
30	Ollague	577.684	7.652.565	3.700	89,7
31	Cebollar	568.288	7.618.540	3.730	60,0
32	Ascotan	574.717	7.597.020	3.970	72,3
33	Baquadano	414.151	7.419.265	1.032	1,3
34	Antofagasta	358.307	7.389.264	50	3,1
35	Toconao Reten	601.168	7.434.317	2.460	41,1
36	Toconao Experimental	602.365	7.434.832	2.500	34,3
37	Camar	605.746	7.410.665	2.700	32,9
38	Socaire	612.802	7.390.681	3.251	39,3
39	Peine	595.837	7.380.038	2.460	19,8
40	Talabre	613.518	7.421.064	3.300	66,4
41	Río Grande	585.501	7.494.353	3.250	76,3

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la DGA.

FIGURA 3.1-1
CURVAS ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y PROBABILIDAD 50%



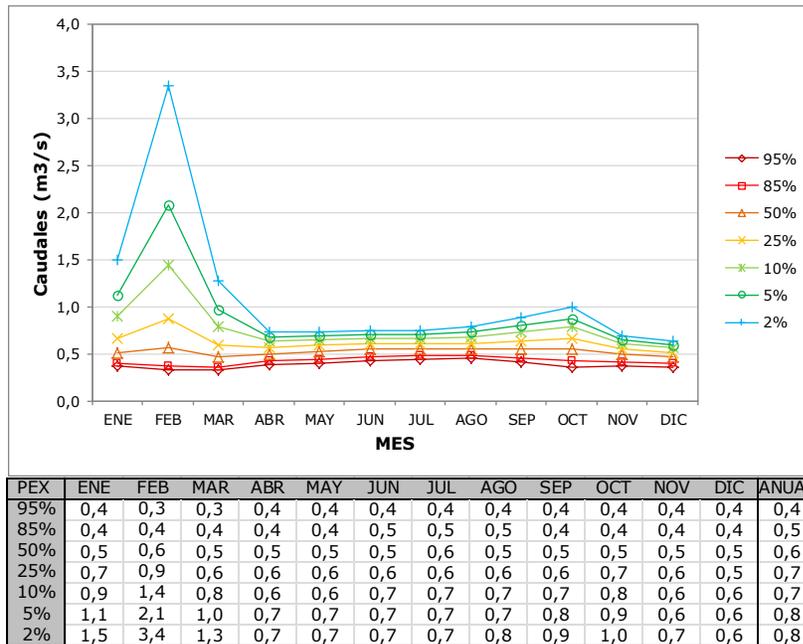
Fuente: Elaboración propia.

3.2. Caracterización Fluviométrica de la Cuenca del Río Loa

En este capítulo se analizó principalmente la información de caudales disponibles para la cuenca de estudio en las respectivas estaciones fluviométricas de propiedad de la DGA. En concreto, se trabajó con los registros de caudales medios mensuales, cuya estadística tuvo que ser rellenada a través de correlaciones mensuales entre estaciones. Por otro lado, se determinaron curvas de variación estacional de los caudales para distintas probabilidades de excedencia.

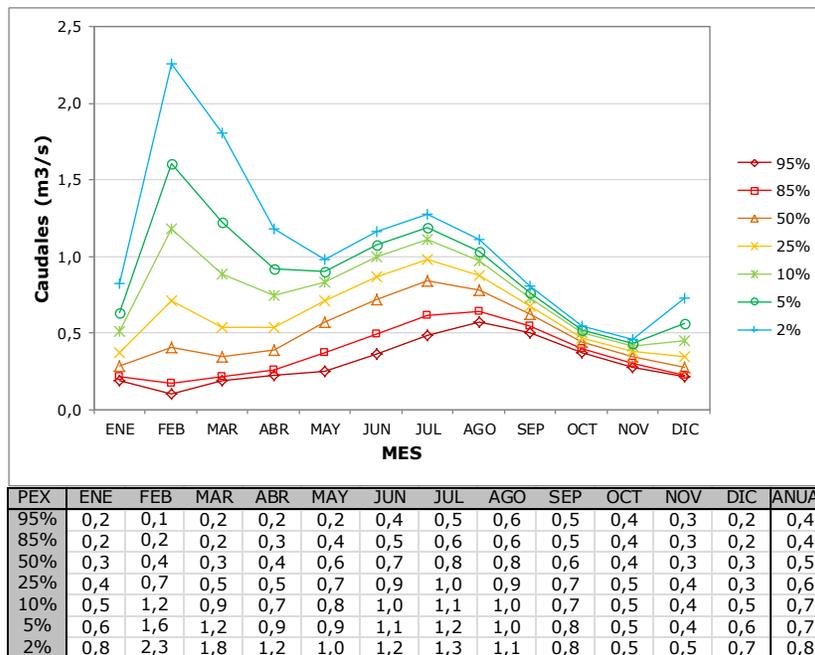
Las estaciones fluviométricas consideradas se presentan en el Cuadro 3.2-1, mientras que en las Figuras 3.2-1 a 3.2-4, se muestran algunas curvas de variación estacional estimadas donde se observa el marcado régimen pluvial que se concentra entre los meses de Febrero y Marzo.

**FIGURA 3.2-1
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO LOA ANTES REPRESA LEQUENA**



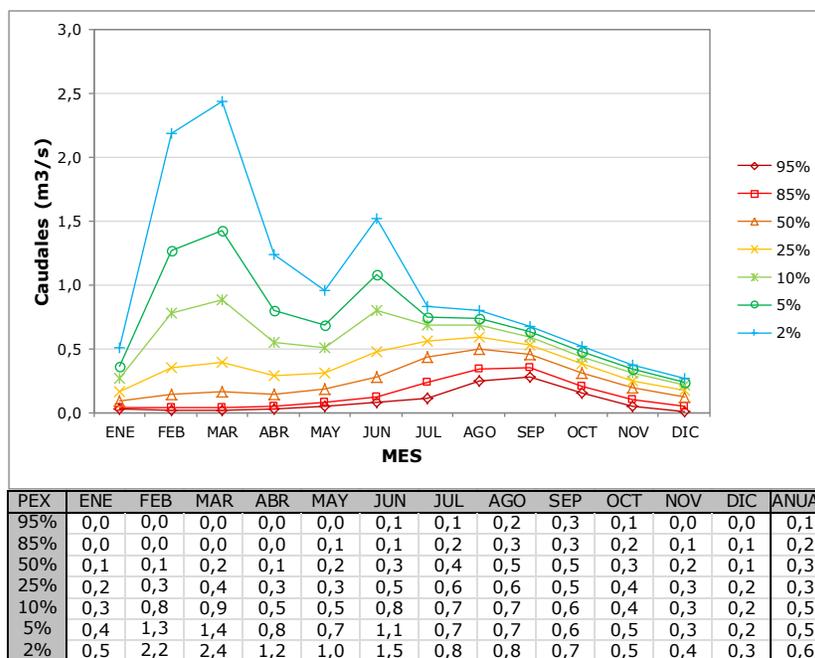
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3.2-2
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO LOA DESPUES DE LA JUNTA SAN SALVADOR (M. ELENA)



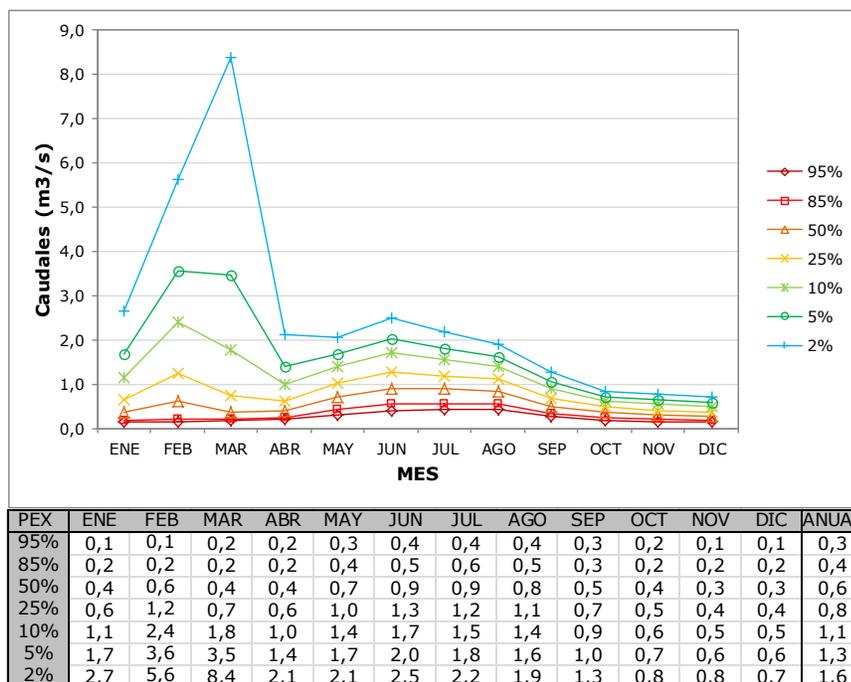
Fuente: Elaboración propia

FIGURA 3.2-34
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO LOA EN DESEMBOCADURA



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 3.4-5
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO LOA EN FINCA



Fuente: Elaboración propia

3.3. Estudio de Crecidas

Se llevó a cabo un análisis de crecidas en base a la información de caudales instantáneos máximos registrados por la DGA. Dado el nivel de datos disponibles, el estudio de crecidas se enfocó principalmente en la estimación de dichos caudales para diferentes períodos de retorno mediante análisis de frecuencia de la información.

De acuerdo, a la estadística DGA de caudales máximos instantáneos se desprende que los valores máximos ocurren durante el período de verano, específicamente entre los meses de Diciembre y Marzo, dada la presencia de eventos de lluvia generados por el fenómeno del Invierno Altiplánico.

Finalmente el análisis de frecuencia arrojó que las distribuciones de probabilidad Gumbel y Gamma eran las más adecuadas, y los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 3.3-1 para los períodos de retorno de 100, 200, 500 y 1.000 y 10.000 años.

CUADRO 3.3-1
ANÁLISIS DE FRECUENCIA CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS ANUALES

Años	P Exc (%)	Río Loa Antes Represa Lequena	Río San Pedro en Parsall N°1	Río San Pedro en Parsall N°2	Río Loa en Salida Embalse Conchi	Río Loa en Alcantarilla Conchi N°2	Río Salado en A. J. Curtis	Río Salado en Sifón Ayquina	Río Toconce antes Represa Sendo
		Gamma	Gumbel	Gamma	Gumbel	Gumbel	Gamma	Gumbel	Gumbel
100	1,0	38,39	2,54	2,14	20,45	128,55	148,18	141,98	41,44
200	0,5	44,19	2,72	2,25	23,26	147,17	176,42	162,51	47,32
500	0,2	51,86	2,96	2,39	26,97	171,73	214,36	189,58	55,08
1.000	0,1	57,67	3,14	2,49	29,77	190,29	243,41	210,04	60,94
10.000	0,01	76,95	3,74	2,81	39,08	251,92	341,49	277,97	80,42

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Pérdidas y Recuperaciones

En este acápite se analizaron las pérdidas y recuperaciones de agua en los cauces del río Loa, en función de los registros de aforos sistemáticos proporcionados por la DGA. La metodología empleada consistió en la definición de tramos con registros de aforos coincidentes y que la comparación de estos fueran realizados durante el mismo día en dicho tramo, para así asegurar que las condiciones del cauce no sufrieran variaciones durante el aforo. Además para dicho análisis, se consideraron las principales extracciones superficiales identificadas en cada uno de los tramos de interés (Aguas Antofagasta, CODELCO, SQM y FACB).

Los tramos de análisis definidos, se presentan en el Cuadro 3.4-1, en tanto que los resultados a nivel mensual se adjuntan en el Cuadro 3.4-2, donde los valores, positivos representan aumento de caudal en el tramo, mientras que los valores negativos representan pérdidas.

**CUADRO 3.4-1
TRAMOS SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS**

Río Loa
Lequena - Quinchamale
Yalquincha - Escorial
Escorial - Finca
Loa Chacance - Loa María Elena
Loa Quillagua - Loa Panamericana
Río San Pedro
Siloli FCAB - Siloli Inacaliri
Parshall 1 - Parshall 2
Parshall 2 - Camino Internacional
Río Salado
Salado Curti - Salado Ayquina
Salado Ayquina - Salado Loa

Fuente: Elaboración propia.

**CUADRO 3.4-2
RESULTADOS ANÁLISIS AFOROS (m³/s)**

Mes	Lequena - Quinchamale	Parshall 1 - Parshall 2	Parshall 2 - Camino Internacional	Siloli FCAB - Siloli Inacaliri	Salado Curti - Salado Ayquina	Salado Ayquina - Salado Loa	Yalquincha - Escorial	Escorial - Finca	Loa Chacance - Loa María Elena	Loa Quillagua - Loa Panamericana
Ene	-4,18	0,01	-0,84	-0,03	0,26	-0,13	-0,17	-0,98	-0,10	0,07
Feb	0,16	0,00	-0,82	-0,03	0,32	-0,10	-0,50	-0,78	-0,11	0,05
Mar	0,22	-0,03	-0,82	-0,02	0,32	0,00	-0,23	-1,14	-0,09	0,06
Abr	0,16	-0,18	-0,81	-0,02	0,27	0,06	-0,18	-0,78	-0,09	0,11
May	0,04	-0,02	-0,79	-0,03	0,28	0,05	-0,46	-0,25	-0,11	0,05
Jun	-	0,00	-0,76	-0,03	0,31	0,12	-0,22	-0,46	-0,11	0,07
Jul	-	0,00	-0,81	-0,02	0,31	0,08	-0,29	-0,34	-0,09	0,10
Ago	-	-0,03	-0,81	-0,02	0,29	0,08	-0,18	-0,57	-0,12	0,04
Sep	0,09	-0,01	-0,76	-0,04	0,27	0,03	-	-0,79	-0,09	0,10
Oct	0,10	0,00	-0,80	-0,03	0,24	-0,01	-0,17	-0,86	-0,10	0,09

CUADRO 3.4-2
RESULTADOS ANÁLISIS AFOROS (m³/s)

Mes	Lequena - Quinchamale	Parshall 1 - Parshall 2	Parshall 2 - Camino Internacional	Siloli FCAB - Siloli Inacaliri	Salado Curti - Salado Ayquina	Salado Ayquina - Salado Loa	Yalquincha - Escorial	Escorial - Finca	Loa Chacance - Loa María Elena	Loa Quillagua - Loa Panamericana
Nov	-	-0,02	-0,78	-0,04	0,23	0,03	-0,14	-0,96	-0,10	0,07
Dic	0,29	-0,01	-0,78	-0,05	0,23	0,01	0,03	-0,96	-0,09	0,09
Prom	0,15	-0,03	-0,80	-0,03	0,28	0,02	-0,23	-0,74	-0,10	0,07

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El valor destacado no fue utilizado en el cálculo del valor promedio.

4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Este capítulo se realizó una caracterización subterránea que consideró para su elaboración, tanto un marco geológico como geomorfológico de la cuenca del río Loa, junto con la definición de sus unidades principales, zonas de interés hidrogeológico, estimación cuantitativa de parámetros hidráulicos del acuífero y niveles subterráneos.

4.1. Marco Geológico de la Cuenca del Río Loa

En la Figura 4.1-1, se muestra un Mapa Geológico a escala cuenca, obtenido del estudio elaborado por la DGA en 2003 ("Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa. SIT N°85"), a partir del cual junto con otros antecedentes se obtuvo la caracterización geológica de la cuenca de interés. Esta caracterización fue abordada desde un punto de vista más macro y de cuenca, la cual permitió la identificación y descripción de 4 grandes series geológicas:

- Formación porfirítica.
- Formación liparítica o riolítica.
- La Calizas del Loa o Formación El Loa.
- Las Andesitas y Basaltos.
- Formación Chiu Chiu.
- Formación Toconce.

4.2. Marco Hidrogeológico de la Cuenca del Río Loa

El marco hidrogeológico de la cuenca del Loa, se abordó considerando una sectorización de ésta en 3 sectores de interés:

- Sector Loa Alto (Nacimiento río Loa hasta aguas abajo de su confluencia con el río Salado, incluyendo las cuencas completas de los ríos San Pedro Inacaliri y Salado).
- Sector Loa Medio (Río Loa desde aguas debajo de confluencia con el río Salado hasta confluencia con río San Salvador).
- Sector Loa Bajo (Río Loa desde junta con río San Salvador hasta desembocadura).

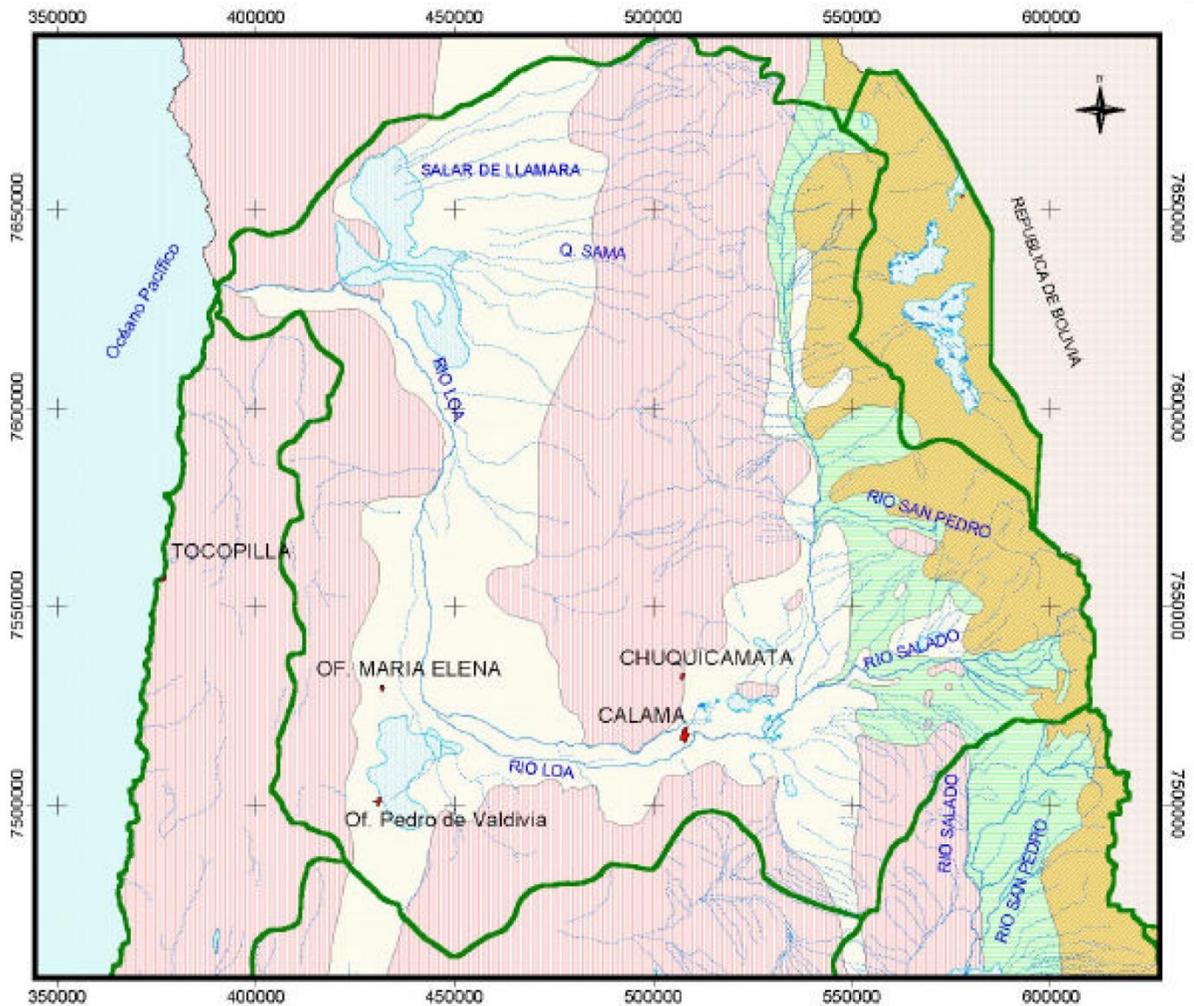
En la Figura 4.2-1, se muestra la sectorización hidrogeológica, no necesariamente coincidente con la zonificación adoptada por la DGA para las subcuencas hidrológicas del río Loa. En particular el sector hidrogeológico aquí definido como Loa Bajo no es el mismo de la subcuenca hidrológica Loa Bajo (entre quebrada Amarga y desembocadura).

4.2.1. Unidades Hidrogeológicas

- Sector Loa Alto:

De acuerdo a los estudios Proyecto CHI-535 elaborado por la CORFO en 1977, el Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa desarrollado por CODELCO-Agua Ingenieros Consultores en 1987 y Levantamiento Información Hidrogeológica desarrollado por MAYCO Consultores, sólo existe información para los sectores de Ojos de San Pedro, Turi, Pampa Puno y Polapi.

**FIGURA 4.1-1
MAPA GEOLÓGICO DGA (2003)**

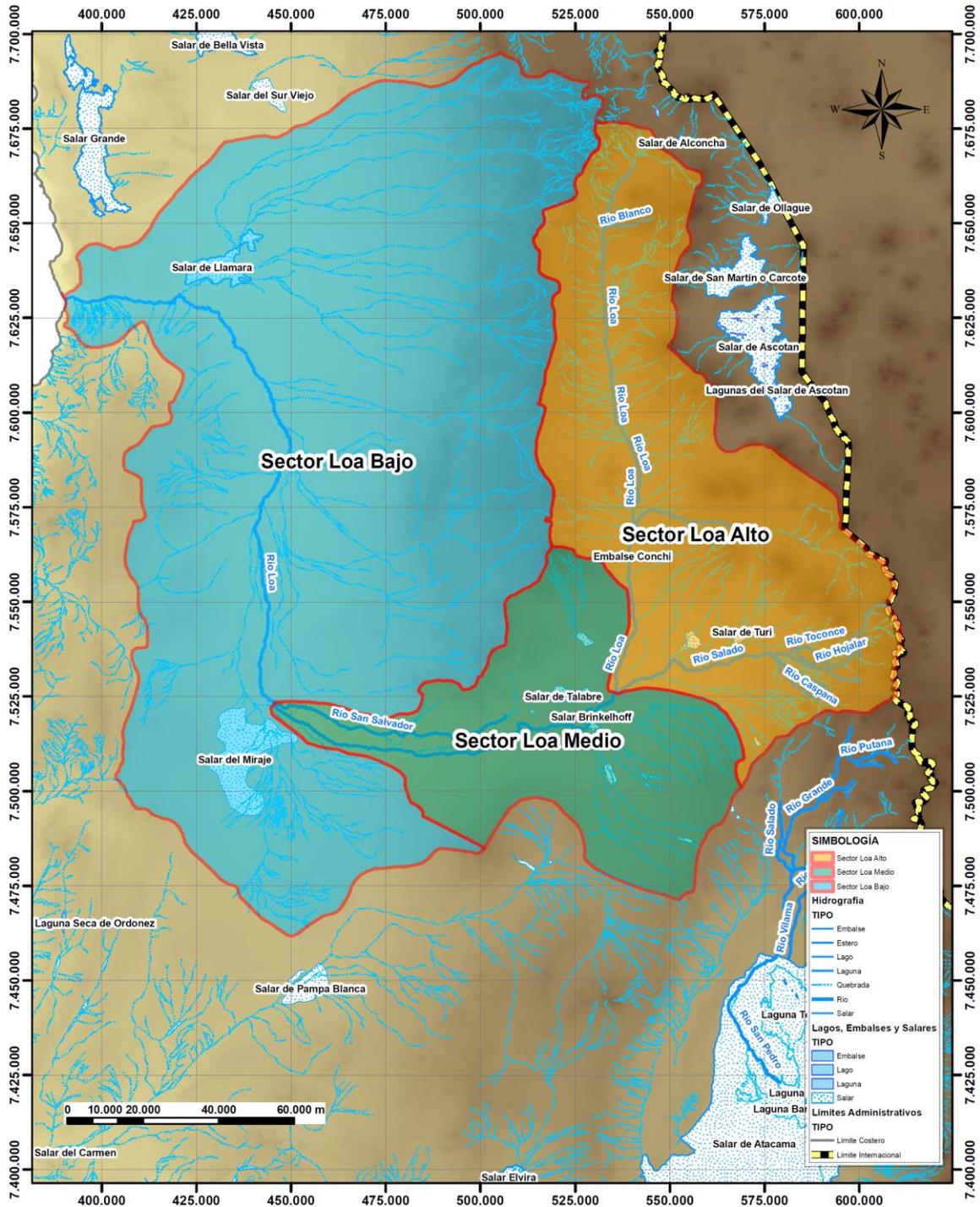


MAPA GEOLÓGICO



Fuente: Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa. DGA (2003).

FIGURA 4.2-1
SECTORIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA CUENCA RÍO LOA



Fuente: Elaboración propia.

En el caso del sector de Ojos de San Pedro en la subcuenca del río San Pedro de Inacaliri, se tienen las siguientes unidades hidrogeológicas:

1. Unidad 1: Sedimentos No Consolidados.
2. Unidad 2: Rocas Volcánicas.
3. Unidad 3: Basamento de Rocas Intrusivas

En el sector de Turi, de la subcuenca del río Salado, se identifican las siguientes unidades hidrogeológicas:

1. Unidad 1: Rocas Volcánicas.
2. Unidad 2: Sedimentos No Consolidados.
3. Unidad 3: Basamento de Rocas Intrusivas.

Por otro lado en el sector de Pampa Puno se detectan las siguientes unidades hidrogeológicas:

1. Unidad 1: Ignimbritas.
2. Unidad 2: Sedimentaria.
3. Unidad 3: Roca de Basamento.

En el sector de Polapi se tienen las siguientes unidades hidrogeológicas:

1. Unidad 1: Arenas y gravas en matriz limo-arcillosa.
2. Unidad 2: Coladas de lavas.
3. Unidad 3: Tobas riolíticas y dacíticas.
4. Unidad 4: Arenas gruesas y gravas con matriz arenosa.
5. Unidad 5: Basamento.

- Sector Loa Medio:

Conforme a lo señalado en los estudios Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa elaborado por MATRAZ en 2012 y Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales desarrollado por Knight Piésold en 2010, se definieron 6 unidades hidrogeológicas para el acuífero de Calama:

1. Unidad 1: Depósitos Aluvio-Evaporíticos
2. Unidad 2: Acuífero Superior Cárstico-Detrítico El Loa.
3. Unidad 3: Acuitardo Ignimbrítico.
4. Unidad 4: Acuitardo Detrítico El Loa.
5. Unidad 5: Acuífero Inferior Gravas de Calama.
6. Unidad 6: Basamento.

- Sector Loa Bajo:

En base a la información proporcionada por el estudio EIA Proyecto Pampa Hermosa, Anexo VIII Hidrogeología elaborado por DICTUC-Pramar Ambiental Consultores en 2007, se identificaron 5 unidades hidrogeológicas en el sector de Salar de Llamara:

1. Unidad 1: Basamento.
2. Unidad 2: Sedimentos Terciarios Semi-Permeables.

3. Unidad 3: Depósitos Aluviales y Fluvio-Lacustres.
4. Unidad 4: Evaporitas.
5. Unidad 5: Depósitos Aluviales Recientes.

4.2.2. Caracterización de los Niveles Subterráneos en la Cuenca del Río Loa

Para la caracterización de los niveles subterráneos históricos y actuales de la cuenca del río Loa, se recurrió a la información de niveles estáticos proporcionada por la DGA en 8 pozos de su propiedad distribuidos principalmente en los sectores de Calama y Turi (sectores Medio y Alto). Para el resto de los sectores de la cuenca se utilizaron el Proyecto CHI-535, Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa, Anexo VIII Hidrogeología del EIA de Pampa Hermosa, Estudios de CODELCO y Minera El Tesoro.

En el Cuadro 4.2-1, se presenta un resumen con la información de niveles subterráneos registrados en pozos de observación, que fueron recopilados tanto de estudios como de los mismos datos facilitados por la DGA.

**CUADRO 4.2-1
POZOS EN CUENCA DEL RÍO LOA CON REGISTROS DE NIVELES SUBTERRÁNEOS**

Pozo	Sector Hidrogeo.	Código BNA	Coordenadas UTM: WGS-84		Período Registro		Fuente
			Norte (m)	Este (m)	Inicio	Término	
CHU-1(O)	Loa Alto	N/A	7.568.598	579.945	18-10-1985	20-01-1987	1
CHU-2(B)	Loa Alto	N/A	7.563.703	589.206	25-11-1985	20-01-1987	1
CHU-5(B)	Loa Alto	N/A	7.570.074	565.339	18-10-1985	20-01-1987	1
CHU-6(B)	Loa Alto	N/A	7.562.783	572.583	06-03-1986	20-01-1987	1
CHU-9(O)	Loa Alto	N/A	7.574.571	577.982	02-01-1986	20-01-1987	1
B-1(B)	Loa Alto	N/A	7.568.283	574.147	18-10-1985	20-01-1987	1
B-2(B)	Loa Alto	N/A	7.571.313	574.963	18-10-1985	20-01-1987	1
B-4(B)	Loa Alto	N/A	7.568.265	571.365	24-10-1985	20-01-1987	1
Turi 2	Loa Alto	02105030-K	7.540.074	571.645	14-05-1987	12-09-2013	2
Turi 7	Loa Alto	02105028-8	7.540.459	574.796	14-05-1987	12-09-2013	2
Chiu Chiu	Loa Alto	02105023-7	7.529.945	541.477	14-05-1987	12-09-2013	2
Turi 10	Loa Alto	02105032-6	7.541.866	569.850	14-05-1987	12-09-2013	2
Cupo 1	Loa Alto	02105024-5	7.534.486	562.663	14-05-1987	12-09-2013	2
Isla Grande 3	Loa Alto	02110019-6	7.526.542	537.664	14-05-1987	12-09-2013	2
Turi 1	Loa Alto	02105025-3	7.538.983	568.263	14-05-1987	12-09-2013	2
SI-10C	Loa Medio	N/A	7.533.239	523.599	30-07-2004	21-10-2009	3
CHU-48	Loa Medio	N/A	7.526.712	509.484	21-01-2003	05-10-2009	3
SI-11E	Loa Medio	N/A	7.527.219	515.254	17-07-2003	09-10-2009	3
SI-33E	Loa Medio	N/A	7.519.660	519.768	31-07-2004	23-10-2009	3
TL-36C	Loa Medio	N/A	7.515.843	528.009	07-02-2005	21-10-2009	3

CUADRO 4.2-1
POZOS EN CUENCA DEL RÍO LOA CON REGISTROS DE NIVELES SUBTERRÁNEOS

Pozo	Sector Hidrogeo.	Código BNA	Coordenadas UTM: WGS-84		Período Registro		Fuente
			Norte (m)	Este (m)	Inicio	Término	
CHUCA-7B	Loa Medio	N/A	7.515.684	508.020	23-05-2003	07-10-2009	3
LE-2	Loa Medio	N/A	7.516.805	503.121	09-05-1993	28-03-2009	4
PPR-4	Loa Medio	N/A	7.514.707	503.867	22-05-1993	28-03-2009	4
Aeropuerto	Loa Medio	02110017-K	7.510.760	514.250	14-05-1987	12-12-2007	2
PO-2	Loa Bajo	N/A	7.659.857	434.197	10-11-2005	28-12-2011	5
PO-3	Loa Bajo	N/A	7.658.533	434.580	10-11-2005	28-12-2011	5
PO-4	Loa Bajo	N/A	7.657.954	434.627	10-11-2005	28-12-2011	5
PO-5	Loa Bajo	N/A	7.658.715	434.538	10-11-2005	28-12-2011	5
PO-6	Loa Bajo	N/A	7.658.749	434.401	10-11-2005	28-12-2011	5
PO-7	Loa Bajo	N/A	7.658.867	434.412	10-11-2005	28-12-2011	5
PO-8	Loa Bajo	N/A	7.657.228	434.430	10-11-2005	28-12-2011	5
REC-1	Loa Bajo	N/A	7.635.421	442.502	10-11-2005	28-12-2011	5
3X-16A	Loa Bajo	N/A	7.658.719	434.380	10-11-2005	31-12-2011	5

Nota: Elaboración propia.

Fuente: 1: Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa. CODELCO-Agua Ingenieros Consultores, 1987.

2: Datos facilitados por la DGA.

3: Datos de CODELCO.

4: Datos de Minera El Tesoro.

5: Informe Semestral N°2 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto Pampa Hermosa. SQM-GeoHidrología, 2012.

En la Figura 4.2-2, se presentan los niveles estáticos de todos los pozos con información recopilados en cada uno de los tres sectores hidrogeológicos: Loa Alto, Medio y Bajo. En dicho gráfico, no fueron considerados aquellos pozos que presentaban surgencia, como por ejemplo, los pozos Turi 10 y Chiu Chiu.

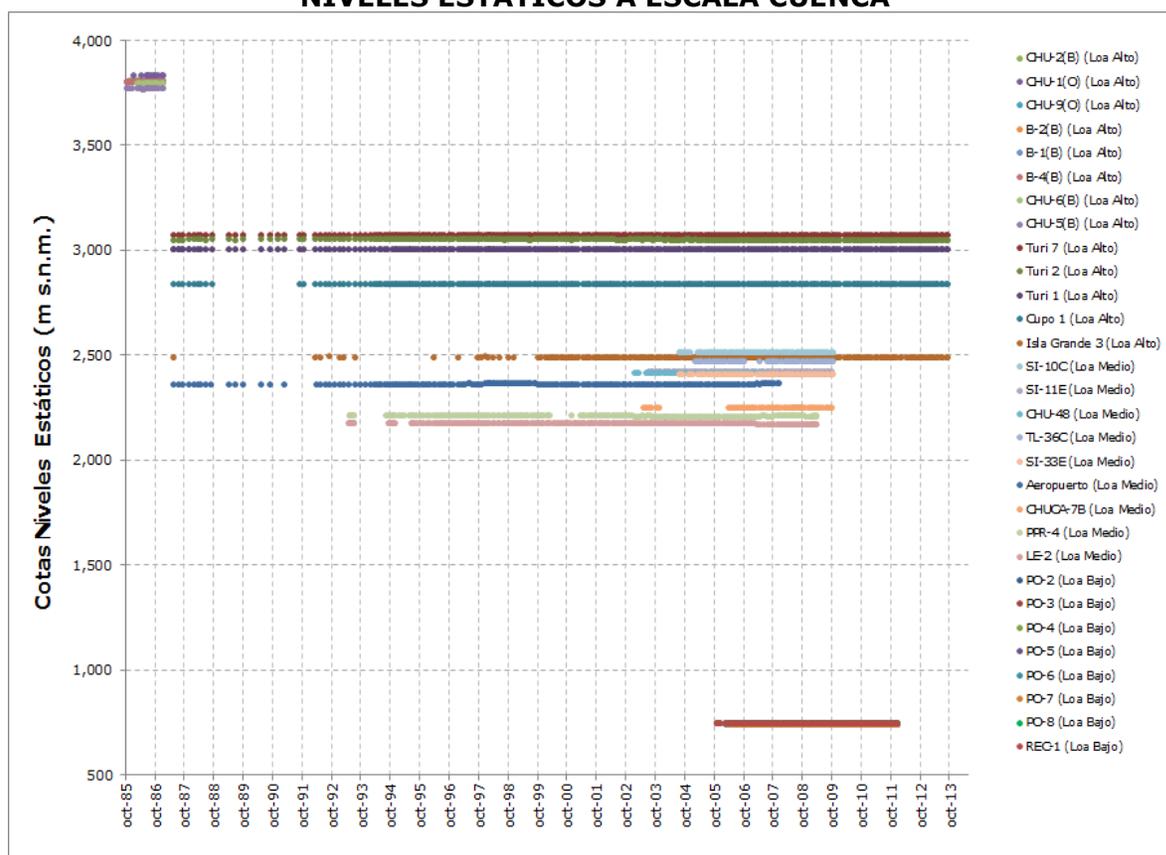
4.2.3. Parámetros Hidráulicos de los Acuíferos

A partir de los antecedentes que entregaron información de las magnitudes de los parámetros hidráulicos que se registran en los distintos sectores de la cuenca, se tiene que sólo para el sector Loa Medio existen suficientes datos como para disponer de una adecuada representatividad del acuífero. Caso opuesto, ocurre en el sector Loa Bajo donde la información se reduce solamente a la zona del Salar de Llamara.

En el sector Loa Alto, sólo se dispone de información de estos parámetros hidráulicos en las subcuencas de los ríos San Pedro de Inacaliri y Salado.

En base a lo señalado anteriormente, se consideraron para el presente estudio los siguientes rangos de permeabilidades y coeficientes de almacenamiento que se adjuntan en los Cuadros 4.2-2 y 4.2-3, respectivamente.

**FIGURA 4.2-21
NIVELES ESTÁTICOS A ESCALA CUENCA**



Fuente: Elaboración propia.

**CUADRO 4.2-19
RANGO DE PERMEABILIDADES CONSIDERADAS PARA REPRESENTACIÓN DE LOS
SECTORES ACUÍFEROS**

Sector Acuífero	Subsectores	Rango de K (m/día)
Loa Alto	Cuenca San Pedro Inacaliri	18 - $1,7 \times 10^3$
	Cuenca Salado	6 - 31
Loa Medio	Calama	1×10^{-5} - 3×10^2
Loa Bajo	Salar de Llamara	0,1 - 11,6

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 4.2-20
RANGO DE COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTOS CONSIDERADAS PARA
REPRESENTACIÓN DE LOS SECTORES ACUÍFEROS

Sector Acuífero	Subsectores	Rango Coef. Almacenamiento
Loa Alto	Cuenca San Pedro Inacaliri	$7,6 \times 10^{-4} - 0,34$
	Cuenca Salado	$6,1 \times 10^{-4} - 1,8 \times 10^{-2}$
Loa Medio	Calama	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-1}$
Loa Bajo	Salar de Llamara	0,0012 - 0,003

Fuente: Elaboración propia.

Estos valores tanto de permeabilidad como de coeficiente de almacenamiento fueron considerados para la siguiente etapa del estudio que guarda relación con la modelación del modelo integrado en MAGIC y de la calibración en régimen permanente del modelo subterráneo MODFLOW.

5. SISTEMATIZACIÓN DE DERECHOS DE AGUA

En este capítulo se resumió la información de derechos constituidos, tanto de aguas superficiales como subterráneas en la cuenca del río Loa. Para lo anterior, se consultaron los expedientes disponibles en la DGA (central y regional) y antecedentes de regularización existentes en el Conservador de Bienes Raíces (CBR).

5.1. Información de Derechos en DGA

Se realizó la revisión de la información de derechos de aguas otorgados disponible en el sitio web de la Dirección General de Aguas (<http://www.dga.cl>). Esta información es actualizada de manera mensual por la DGA y posee toda la información relevante asociada a los derechos de agua constituidos.

En el Cuadro 5.1-1, se adjunta un resumen con la información de derechos de aprovechamiento otorgados.

**CUADRO 5.1-1
RESUMEN DERECHOS OTORGADOS EN LA CUENCA DEL RÍO LOA**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente Anual (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Antofagasta	8.613,3	3,7	271,6	0,1
Calama	8.741,1	3.099,5	275,7	97,7
Maria Elena	527,7	48,8	16,6	1,5
Ollague	9,0	0,0	0,3	0,0
San Pedro de Atacama	18,0	265,4	0,6	8,4
Tocopilla	107,6	0,0	3,4	0,0
Sierra Gorda	0,0	0,3	0,0	0,0
Taltal	0,0	45,0	0,0	1,4
Pica	4,8	0,0	0,2	0,0
Pozo Almonte	60,0	331,0	1,9	10,4
Iquique	0,0	5,0	0,0	0,2
TOTAL	18.081,6	3.798,7	570,2	119,8

Fuente: Información facilitada por la DGA. Los derechos sin información de comuna han sido incorporados a la capital provincial.

En lo referente a derechos en trámite, en base a lo informado por la DGA regional de Antofagasta, sólo existen solicitudes de derechos de tipo no consuntivo, los cuales se muestran en el Cuadro 5.1-2.

**CUADRO 5.1-2
DERECHOS EN TRÁMITE**

Código de Expediente	Comuna	Fuente	Tipo Derecho	Uso del Agua	Ejercicio del Derecho	Caudal (l/s)
ND-0201-5004	María Elena	Río Loa	No Consuntivo	Energía Hidroeléctrica	Permanente y Continuo	100
ND-0201-5005	María Elena	Río Loa	No Consuntivo	-	Permanente y Continuo	100
ND-0201-5006	María Elena	Río Loa	No Consuntivo	Energía Hidroeléctrica	Permanente y Continuo	100
ND-0201-5007	María Elena	Río Loa	No Consuntivo	Energía Hidroeléctrica	Permanente y Continuo	100
ND-0202-5037	Calama	Río Loa	No Consuntivo	Otros Usos	Permanente y Continuo	100
ND-0202-5042	Calama	Río Salado	No Consuntivo	Otros Usos	Permanente y Continuo	500

Fuente: Información facilitada por la DGA.

5.2. Información de Derechos en CBR

Se llevó a cabo una visita al CBR de Calama, a modo de chequear que se dispone de toda la información de derechos otorgados. En dicha visita se solicitó la información de expedientes asociados a regularizaciones de derechos, los cuales fueron contrastados con los datos disponibles en la base de datos de derechos otorgados dentro de la comuna. Así, se corroboró que todos esos expedientes recibidos se encontraban debidamente actualizados en dicha base de datos de la DGA. No obstante a lo anterior, existen algunos expedientes que aparecen en la base de datos de la DGA que no fueron proporcionados por el CBR de Calama.

En el Cuadro 5.2-1, se presenta un resumen de los expedientes asociados al CBR de Calama disponibles en la base de datos de la DGA, en donde se indica además en la última columna, aquellos que fueron revisados de acuerdo a la información obtenida.

**CUADRO 5.2-1
DERECHOS EN CBR DE CALAMA**

Código de Expediente	Fecha Inscripción C.B.R.	Fojas N° CBR	Tipo Derecho	Fuente	Revisado
UA-0202-809024	26/03/1996	11 11	Consuntivo	Río Loa	NO
UA-0202-809041	21/02/2013	7 7	Consuntivo	Río Loa	NO
UA-0202-809034	21/01/2008	8 8	Consuntivo	Río Loa	NO
UA-0202-809042	03/01/2013	1 1	Consuntivo	Río Loa	NO
UA-0202-809003	02/11/1995	71 62	Consuntivo	Río Loa	SI
UA-0202-809021	02/11/1995	71 62	Consuntivo	Río Loa	SI
UA-0202-809017	02/11/1995	71 62	Consuntivo	Río Loa	Si
UA-0202-809013	02/11/1995	71 62	Consuntivo	Río Loa	SI
UA-0202-809006	02/11/1995	71 62	Consuntivo	Río Loa	SI
UA-0202-809010	02/11/1995	71 62	Consuntivo	Río Loa	SI
UA-0202-809027	02/11/1995	71 62	Consuntivo	Río Loa	SI
NC-0202-39	01/01/1984	421 37	Consuntivo	Río Loa	SI
NC-0202-14	01/01/1984	29 4	Consuntivo	Río Loa	SI
NC-0202-14	01/01/1984	29 4	Consuntivo	Río Loa	SI
ND-0202-800029	01/01/1984	468 VTA. 40	Consuntivo	Río Loa	NO
ND-0202-800001	01/01/1984	408 36	Consuntivo	Río Loa	SI
NC-0202-6	01/01/1984	408 36	Consuntivo	Río Loa	SI
NC-0202-14	01/01/1984	29 4	Consuntivo	Río Loa	SI
ND-0202-800051	12/05/2008	43 43	Consuntivo	Acuífero	SI
ND-0202-800047	12/05/2008	42 42	Consuntivo	Acuífero	SI
ND-0202-800046	12/05/2008	45 45	Consuntivo	Acuífero	SI
ND-0202-800045	12/05/2008	45 45	Consuntivo	Acuífero	SI
ND-0202-800053	12/05/2008	44 44	Consuntivo	Acuífero	NO
ND-0202-800049	12/05/2008	47 47	Consuntivo	Acuífero	NO
ND-0202-800052	12/05/2008	43 43	Consuntivo	Acuífero	SI
ND-0202-800048	12/05/2008	46 46	Consuntivo	Acuífero	SI
ND-0202-800050	12/05/2008	43 43	Consuntivo	Acuífero	SI
ND-0202-800061	09/05/2008	41 41	Consuntivo	Acuífero	NO
ND-0202-800054	09/01/2008	5 5	Consuntivo	Acuífero	NO

Fuente: Elaboración propia en base a información facilitada por la DGA y CBR Calama.

6. LEVANTAMIENTO DE DEMANDAS Y CONSUMOS

En el contexto de las labores requeridas para la aplicación del modelo de gestión en la cuenca del río Loa, durante fines de Noviembre y la primera quincena de Diciembre de 2013 se efectuó el levantamiento de demandas y consumos mediante la realización de encuentros en terreno a los propietarios, cuidadores o trabajadores del lugar.

El objetivo de esta actividad fue la obtención de la demanda real de la cuenca con el fin de actualizar los usos y demandas de aguas subterráneas y superficiales. De esta forma, se busca que el modelo integrado refleje la realidad de la zona de estudio, considerando principalmente las actividades de riego, agua potable, industria y minería.

La información que se logró conseguir, se resume en el siguiente Cuadro:

**CUADRO 6.5-1
COMPARACIÓN CENSO AGROPECUARIO Y CATASTRO KP**

Cultivos	Censo Agropecuario 2007		Catastro KP 2013	
	Superficie (Ha)	% de Cultivo	Superficie (Ha)	% de Cultivo
Cereales	131	17%	199	26%
Leguminosas y Tubérculos	1	0%	25	3%
Cultivos Industriales	0	0%	0	0%
Hortalizas	208	27%	98	13%
Flores	4	1%	0	0%
Plantas Forrajeras	337	43%	442	57%
Frutales	4	1%	11	1%
Viñas y Parronales Viníferos	0	0%	0	0%
Viveros	0	0%	0	0%
Semilleros	11	1%	0	0%
Plantaciones Forestales	83	11%	0	0%
Total	780	100%	774	100%

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Censo Agropecuario 2007 y Catastro KP 2013.

Respecto a los resultados del catastro llevado a cabo, se concluyó lo siguiente:

- Se identificaron las superficies potenciales de cultivos y las superficies cultivadas actualmente.
- Se recabó información relativa al revestimiento de los canales principales e interpediales.
- Se obtuvo información referente a los tipos de cultivos predominantes en cada superficie de riego cubierta por los canales catastrados, así como también la forma o método de riego.
- Se verificó un importante abandono del suelo para actividades agrícolas.

- Se observó buena predisposición por parte de las personas encuestadas, por lo que la información recabada dio cuenta de un cierto nivel de confianza que permitió su posterior utilización en este estudio.

7. MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE GLOBAL

En este capítulo se definió el modelo conceptual de la cuenca del río Loa, la que consideró los distintos elementos componentes del sistema completo y las interacciones de dichos elementos. Dentro de los principales elementos se consideraron las entradas y salidas del sistema, los cuales se utilizaron posteriormente para la determinación del balance global que dé cuenta de la situación actual de la cuenca de estudio.

A continuación se presentan los elementos del sistema y los valores obtenidos en cada una de estas componentes.

7.1. Entradas del Sistema

7.1.1. Precipitación.

De acuerdo a lo obtenido en el Capítulo 3: Caracterización Hidrológica, se empleó el gradiente de precipitaciones representativo del río Loa para estimar la precipitación neta que se genera sobre la cota 2.200 m, ya que bajo dicho valor no se registran lluvias. En el Cuadro 7.1-1, se presenta un resumen de la precipitación neta que se generó para la cuenca del río Loa.

**CUADRO 7.1-1
APORTE PRECIPITACIÓN NETA EN CUENCA DEL RÍO LOA**

	Precipitación Neta (m³/s)
TOTAL	32,12

Fuente: Elaboración propia.

7.1.2. Recarga y Escurrentía Total

La estimación de estas variables se realizó empleando el método SCS o de la Curva Número, metodología que permite estimar la parte de la precipitación total que logra transformarse tanto en escurrentía directa como la parte que logra infiltrarse a través del suelo y llegar finalmente al acuífero.

La aplicación de esta metodología entregó como resultado los valores de recarga subterránea por precipitación, de escurrentía directa y escurrentía total (suma de recarga subterránea y escurrentía directa), que se detallan en los Cuadros 7.1-2 a 7.1-4, respectivamente.

**CUADRO 7.1-2
APORTE RECARGA SUBTERRÁNEA POR PRECIPITACIÓN EN CUENCA DEL RÍO LOA**

	Recarga Subterránea por Pp (m³/s)
TOTAL	2,33

Fuente: Elaboración propia.

**CUADRO 7.1-3
APORTE ESCORRENTÍA DIRECTA EN CUENCA DEL RÍO LOA**

	Escorrentía Directa (m³/s)
TOTAL	3,18

Fuente: Elaboración propia.

**CUADRO 7.1-4
APORTE ESCORRENTÍA TOTAL EN CUENCA DEL RÍO LOA**

	Escorrentía Total (m³/s)
TOTAL	5,51

Fuente: Elaboración propia.

7.2. Salidas del Sistema

7.2.1. Demandas Superficiales

Dado que se desconocen los factores de uso asociados a los derechos constituidos, se asumió una demanda efectiva de recursos hídricos superficiales igual al total de derechos otorgados de carácter permanente y continuo. Este valor se presenta en el Cuadro 7.2-1.

**CUADRO 7.2-1
DEMANDA SUPERFICIAL ESTIMADA A PARTIR DE DERECHOS SUPERFICIALES
OTORGADOS EN CUENCA DEL RÍO LOA**

Derechos Superficiales	Valor (m³/s)
Derechos Otorgados Totales (Consuntivos y No Consuntivos)	17,30
Derechos Otorgados Totales (No Consuntivos)	11,58
TOTAL DERECHOS OTORGADOS PERMANENTES Y CONTINUOS (Consuntivos)	5,72

Fuente: Elaboración propia en base a información entregada por la DGA.

7.2.2. Demandas Subterráneas

Al igual que en el caso de las demandas superficiales, se desconoce de la misma forma, los factores de uso correspondientes a los derechos subterráneos, por lo que para la determinación de la demanda subterránea, se utilizó el total de derechos otorgados de aguas subterráneas para los distintos usuarios de la cuenca (particulares, empresas sanitarias, empresas no mineras, CODELCO y otras mineras).

En el Cuadro 7.2-2, se presenta un resumen con el valor de la demanda subterránea estimada para la cuenca del río Loa a partir del total de derechos subterráneos otorgados.

**CUADRO 7.2-2
DEMANDA SUBTERRÁNEA ESTIMADA A PARTIR DE DERECHOS OTORGADOS DE
EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CUENCA DEL RÍO LOA**

	Caudal Otorgado (m³/s)
TOTAL	3,79

Fuente: Elaboración propia a partir de información entregada por la DGA.

7.2.3. Evaporación Embalse Conchi

Esta componente se evaluó solamente para el caso del embalse Conchi ya que el volumen de agua almacenado en su cubeta es potencialmente susceptible de sufrir pérdidas por evaporación dada la importancia de la superficie del espejo de agua que se produce.

Utilizando la estadística evaporativa total mensual de bandeja que registra la estación meteorológica Conchi Embalse, y estimando un valor promedio de la superficie inundada del embalse, se obtuvo un valor de pérdida por evaporación que se resumen en el Cuadro 7.2-3.

**CUADRO 7.2-3
PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN EN EMBALSE CONCHI**

Embalse	Evaporación (m³/s)
Conchi	0,09

Fuente: Elaboración propia.

7.2.4. Evaporación desde Cauces Superficiales

Al igual que en el estudio Balance Hidrológico Nacional II Región elaborado por la DGA en 1986, la evaporación desde los cauces se consideró solamente en los siguientes tramos:

- Tramo 1: Cauce río San Salvador y río Loa entre estaciones fluviométricas Río Loa en Yalquincha y Río Loa después de junta con río San Salvador.
- Tramo 2: Cauce río Loa entre estaciones fluviométricas Río Loa después de junta con Río San Salvador y Río Loa antes de Zona Agrícola de Quillagua.
- Tramo 3: Cauce río Loa entre estaciones fluviométricas Río Loa antes de Zona Agrícola de Quillagua y Río Loa en Desembocadura.

Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 7.2-4.

**CUADRO 7.2-4
CAUDAL DE EVAPORACIÓN EN CAUCES SUPERFICIALES POR TRAMOS**

Mes	Q evap T1 (l/s)	Q evap T2 (l/s)	Q evap T3 (l/s)	Total (l/s)
Abr	106,1	78,0	79,8	264,0
May	105,1	77,3	79,1	261,5
Jun	95,9	70,5	72,1	238,5
Jul	103,0	75,7	77,5	256,2
Ago	98,6	72,5	74,2	245,4
Sep	108,1	79,5	81,4	269,0
Oct	126,6	93,1	95,3	315,0
Nov	130,9	96,3	98,5	325,8
Dic	135,5	99,6	102,0	337,1
Ene	131,8	96,9	99,2	327,8
Feb	111,0	81,6	83,5	276,0
Mar	125,0	91,9	94,1	311,0
Prom	114,8	84,4	86,4	285,6

Fuente: Elaboración propia.

7.2.5. Río Loa en Desembocadura

La componente superficial de recursos hídricos que hace abandono de la cuenca, se estimó utilizando el caudal medio anual con los registros de la estación fluviométrica DGA Río Loa en Desembocadura, cuyo valor se presenta en el Cuadro 7.2-5.

**CUADRO 7.1-13
CAUDAL SUPERFICIAL DE SALIDA EN ESTACIÓN DGA RÍO LOA EN
DESEMBOCADURA**

Estación DGA	Código BNA	Q Medio Anual (m ³ /s)
Río Loa en Desembocadura	02120001-8	0,24

Fuente: Elaboración Propia.

7.3. Interacciones del Sistema

7.3.1. Afloramientos y Recuperaciones

Para la determinación de ambas componentes se consideraron sólo los tramos donde se aprecia el efecto mancomunado de estas, y su cuantificación fue estimada como un promedio de las diferencias entre los caudales de aforo registrados tanto al inicio como al término del tramo, según la estadística DGA disponible. En el Cuadro 7.3-1, se presenta un resumen con los valores de aportes netos de afloramiento y recuperaciones.

CUADRO 7.3-1
APORTES NETOS POR AFLORAMIENTOS Y RECUPERACIONES EN CUENCA RÍO LOA

Tramo	Q Aflora./Recup. (m³/s)
Lequena - Quinchamale	0,65
Siloli FCAB - Siloli Inacaliri	0,09
Salado Curti - Salado Ayquina	0,28
Loa Quillagua - Loa Panamericana	0,07

Fuente: Elaboración propia.

7.4. Balance Global de la Cuenca del Río Loa

Se elaboró un balance utilizando las componentes de entrada y salida del sistema, determinados en los acápite 7.1 y 7.2, ya que las interacciones como por ejemplo, afloramientos y recuperaciones, son sólo procesos internos del sistema.

En el Cuadro 7.4-1, se presenta el resultado final del balance entre los términos de oferta y demanda de recursos hídricos de la cuenca del Loa. Se hace hincapié que dicho balance se realizó utilizando derechos otorgados y no el uso real de los derechos presentes en la cuenca, los cuales, de acuerdo a lo observado en la campaña de terreno, deberían ser menores al valor nominal del derecho.

CUADRO 7.4-1
BALANCE GLOBAL DE LA CUENCA DEL RÍO LOA

ENTRADAS	
Componente	Valor (m³/s)
Recarga por Precipitación	2,33
Escorrentía Directa	3,18
TOTAL	5,51

SALIDAS	
Componente	Valor (m³/s)
Derechos Superficiales Otorgados	5,72
Derechos Subterráneos Otorgados	3,79
Evaporación Embalse Conchi	0,09
Evaporación desde Cauces Superficiales	0,29
Río Loa en Desembocadura	0,24
TOTAL	10,13

BALANCE GLOBAL	-4,62
-----------------------	--------------

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro anterior, da cuenta de la situación actual de los recursos hídricos y como se puede apreciar, éstos se encontrarían prácticamente comprometidos y revelaría de una condición de fuerte explotación en la cuenca. No obstante, hay que tener presente que dado la incerteza en el desconocimiento de los factores de usos asociados a los derechos tanto superficiales como subterráneos, se cree que las magnitudes de las demandas hídricas serían más bajas, pero no lo suficiente como para revertir el desbalance global.

8. DESARROLLO DEL MODELO INTEGRADO

El desarrollo del modelo integrado involucró diversas etapas, las que contemplaron principalmente las actividades de implementación del modelo en plataforma MAGIC, redefinición del modelo subterráneo previo elaborado en Visual MODFLOW y por último, calibración y ajuste de ambos modelos. A continuación se describen cada una de estas actividades.

8.1. Implementación Modelo Integrado en MAGIC

La cuenca del río Loa fue representada como una red de nodos y conectores entrelazados entre sí, condición de representación disponible en el programa MAGIC. El concepto detrás de esta configuración se basa en que los conectores transmiten el recurso hídrico hacia los distintos nodos que consumen, almacenan o entregan caudal, de acuerdo a sus propiedades.

El modelo MAGIC consideró un período de modelación que comprende los años hidrológicos 1974-1975 a 2012-2013.

8.1.1. Elementos de la Cuenca Definidos en Modelo Integrado

Los elementos de la cuenca representados en la modelación en MAGIC, fueron los siguientes:

**CUADRO 8.1-1
ELEMENTOS DE LA CUENCA DEFINIDOS EN MODELO MAGIC**

Elemento	Cantidad	Fuente/Observación
Nodos	119	Incluyen bocatomas, afloramientos, captaciones puntuales, descargas puntuales, estaciones fluviométricas DGA, derrames zonas de riego y aporte desde subcuencas (ver Cuadro 8.1-1 de informe).
Acuíferos	8	Acuíferos definidos en base de experiencia de este Consultor (ver Cuadro 8.3-1 de informe).
Tramos de Río	115	Parámetros definidos en función de la geometría de cauces, estudios previos, imágenes satelitales, campaña de terreno (ver Cuadro 8.1-2 de informe).
Zonas de Riego	16	Estudios anteriores, Censo Agropecuario y campaña de terreno (ver Cuadro 8.5-1 de informe).
Canales	29	Estudios previos y campaña de terreno (ver Cuadro 8.4-2 de informe).
Pozos	59	Derechos subterráneos de la DGA, estudios anteriores y campaña de terreno (ver Cuadro 8.7-1 de informe).
Captaciones	25	Estudios anteriores y campaña de terreno (ver Cuadro 8.8-1 de informe).
Descargas	1	Descarga superficial de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama, información de estudios anteriores (ver Cuadro 8.9-1 de informe).
Estaciones Fluviométricas	24	Estaciones DGA con información fluviométrica (ver Cuadro 8.1-4 de informe).

**CUADRO 8.1-1
ELEMENTOS DE LA CUENCA DEFINIDOS EN MODELO MAGIC**

Elemento	Cantidad	Fuente/Observación
Embalses	1	Embalse Conchi representado por información de estudios anteriores y de la DOH (Acápite 8.6 de informe).

Fuente: Elaboración propia.

Los cauces superficiales representados en el modelo fueron los siguientes.

- Río Loa.
- Río San Pedro de Inacaliri.
- Río Salado.
- Río San Salvador.
- Vertiente Ojos de Opache.

En la Figura 8.1-1, se muestra la configuración espacial de la red de nodos definidos en MAGIC para la cuenca del río Loa

8.1.2. Aportes desde Cuenca No Controladas

MAGIC dispone como opción incorporar los caudales de entrada al modelo producto del aporte de las subcuencas involucradas a los respectivos cauces. Estos caudales de entrada se estimaron mediante modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía, cuya metodología proviene de aplicar el método de la Curva Número o SCS.

Análogamente, MAGIC diferencia conceptualmente los aportes de tipo Naturales y Cuenca Laterales. Los primeros corresponden a los caudales generados en las cuencas de cabecera, mientras que los segundos se asocian a aportes laterales de las subcuencas que son atravesadas por el cauce y por ende intervenidas. La definición de una cuenca de cabecera se basa en la necesidad de generación de caudal previo al primer nodo de un cauce determinado, mientras que los aportes laterales de acuerdo a completar el área no considerada de cada subcuenca del río Loa. En el Cuadro 8.1-2, se presenta un resumen con la definición de los Aportes Naturales y Cuenca Laterales en la cuenca del río La

**CUADRO 8.1-2
APORTES CUENCAS NO CONTROLADAS**

Tipo	Código	Nombre	Nodo
Aporte Natural	AN-01	Río Loa antes Represa Lequena	NO-001
Aporte Natural	AN-02	Río San Pedro	NO-009
Aporte Natural	AN-03	Río Siloli antes Bocatoma FCAB	NO-010
Aporte Natural	AN-04	Quebrada Colana	NO-014
Aporte Natural	AN-05	Río Toconce	NO-041
Aporte Natural	AN-06	Río Hojalar	NO-050
Aporte Natural	AN-07	Río Salado	NO-055
Aporte Natural	AN-08	Quebrada Cablor y Coyo	NO-060
Aporte Natural	AN-09	Río Curte	NO-062
Aporte Natural	AN-10	Río San Salvador	NO-093
Cuenca Lateral	CL-01	Río Loa entre Qda de Hachas y Río San Pedro	NO-006
Cuenca Lateral	CL-02	Río Loa entre Río San Pedro y Río Salado	NO-029
Cuenca Lateral	CL-03	Río Toconce	NO-039

CUADRO 8.1-2
APORTES CUENCAS NO CONTROLADAS

Tipo	Código	Nombre	Nodo
Cuenca Lateral	CL-04	Río Toconce	NO-045
Cuenca Lateral	CL-05	Río Toconce	NO-049
Cuenca Lateral	CL-06	Río Hojalar	NO-052
Cuenca Lateral	CL-07	Río Salado	NO-072
Cuenca Lateral	CL-08	Río Loa entre Río Salado y Río San Salvador	NO-076
Cuenca Lateral	CL-09	Río Loa antes Río San Salvador	NO-091
Cuenca Lateral	CL-10	Río San Salvador	NO-101
Cuenca Lateral	CL-11	Río Loa	NO-107
Cuenca Lateral	CL-12	Río Loa	NO-114
Cuenca Lateral	CL-13	Salar de Llamara	NO-115

Fuente: Elaboración propia.

8.1.3. Acuíferos

Dada la falta de información oficial de la autoridad con respecto a la distribución del sistema de acuíferos que presenta la cuenca del río Loa, éstos fueron representados y definidos por el Consultor. La distribución espacial, propiedades hidráulicas intrínsecas y características geométricas de los acuíferos presentados, se generó a partir de un conjunto de información, que incluye básicamente estudios, modelos numéricos y necesidades del modelo para su correcto funcionamiento.

En el Cuadro 8.1-3 se adjunta la codificación dada a los acuíferos definidos por este Consultor, mientras que en la Figura 8.1-2, se muestra la ubicación espacial de éstos.

CUADRO 8.1-3
ACUÍFEROS MODELADOS EN MAGIC

Código	Nombre
AC-01	Quinchamale
AC-02	Ojos de San Pedro
AC-03	Río Salado
AC-04	Pampa Llalqui
AC-05	Calama
AC-06	María Elena
AC-07	Salar de Llamara
AC-08	Loa a Desembocadura

Fuente: Elaboración propia.

8.1.4. Zonas de Riego

Con la información recabada en la actividad de terreno e inspección visual a través de Google Earth, se determinó la ubicación de las zonas de riego. De esta forma se determinaron 16 sectores productivos agrícolas, de los cuales 3 de ellos (sin cultivos asociados y de un área correspondiente a los acuíferos de cada subcuenca), se generaron única y exclusivamente para fidelizar la recarga por precipitación al sistema subterráneo.

En la Figura 8.1-3 se muestra la ubicación espacial de estas zonas de riego dentro de la cuenca del río Loa.

Para cada una de las zonas de riego, se determinó la evolución espacial de las superficies cultivadas y no cultivadas dentro del período de modelación (1975-2012), utilizando la información recopilada en terreno así como también los Censos Agropecuarios de los años 1976, 1997 y 2007, y a modo de representar de mejor manera la situación agrícola histórica de la cuenca, éstas superficies fueron proyectadas retrospectivamente en función de las variaciones históricas del Producto Interno Bruto Silvoagropecuario regional.

En paralelo, se determinaron otras variables de importancia para la estimación de la demanda hídrica por riego, como lo son la evapotranspiración potencial, coeficientes de cultivo, evapotranspiración real, la precipitación efectiva de cada una de las zonas de riego utilizando la metodología de Blanney y Criddle modificada por Horacio Merlet y Fernando Santibáñez el año 1986. Asimismo, se estimaron también, la necesidad neta mensual, percolación desde las zonas de riego y los derrames o retornos.

8.1.5. Embalse Conchi

Para representar el embalse Conchi se incorporó a MAGIC información relevante como:

- Curvas de superficie y cota vs. Volumen embalsado.
- Volumen muerto y volumen máximo de embalsamiento.
- Tasas de evaporación a nivel mensual, obtenida de la estación meteorológica Conchi Embalse.

Sin embargo, cabe señalar que MAGIC, no dispone de una herramienta que permita la incorporación de la regla de operación del embalse.

8.1.6. Pozos de Bombeo

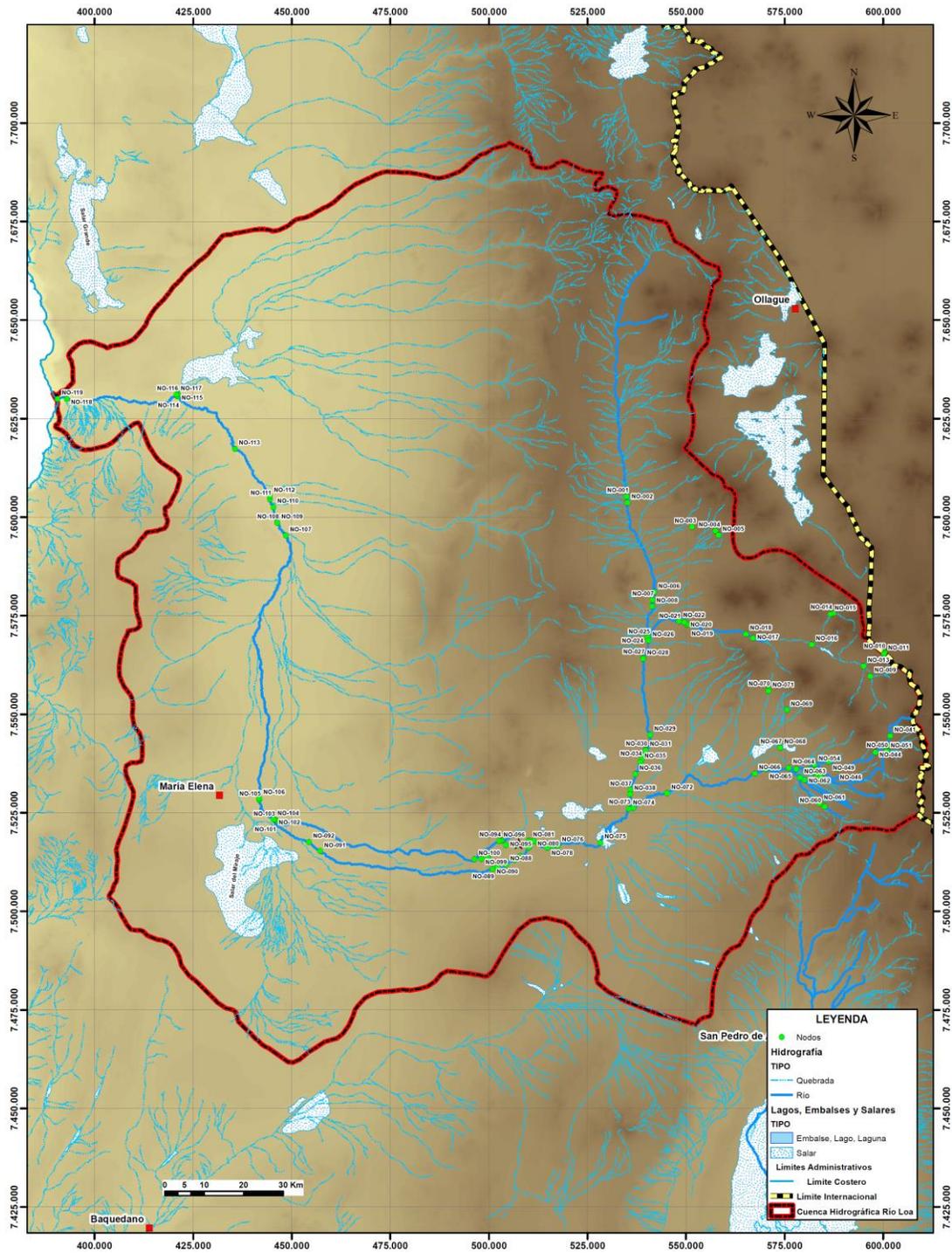
Los pozos considerados en el modelo MAGIC, se definieron en base a la información de derechos subterráneos disponibles en el sitio web de la DGA, los que en la modelación comienzan a operar en la fecha en la cual fueron constituidos. Estos derechos suman un total de 53.

Por otro lado, para efectos de modelación se incluyeron otros 6 pozos más para representar elementos como drenes y afloramiento principalmente, que el programa MAGIC no permitió incluir tanto por no existir una tabla específica como por superar el límite máximo de elementos permitido.

8.1.7. Captaciones Puntuales

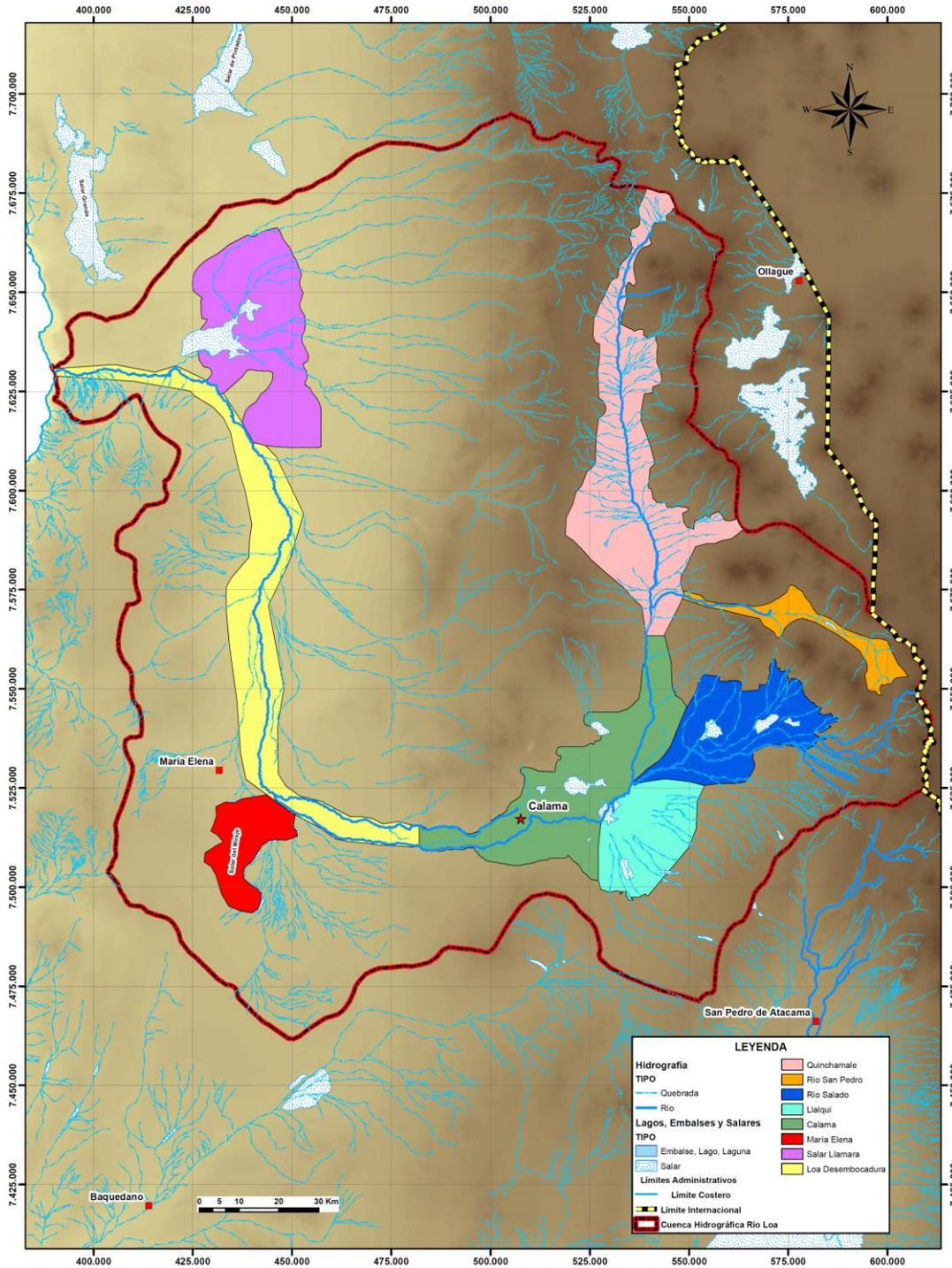
Se consideraron para el modelo MAGIC todas aquellas extracciones realizadas por Aguas Antofagasta para consumo de agua potable y las extracciones de CODELCO y SQM para uso minero. Las captaciones puntuales incorporadas a la modelación se resumen en el Cuadro 8.1-4.

FIGURA 8.1-1
CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA RED DE NODOS DEFINIDOS EN MODELO
MAGIC



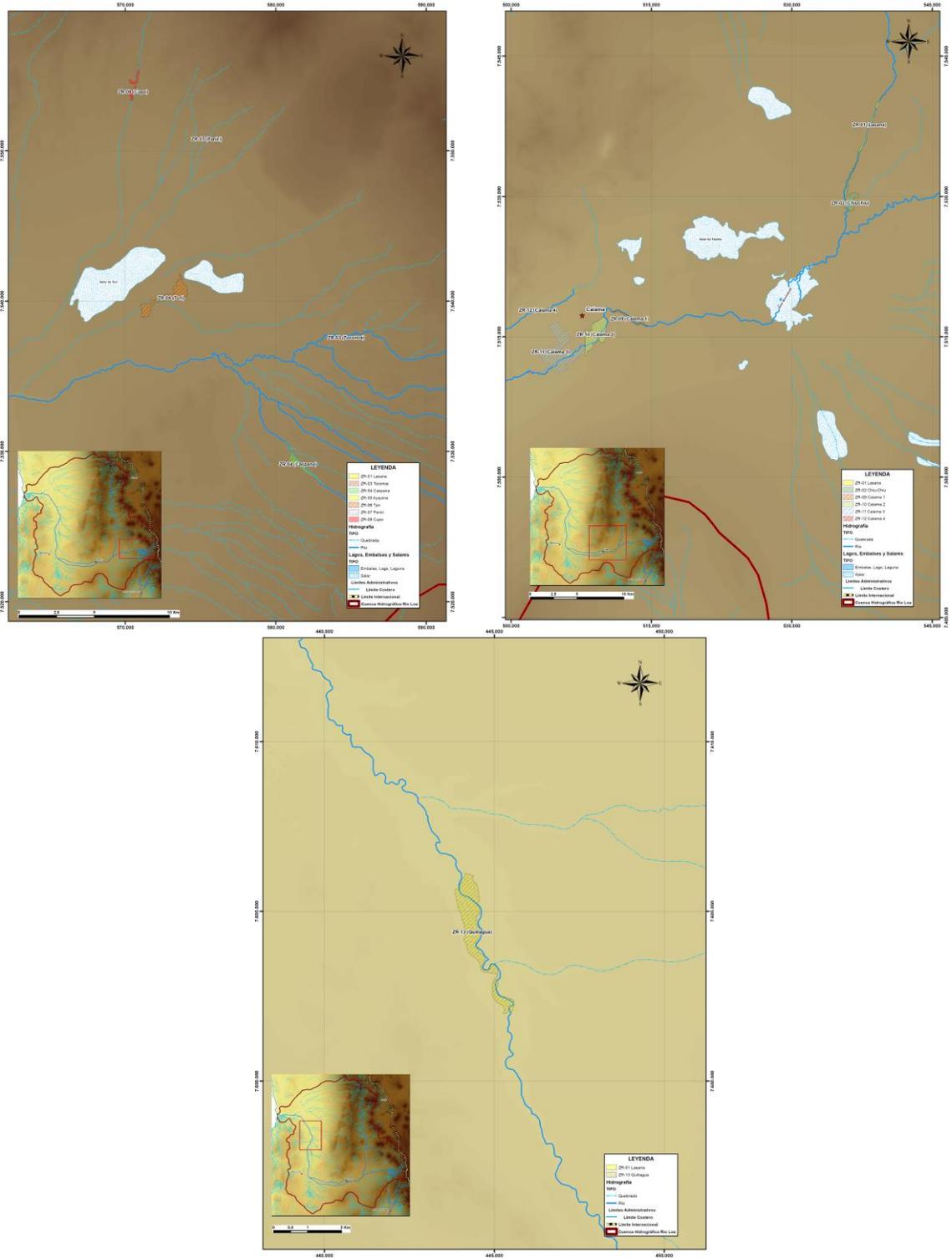
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 8.1-2
UBICACIÓN ESPACIAL DE LOS ACUÍFEROS DEFINIDOS EN MODELO MAGIC



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 8.1-3
UBICACIÓN ESPACIAL DE LAS ZONAS DE RIEGO DEFINIDAS EN MODELO MAGIC



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 8.1-4
CAPTACIONES PUNTUALES INCORPORADAS AL MODELO MAGIC

Código	Nombre	Capacidad (m³/s)	Fecha Der Otorgado
CP-01	ESSAN Lequena	0,55	11-12-1985
CP-02	FCAB Aguada Palpana	0	31-07-1995
CP-03	Vertiente Polapi 1	0,02	31-07-1995
CP-04	Vertiente Polapi 2	0	31-07-1995
CP-05	ESSAN Quinchamale	0,3	19-02-1985
CP-06	Ferrocarriles Siloli	0,12	11-07-1906
CP-07	Codelco Inacaliri	0,15	22-03-1990
CP-08	Codelco Colana	0,05	29-05-1980
CP-09	Parshall 2	0,18	10-09-1914
CP-10	Inacaliri I y II ADASA	1,65	10-01-1995
CP-11	Codelco Linzor	0,05	12-12-1985
CP-12	Toconce (Linzor) ADASA	0,05	12-12-1985
CP-13	ESSAN Toconce	0,47	11-12-1985
CP-14	Toconce (Hojalar) ADASA	0,14	28-03-1985
CP-15	Codelco Salado	0,54	13-12-1961
CP-16	Puente Negro	0,15	01-01-1994
CP-17	Soquimic Pedro de Valdivia	0,09	06-04-1932
CP-18	Soquimic Coya Sur	0,09	07-03-1963
CP-19	Soquimic María Elena	0,06	18-01-1928
CP-20	SQM Quebrada Amarga	0,06	24-06-1999
CP-21	Trasvase hacia Río Salado	0,1	13-12-1961
CP-22	Demanda Embalse	6	01-04-1975
CP-23	Evaporación Tramo 1	0,2	-
CP-24	Evaporación Tramo 2	0,2	-
CP-25	Evaporación Tramo 3	0,2	-

Fuente: Elaboración Propia

8.1.8. Descargas Puntuales

Se incorporó como única descarga puntual al modelo, el caudal efluente desde la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de la ciudad de Calama, la cual empezó a operar desde el año 2002.

Para generar la descarga histórica de aguas servidas se consideró la dotación media de Calama así como también la proyección de la población de la comuna en base a los censos realizados en los años 1970, 1982, 1992, 2002 y 2012. Con estos antecedentes, se obtuvieron los valores de descarga promedio anual para todo el período de modelación, los cuales finalmente se distribuyeron mensualmente de acuerdo a la estadística de variación de la descarga de aguas servidas a nivel nacional, emitida por la SISS.

8.2. Calibración y Validación del Modelo Integrado

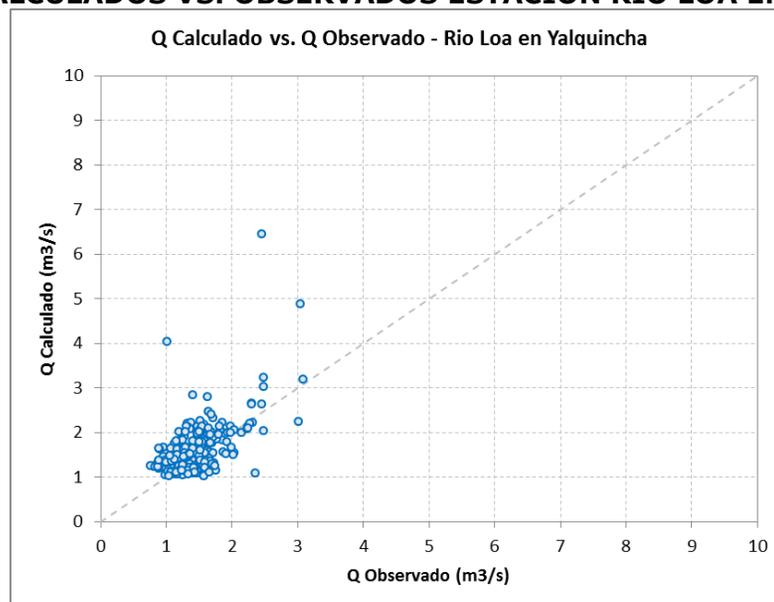
Posterior a la etapa de implementación del modelo, se efectuaron modelaciones con el objeto de ir realizando los ajustes necesarios para optimizar la calibración del modelo y que los resultados se adecuen a la realidad de la cuenca del río Loa. Estos ajustes consistieron en modificar y sensibilizar diversos parámetros que poseen mayor incerteza en su determinación, tales como, el almacenamiento específico, coeficiente de percolación desde las zonas de riego, espesor y permeabilidad del lecho de los cauces superficiales, espesor de los acuíferos y derrames de zonas de riego, entre otros.

La información que se utilizó en la modelación, abarca el período conformado por años 1974 a 2013 (años hidrológicos 1975 a 2012). Sin embargo, se dio relevancia a la realidad actual de la cuenca, buscando un mejor ajuste de los resultados en el último tercio del período. Esta decisión se basa en la mayor confianza en los datos recientes que se manejan y que fueron corroborados y complementados durante la campaña de terreno realizada.

Los resultados del modelo MAGIC, corresponden a flujos medios mensuales en cada uno de los nodos definidos en su construcción. En particular para la etapa de calibración, se compararon los caudales simulados con los efectivamente registrados en las estaciones fluviométricas DGA consideradas para dicho fin. Para el caso específico de la estación Río Loa antes Represa Lequena, ésta no formó parte de la calibración y por tanto la estadística observada se impuso directamente en el nodo de cabecera. En el Cuadro 8.2-1, se presentan los estadígrafos obtenidos en la calibración final y las estaciones fluviométricas DGA que se emplearon para la calibración.

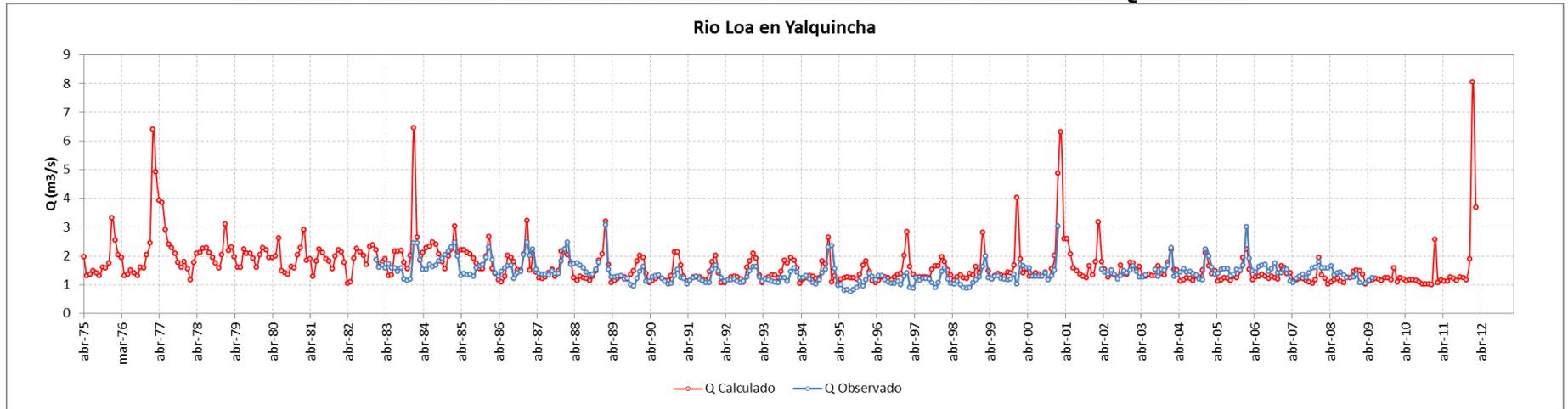
Por otro lado en las siguientes Figuras se presentan solamente a modo de ejemplo el gráfico de ajustes de los caudales observados y simulados, las series observadas y calculadas en el tiempo y las series de volúmenes acumulados observados y calculados, para la estación fluviométrica DGA Río Loa en Yalquincha.

FIGURA 8.2-1
CAUDALES CALCULADOS VS. OBSERVADOS ESTACIÓN RÍO LOA EN YALQUINCHA



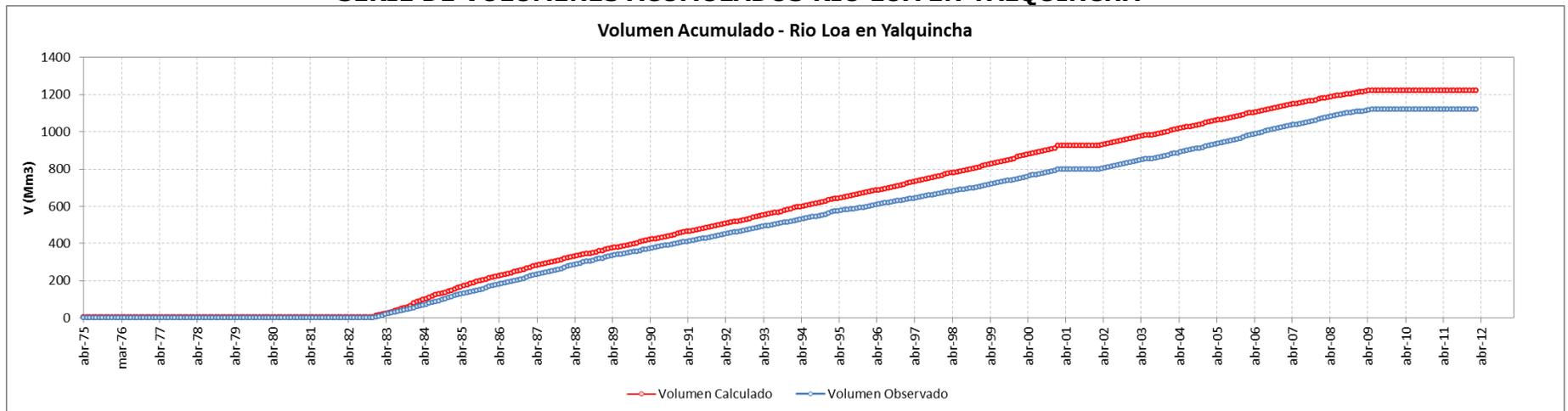
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 8.2-2
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO LOA EN YALQUINCHA



Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 8.2-3
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS RÍO LOA EN YALQUINCHA



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 8.2-1
ESTADÍSTGRAFOS OBTENIDOS EN CALIBRACIÓN DEFINITIVA MODELO MAGIC

Estación	R²	RMS (m³/s)	RMSN	Desv. Estandar (m³/s)	Error Medio (m³/s)	Error Abs. Medio (m³/s)	Error Típico (m³/s)
Río Loa en Vado Santa Barbara	0,86	0,32	0,05	0,65	0,05	0,2	0,27
Río Loa Salida Embalse Conchi	0,58	0,4	0,05	0,58	0,02	0,18	0,31
Río Toconce antes Represa Sendos	0,38	0,11	0,08	0,12	0,01	0,07	0,08
Río Salado en Sifón Ayquina	0,66	0,37	0,05	0,4	-0,06	0,13	0,13
Río Loa en Yalquincha	0,34	0,46	0,20	0,62	0,12	0,29	0,45
Río Loa en Escorial	0,66	0,98	0,07	0,96	-0,1	0,48	0,55
Río Loa en Finca	0,45	0,45	0,06	0,55	-0,06	0,28	0,35
Río Loa antes Agrícola Quillagua	0,06	0,46	0,2	0,47	-0,12	0,25	0,25
Río Loa en Desembocadura	0,63	0,38	0,05	0,48	-0,05	0,16	0,22

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos de la calibración definitiva del modelo MAGIC, se concluyó que para las subcuencas de los ríos Salado y río Loa desde Vado San Bárbara hasta Desembocadura, el ajuste fue satisfactorio con correlaciones adecuadas en gran parte de los caudales peaks. No obstante, existieron períodos aislados sobre todo durante los primeros años de modelación, en donde en algunas estaciones no se logró reproducir de manera adecuada los caudales observados durante los primeros años de modelación, en especial en el flujo base. Lo anterior se explica en parte, dada la menor certeza de la información con la que se cuenta para reproducir los primeros años de la modelación.

Como parte del análisis de los resultados del modelo integral, se realizaron las siguientes estimaciones:

- Balances subterráneos medios en todo el período modelado para cada uno de los sectores acuíferos.
- Balances en las 13 zonas de riegos y discretizadas según los sectores acuíferos definidos.
- Satisfacción de la demanda hídrica en las zonas de riego.
- Análisis volumétrico en el embalse Conchi.
- Cumplimiento del caudal ecológico en los tramos: río Loa en Finca hasta confluencia con río San Salvador y confluencia de los ríos Loa y San Salvador hasta río Loa antes Zona Agrícola Quillagua.
- Análisis de sensibilidad a parámetros como coeficiente de almacenamiento y coeficiente de percolación.

9. CORRECCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO SUBTERRÁNEO

Como parte del estudio denominado "Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. 2012", MATRAZ construyó un modelo hidrogeológico numérico del acuífero de Calama, abarcando el área comprendida desde aguas abajo del embalse Conchi por el Norte, y aproximadamente 10 km al poniente de la estación Río Salado en Sifón Ayquina por el Este, hasta unos 25 km al poniente de la ciudad de Calama en su extremo Oeste. Dicho modelo fue desarrollado en Visual MODFLOW Flex 2012.1 y no fue sometido a un proceso de calibración.

Previo a la realización de la calibración del modelo anterior por parte de este Consultor, se efectuó un profundo análisis de su construcción y datos de entradas en general, de manera de identificar problemas y posibles modificaciones antes de llevar a cabo la calibración propiamente tal. Como resultado de este análisis, se concluyó que el modelo del acuífero de Calama proporcionado por la DGA no se encontraba en una etapa de desarrollo suficiente como para poder realizar la calibración, ya que existieron fallencias geométricas detectadas en la zona Sureste de Pampa Llalqui, en la parte Noreste correspondiente a la sección del río Salado que entra al modelo y en el borde Norte aguas abajo del embalse Conchi. Además en el modelo de MATRAZ, se detectó una ausencia de información clave previa al inicio de la calibración como por ejemplo, niveles subterráneos iniciales, zonificación de permeabilidades y almacenamientos, condiciones de borde en el sector de Chuquicamata, entre otros.