



Ministerio de
Obras Públicas

Gobierno de Chile



Agua



Aeropuertos



Arquitectura



Obras Hidráulicas



Obras Portuarias



Vialidad

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

ESTUDIO

Análisis integrado río Loa Región de Antofagasta.

ZONA NORTE



MAYO DE 2014



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

INFORME FINAL

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.

INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1-1
1.1. General	1-1
1.2. Objetivos	1-2
1.3. Alcance	1-3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	2-1
2.1. Estudios Revisados.....	2-1
2.1.1. Embalse Conchi. Absalon Monsalve M. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. 1969.....	2-1
2.1.2. Modelo Hidrológico y de Constitución Química de la Cuenca del Río Loa. Universidad Católica. 1970	2-2
2.1.3. Proyecto CHI-535: Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande. CORFO. 1977	2-3
2.1.4. Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Embalse Conchi – Río Loa. MOP, Dirección de Riego. 1979	2-3
2.1.5. Evolución Isotópica en Ríos del Norte de Chile. Universidad de Chile. 1983	2-4
2.1.6. Análisis Crítico de la Red Fluviométrica Nacional: Red de Calidad de Aguas, I y II Región. BF Ingenieros Civiles. 1984	2-4
2.1.7. Análisis Crítico de la Red Fluviométrica Nacional: II Región. DGA. 1985	2-5
2.1.8. Balance Hidrológico Nacional: II Región. DGA. 1986	2-5
2.1.8.1. Precipitaciones	2-5
2.1.8.2. Temperatura	2-6
2.1.8.3. Escorrentía	2-6
2.1.8.4. Evapotranspiración	2-7
a) Evapotranspiración desde Cultivos.....	2-7
b) Evapotranspiración desde Superficies de Agua.....	2-7
c) Evapotranspiración desde Cauces	2-7
2.1.8.5. Balance Hídrico de la Cuenca del Río Loa.....	2-9
2.1.9. Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa: Contrato N° 218412-021. Agua Ingenieros Consultores. 1987.....	2-9
2.1.10. Catastro de Usuarios de Aguas de la Subcuenca del Río Salado, Afluente del Río Loa: II Región. DGA. 1991	2-10
2.1.11. Diagnóstico del Uso y Evaluación de los Recursos Suelo, Clima y Agua en Comunidades étnicas de la Provincia del Loa: Informe Final. Codelco División Chuquicamata. 1993	2-11
2.1.12. 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	2-11
2.1.13. Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile, 1997...	2-13
2.1.14. Pampa Puno: Aguas Subterráneas. GEOTEC Boyles BROS. 1999	2-13
2.1.15. Diagnóstico del Impacto Ambiental de la Minería en la Zona del Río Loa (II Región de Chile): Resultados de un Diagnóstico Geoambiental de la Cuenca del Río Loa (II Región): Informe Técnico Resumido. Erico Fritsh et al. 1999.....	2-14
2.1.16. Solicitud de Declaración de Agotamiento del Cauce Natural del Río Loa y sus Afluentes. Comunidad Atacameña San Francisco Chiu Chiu. 2000	2-14

2.1.17. Una Aproximación al Estudio Integral de la Contaminación del Río Loa, II Región, Chile: Periodo Marzo 1997 – Febrero 2000. Hugo Román, Carlos Valdovinos. 2001	2-14
2.1.18. Estudio Hidrológico del Río Loa – Sector Yalquincha junta con Río San Salvador. Fernando Peralta y Cía. Ltda. 2002.	2-16
2.1.19. Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa. MOP. 2003	2-16
2.1.20. Modelación Hidrogeológica Sector Pampa Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región de Antofagasta. MOP. 2003	2-17
2.1.21. Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea Factibles a Constituir en los Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región. DARH. 2003	2-18
2.1.22. Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cade-Idepe. 2004	2-18
2.1.23. Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Loa. DARH. 2005	2-19
2.1.24. Análisis de los Posibles Impactos por Extracción de Agua en el Acuífero de Calama. DGA. 2005	2-20
2.1.25. Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos. FAO. 2006	2-20
2.1.26. El Río Loa: Usos y Conflictos por el Agua en el Desierto de Atacama. Comunidades Indígenas, Mineras, Ciudades y Pueblos. Raúl Molina. 2006	2-21
2.1.27. Censo Nacional Agropecuario y Forestal. Instituto Nacional de Estadísticas. (Varios Años)	2-23
2.1.28. Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 2007	2-24
2.1.29. Declaración de Impacto Ambiental Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama, Optimización Operativa. 2007	2-26
2.1.30. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. Prammar Ambiental Consultores. 2008	2-26
2.1.31. 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	2-26
2.1.32. Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-Knight Piésold. 2010	2-27
2.1.33. Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012	2-29
2.1.33.1. Caracterización de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos..	2-30
2.1.33.2. Demandas Hídricas por Uso	2-30
2.1.33.3. Diagnóstico de Capacidad y Cobertura de la Infraestructura Hídrica..	2-34
2.1.34. Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Matraz. 2012	2-36
2.1.34.1. Descripción Geológica	2-36
2.1.34.2. Descripción Hidrogeológica	2-37
2.1.34.3. Modelo Conceptual	2-38
2.1.34.4. Modelo Numérico	2-39
2.1.35. Muestreo Químico e Isotópico. 2013	2-39
2.1.36. Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013	2-41
2.2. Información Facilitada por la DGA	2-41

2.3. Información Obtenida de Páginas Web Oficiales	2-48
3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	3-1
3.1. Reconocimiento en Terreno de la Cuenca	3-1
3.1.1. Estaciones Fluviométricas	3-1
3.1.2. Estaciones Meteorológicas	3-3
3.1.2.1. Zonas de Afloramiento	3-4
3.1.3. Evolución de la Conductividad Eléctrica	3-5
3.2. Descripción General de la Cuenca	3-11
3.3. Caracterización Pluviométrica de la Cuenca	3-15
3.3.1. Estaciones Meteorológicas Utilizadas	3-15
3.3.2. Metodología Utilizada y Resultados	3-19
3.3.2.1. Relleno y Extensión de Estadística	3-19
3.3.2.2. Curvas de Variación Estacional	3-19
3.3.2.3. Variación de la Precipitación Versus Altura	3-23
3.3.2.4. Curvas de Isoyetas	3-25
3.4. Caracterización Fluviométrica de la Cuenca	3-29
3.4.1. Estaciones Fluviométricas Utilizadas	3-29
3.4.2. Metodología Utilizada y Resultados	3-33
3.4.2.1. Caudales Medios Mensuales	3-33
3.4.2.2. Curvas de Variación Estacional	3-33
3.5. Estudio de Crecidas	3-36
3.6. Pérdidas y Recuperaciones	3-40
3.6.1. Tramos de Recuperación	3-44
3.6.2. Tramos de Pérdida	3-45
4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	4-1
4.1. Marco Geológico y Geomorfológico de la Cuenca del Río Loa	4-4
4.1.1. Marco Geomorfológico	4-4
4.1.2. Marco Geológico General	4-5
4.2. Marco Hidrogeológico de la Cuenca del Río Loa	4-11
4.2.1. Unidades Hidrogeológicas	4-11
4.2.1.1. Sector Loa Alto	4-11
4.2.1.2. Sector Loa Medio	4-19
4.2.1.3. Sector Loa Bajo	4-22
4.2.2. Caracterización de los Niveles Subterráneos en la Cuenca	4-25
4.2.2.1. Sector Loa Alto	4-25
4.2.2.2. Sector Loa Medio	4-36
4.2.2.3. Sector Loa Bajo	4-43
4.2.2.4. Niveles Subterráneos a Escala Cuenca	4-48
4.2.3. Parámetros Hidráulicos de los Acuíferos	4-49
4.2.3.1. Estudio CORFO (1977)	4-49
4.2.3.2. Estudio CODELCO-Agua Ingenieros Consultores (1987)	4-50

4.2.3.3.	Estudio DICTUC (2007)	4-51
4.2.3.4.	Estudio CODELCO-KNIGHT PIÉSOLD (2010)	4-52
4.2.3.5.	Estudio DGA-MATRAZ (2012)	4-53
4.2.3.6.	Estudio Mayco Consultores (2013)	4-54
4.2.3.7.	Parámetros Hidráulicos Considerados para el Presente Estudio	4-54
5.	SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE DERECHOS	5-1
5.1.	Información de Derechos en DGA	5-1
5.2.	Información de Derechos en CBR	5-6
6.	LEVANTAMIENTO DE DEMANDAS Y CONSUMOS	6-1
6.1.	Antecedentes Generales de la Campaña	6-1
6.2.	Levantamiento de la Información	6-2
6.3.	Captaciones Superficiales para Riego	6-3
6.4.	Captaciones Subterráneas	6-5
6.5.	Resultados de la Actividad en Terreno	6-6
6.6.	Conclusiones y Comentarios de la Actividad en Terreno	6-7
7.	MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE GLOBAL	7-1
7.1.	Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Loa	7-1
7.1.1.	Entradas del Sistema	7-1
7.1.1.1.	Precipitación	7-1
7.1.1.2.	Recarga y Escorrentía Total	7-7
7.1.2.	Salidas del Sistema	7-11
7.1.2.1.	Demandas Superficiales	7-11
7.1.2.2.	Demandas Subterráneas	7-12
7.1.2.3.	Evaporación Embalse Conchi	7-12
7.1.2.4.	Evaporación desde Cauces Superficiales	7-14
7.1.2.5.	Río Loa en Desembocadura	7-16
7.1.3.	Interacciones del Sistema	7-16
7.1.3.1.	Afloramientos y Recuperaciones	7-17
7.2.	Balance Global de la Cuenca	7-18
8.	DESARROLLO DEL MODELO INTEGRADO	8-1
8.1.	Cauces Superficiales	8-1
8.1.1.	Nodos	8-1
8.1.2.	Tramos de Río	8-9
8.1.3.	Caudal de Evaporación desde Cauces	8-10
8.1.4.	Distribución de las Aguas entre Nodos	8-11
8.1.5.	Estaciones Fluviométricas de Calibración	8-11
8.2.	Aportes desde Cuencas No Controladas	8-15

8.3. Acuíferos	8-19
8.3.1. Parámetros Geométricos y Elásticos	8-23
8.3.2. Condiciones Iniciales de Operación	8-23
8.3.3. Conectividad de los Acuíferos	8-24
8.4. Canales de Regadío	8-29
8.5. Zonas de Riego.....	8-33
8.5.1. Superficie de Riego.....	8-41
8.5.2. Evapotranspiración Potencial	8-41
8.5.3. Coeficiente de Cultivo.....	8-42
8.5.4. Evapotranspiración Real.....	8-44
8.5.5. Precipitación Efectiva.....	8-45
8.5.6. Cálculo de la Necesidad Neta Mensual	8-46
8.5.7. Percolación desde las Zonas de Riego	8-48
8.5.8. Derrames o Retornos	8-48
8.6. Embalse Conchi.....	8-49
8.7. Pozos de Bombeo	8-50
8.8. Captaciones Puntuales	8-53
8.9. Descargas Puntuales.....	8-55
9. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO INTEGRADO.....	9-1
9.1. Resultados Caudales Estimados en Estaciones Fluviométricas	9-2
9.2. Análisis de la Calibración Obtenida.....	9-18
9.3. Análisis de los Resultados del Modelo	9-20
9.3.1. Balances Obtenidos en los Acuíferos Modelados	9-20
9.3.2. Balances Obtenidos en las Zonas de Riego	9-22
9.3.3. Satisfacción Demanda Hídrica en Zonas de Riego	9-23
9.3.4. Análisis Volumétrico Embalse Conchi.....	9-24
9.3.5. Cumplimiento Caudal Ecológico Loa Medio y Bajo.....	9-25
9.4. Análisis de Sensibilidad de la Modelación.....	9-26
9.4.1.1. Análisis de Sensibilidad al Coeficiente de Percolación.....	9-27
9.4.1.2. Análisis de Sensibilidad al Coeficiente de Almacenamiento.....	9-27
10. CORRECCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO SUBTERRÁNEO	10-1
10.1. Descripción y Análisis del Modelo Subterráneo	10-1
10.1.1. Geometría del Modelo Matraz	10-2
10.1.2. Condiciones de Borde del Modelo Matraz	10-7
10.1.3. Parámetros Elásticos del Modelo Matraz.....	10-9
10.1.4. Recargas y Descargas del Modelo Matraz.....	10-10
10.1.5. Diagnóstico del Modelo Matraz	10-10
10.2. Reconstrucción del Modelo Subterráneo	10-11

10.2.1. Dominio del Modelo	10-11
10.2.2. Discretización Horizontal y Vertical.....	10-12
10.2.3. Parámetros Elásticos	10-13
10.2.4. Condiciones de Borde.....	10-17
10.2.5. Recargas.....	10-27
10.2.6. Descargas.....	10-29
10.2.7. Pozos de Observación y Pozos de Bombeo	10-30
10.3. Calibración del Modelo.....	10-35
10.3.1. Niveles Simulados versus Niveles Observados	10-35
10.3.2. Balance Hídrico en la Zona de Estudio	10-37
10.3.3. Curvas Equipotenciales	10-38
11. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	11-1
11.1. Escenario 1 – Derechos Superficiales al 100%	11-1
11.2. Escenario 2 – Derechos Subterráneos al 100%	11-2
11.3. Escenario 3 – Volumen Sustentable del Acuífero	11-4
11.3.1. Criterios Definidos por la DGA para Derechos de Agua	11-4
11.3.2. Determinación del Volumen Sustentable del Acuífero de Calama.....	11-4
11.3.2.1. Evaluación mediante Visual MODFLOW	11-5
11.3.2.2. Evaluación mediante MAGIC	11-7
11.3.3. Determinación del Volumen Sustentable en Otros Acuíferos	11-8
11.4. Escenario 4 – Eliminación de Descarga de Aguas Servidas.....	11-10
11.5. Escenario 5 – Traslado de Derechos de Lasana a Calama	11-10
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	12-1
12.1. Conclusiones Generales	12-1
12.2. Recomendaciones.....	12-3
12.2.1. Componente Hídrica Superficial	12-3
12.2.2. Componente Hídrica Subterránea	12-4

ANEXOS

ANEXO 2-1	Censo Nacional Agropecuario y Forestal
ANEXO 2-2	Volumen Embalsado Embalse Conchi
ANEXO 3-1	Fichas Terreno de Reconocimiento
ANEXO 3-2	Álbum Fotográfico Terreno Reconocimiento
ANEXO 3-3	Estadísticas de Precipitaciones Mensuales Rellenadas y Extendidas

ANEXO 3-4	Curvas de Variación Estacional de Precipitaciones
ANEXO 3-5	Estadísticas de Caudales Medios Mensuales Rellenadas
ANEXO 3-6	Curvas de Variación Estacional de Caudales
ANEXO 3-7	Estadísticas de Caudales Máximos Instantáneos Anuales Diarios
ANEXO 3-8	Estadísticas de Aforos
ANEXO 4-1	Estadística Histórica de Niveles Estáticos en Pozos DGA
ANEXO 5-1	Información de Derechos Superficiales
ANEXO 5-1.A	Derechos Otorgados de Aguas Superficiales. I Región
ANEXO 5-1.B	Derechos Otorgados de Aguas Superficiales. II Región
ANEXO 5-2	Información de Derechos Subterráneos
ANEXO 5-2.A	Derechos Otorgados de Aguas Subterráneas. I Región
ANEXO 5-2.B	Derechos Otorgados de Aguas Subterráneas. II Región
ANEXO 5-3	Información de Derechos en Trámite
ANEXO 5-4	Información Disponible en CBR Calama
ANEXO 6-1	Formato Encuesta Terreno Demandas y Consumos
ANEXO 6-2	Base de Datos Encuesta Demandas y Consumos
ANEXO 6-3	Encuestas Rellenadas Terreno Demandas y Consumos
ANEXO 6-4	Álbum Fotográfico Terreno Demandas y Consumos

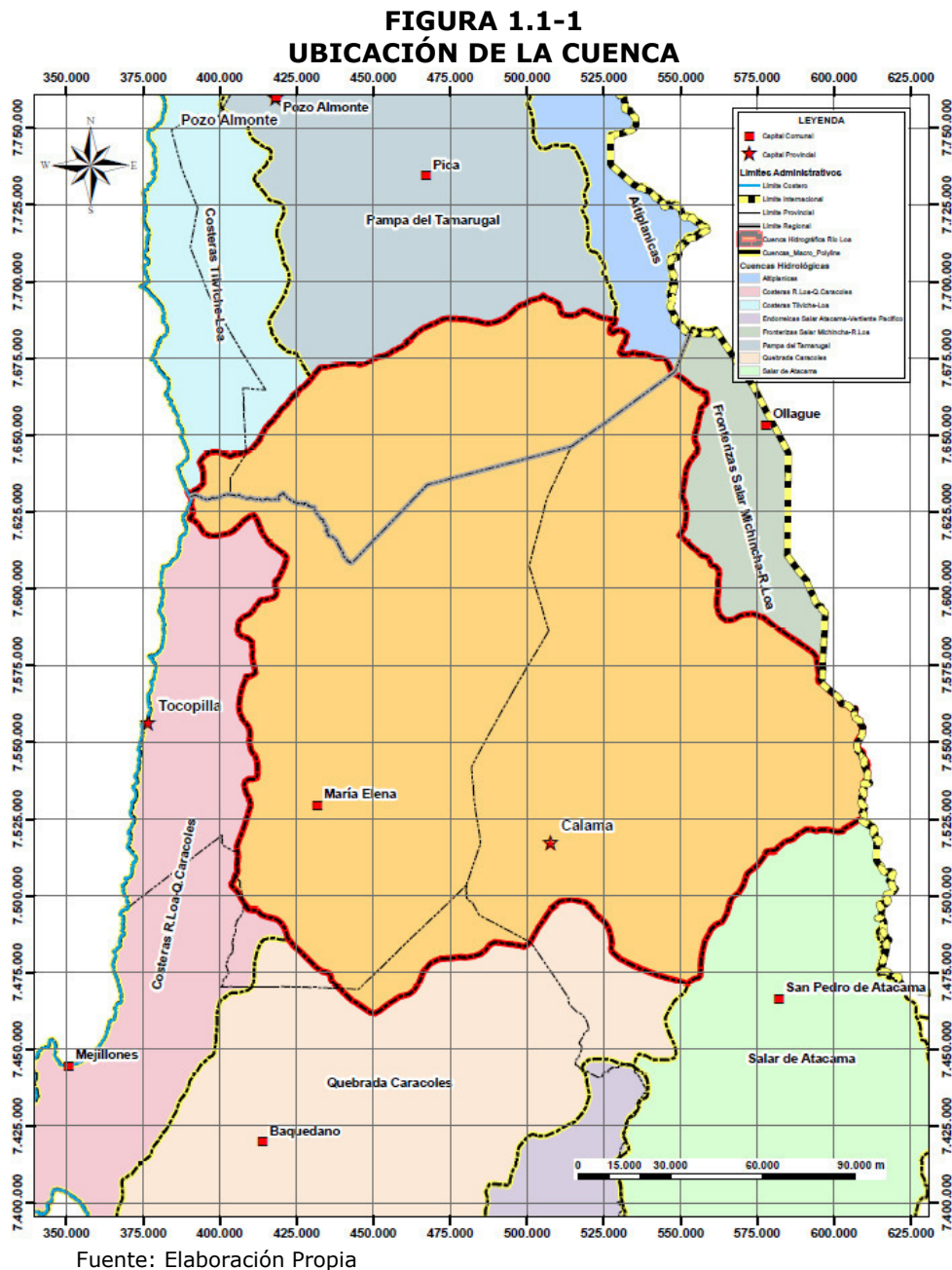
PLANOS

PLANO 4-1	Mapa Geológico Regional de la Cuenca del Río Loa
------------------	---

1. INTRODUCCIÓN

1.1. General

La cuenca hidrográfica del río Loa, con una extensión de 33.081 km², está ubicada en la II Región de Antofagasta, en la zona norte de Chile (Figura 1.1-1). El río Loa nace a los pies del volcán Miño y posee una dirección sur en su primer tramo hasta aproximadamente la localidad de Chiu-Chiu, donde comienza a doblar en dirección oeste hasta la junta con el río San Salvador. En este punto, el río Loa toma una dirección norte hasta el poblado de Quillagua, donde continúa hacia el oeste para finalmente desembocar en el Océano Pacífico.



En la cuenca se presentan 3 tipos climáticos: el de estepa de altura en la parte más alta (3.500 m s.n.m.) y oriental de la cuenca, subtipo climático desértico interior en la parte intermedia de la cuenca y el desértico costero con nublados abundantes en el plano occidental.

Los aportes de agua al río Loa son generados principalmente por las decenas de vertientes a lo largo de su trayecto, principalmente en su zona alta, mientras que sus afluentes principales corresponden a los ríos San Pedro, Salado y San Salvador junto a la quebrada Amarga. De los cauces anteriores, el río San Pedro es captado en su totalidad por la industria minera mediante extracciones superficiales y subterráneas, por lo que en la actualidad su aporte al río Loa es nulo.

A pesar de su gran longitud y área aportante, los recursos hídricos de la cuenca del río Loa son escasos debido a las condiciones desérticas y escasa precipitación. Por lo tanto, el uso del agua en la zona es de gran importancia para el desarrollo de la región, principalmente la industria minera que posee la mayor parte de los derechos de agua otorgados en la cuenca.

Considerando el consenso general existente en torno a la situación precaria de los recursos hídricos en la cuenca del río Loa, la Dirección General de Aguas (DGA) necesita contar con un Modelo Hidrológico Integrado actualizado que considere una modelación integrada de los recursos de agua superficial y subterránea, dada la interacción que existe entre ambas fuentes.

1.2. Objetivos

El objetivo general del estudio es disponer de una herramienta flexible de análisis y planificación, que permita evaluar situaciones de manejo del recurso hídrico en la cuenca y sea una ayuda en la toma de decisiones relacionadas con la gestión y el aprovechamiento integral y multisectorial de los recursos hídricos de la cuenca, tanto superficial como subterráneo.

Como objetivos específicos se identifican 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 de resultados sean de fácil interpretación y análisis.
- Actualizar 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

Se utilizará el programa MAGIC (Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas) desarrollado por la Dirección General de Aguas, el cual permite integrar la modelación de los recursos superficiales y subterráneos a nivel de cuenca. Este programa es de uso libre y posee todas las herramientas necesarias para la correcta modelación superficial de la cuenca y su interacción con los sectores acuíferos.

Este modelo será implementado, calibrado y validado con la información recopilada en las distintas fuentes de información, así como también la obtenida en los trabajos de terreno y la experiencia de este consultor.

Además se realizará la calibración en régimen permanente del modelo numérico del acuífero 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 BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estudios Revisados

A continuación se presentan los estudios relacionados con los recursos hídricos de la cuenca del río Loa que fueron revisados con motivo de la realización del presente informe. Parte de estos estudios fueron proporcionados por la DGA como parte de los antecedentes base asociados al estudio, mientras que otros fueron obtenidos desde otras entidades como el INE, Codelco, CORFO, etc.

2.1.1. Embalse Conchi. Absalon Monsalve M. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. 1969

Este estudio presenta las bases teóricas y técnicas del proyecto de construcción del embalse Conchi. Considera estudios hidrológicos del sector de emplazamiento en base a la estadística de las estaciones Conchi y Yalquincha, estima futuras pérdidas de caudal en el embalse y la demanda hídrica de la cuenca con el fin de generar un balance de agua que permite diseñar la capacidad del embalse y las obras asociadas.

Se compone de tres tomos que analizan respectivamente las variables que intervienen en la dimensión del embalse, el diseño hidráulico y estructural de las obras de toma y entrega finalizando con la especificación de las dimensiones y tipos de materiales a utilizar en cada una de las obras complementarias.

La información extraída de este estudio fueron las curvas que relacionan el volumen embalsado a la altura de agua y superficie abarcada. Los datos con los cuales se construyen se presentan en el Cuadro 2.1-1.

**CUADRO 2.1-1
RELACIONES A VOLUMEN EMBALSADO DE EMBALSE CONCHI**

Cota (m s.n.m.)	Altura (m)	Superficie (m ²)	Volumen Embalsado (m ³)	Volumen Embalsado (Hm ³)
2.922	0	0	0	0
2.925	3	3.200	0	0
2.930	8	11.900	38.000	0
2.935	13	24.900	130.000	0
2.940	18	53.900	327.000	0
2.945	23	92.400	692.000	1
2.950	28	150.300	1.299.000	1
2.955	33	208.300	2.195.000	2
2.960	38	298.000	3.461.000	3
2.965	43	404.000	5.216.000	5
2.970	48	536.500	7.567.000	8
2.975	53	719.200	10.707.000	11
2.980	58	956.000	14.895.000	15
2.985	63	1.245.600	20.399.000	20
2.990	68	1.691.800	27.742.000	28

Fuente: Elaboración Propia en base a Embalse Conchi, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. 1969

2.1.2. Modelo Hidrológico y de Constitución Química de la Cuenca del Río Loa. Universidad Católica. 1970

Este estudio corresponde a una tesis para optar al título de ingeniero civil y fue realizado con el fin de conocer los recursos existentes en la cuenca del río Loa, tanto en cantidad como en calidad, para lo cual se desarrolló un modelo hidrológico de calidad química de las aguas.

El estudio presenta una descripción geológica completa de la cuenca y una descripción de su funcionamiento, considerando captaciones, ubicación de zonas de riego, usos de las aguas, etc. Toda esta información resulta de gran importancia para la implementación del modelo MAGIC para periodos de tiempo lejanos.

Además, referente a la información fluviométrica, se presenta información de puntos de monitoreo con registro continuo, aforos mensuales y aforos esporádicos. A pesar de su antigüedad, esta información puede ser de utilidad para evaluar zonas de descarga y recuperación. También se presenta información de crecidas observadas para distintos años, presentando valores estimados, pero no asociados a ningún periodo de retorno en particular.

Las principales captaciones de agua mencionadas en el estudio corresponden a aducciones para abastecimiento de agua potable en distintas localidades, uso minero y salitreras, tal como se menciona a continuación:

- Cañería del Ferrocarril de Antofagasta a Bolivia (140 l/s).
- Canaleta a Tocopilla (140 l/s).
- Aducción de la Chilex en Línzor (50 l/s).
- Gran Aducción de Toconce (460 l/s).
- Aducción de Inacaliri (119 l/s).
- Aducciones de San Pedro (180 l/s).
- Aducción del Río Salado (520 l/s).
- Aducciones de las Salitreras (245 l/s).

En cuanto a los sectores de riego, el estudio analiza las localidades de Lasana-Chiu Chiu, Calama y Quillagua, estimando los consumos de agua de canales, las recuperaciones y en consumo neto para riego, lo que se muestra en el Cuadro 2.1-2.

**CUADRO 2.1-2
USO DE AGUA EN RIEGO**

Sector	Gasto Canales (m³/s)	Recuperaciones (%)	Tasa de Riego (l/s/Ha)
Lasana - Chiu Chiu	1,79	70	1,5
Calama	2,70	33	1,8
Quillagua	0,18	-	1,5

Fuente: Modelo Hidrológico y de Constitución Química de la Cuenca del Río Loa. Universidad Católica. 1970

Finalmente, el estudio realizó un modelo hidrológico y de balance másico para analizar la calidad de las aguas en distintos puntos de los cauces en la cuenca del río Loa. Esta

información no ha sido utilizada, dado que el enfoque del presente estudio no considera la calidad de las aguas.

2.1.3. Proyecto CHI-535: Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande. CORFO. 1977

Este estudio lo componen 19 volúmenes de informes técnicos, los cuales presentan un análisis detallado cubriendo aspectos tales como meteorología, hidrología, hidrogeología, geología, entre otros, centrándose exclusivamente en la zona del Norte Grande de nuestro país. En particular, la zona de estudio definida la constituyen las cuencas de los ríos Loa y sus afluentes río San Pedro Inacaliri, Salado y San Salvador, y la cuenca endorreica del Salar de Atacama.

Dentro de todos estos informes técnicos desarrollados, resulta de utilidad la información geológica e hidrogeológica generada para los sectores de Ojos de San Pedro en la cuenca del río San Pedro Inacaliri y de Turi ubicada esta última en la cuenca del río Salado. En particular, se entregan datos relevantes en cuanto a información litológica y estratigráfica de pozos construidos en dichos lugares, resultados de pruebas de bombeo que permitieron la determinación de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos identificados, resultados de análisis químicos efectuados a aguas superficiales y subterráneas, entre otros. Todo lo anterior permite definir el marco hidrogeológico representativo de la parte alta de la cuenca del río Loa, cuyo análisis se realiza con mayor detalle en el Capítulo 4 del presente estudio denominado Caracterización Hidrogeológica.

2.1.4. Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Embalse Conchi – Río Loa. MOP, Dirección de Riego. 1979

Este estudio analiza el sistema hídrico conformado por el embalse Conchi construido en el año 1975 y el río Loa y sus principales afluentes, mediante la elaboración de un modelo matemático de simulación que permitió representar las variaciones que experimenta el caudal del río Loa en determinados puntos. Para lograr reproducir lo anterior se incluyeron fenómenos naturales hidrológicos tales como pérdidas y recuperaciones de caudal; las entregas del embalse Conchi y las extracciones de agua para fines tanto agrícolas como no agrícolas (industriales y agua potable). Este modelo permitió además la estimación de las entregas requeridas desde el embalse, los déficit de riego en cada una de las zonas agrícolas consideradas de Lasana, Chiu Chiu, Calama y Quillagua; las extracciones efectivas de riego en cada una de ellas, los estados del embalse y los porcentajes de superficies cultivadas posibles de regar y un índice de calidad del agua a la entrada de la zona de riego de Calama.

También se integró a este modelo, una regla de operación para el embalse Conchi a modo de lograr una distribución óptima de los escasos recursos hídricos disponibles en esta cuenca hidrográfica. Dentro de la regla de operación del embalse se determinaron parámetros tales como volúmenes de control de crecida, factores de penalidad de las demandas de riego y determinación de las entregas mensuales.

Como trabajo previo a la implementación de este modelo, se recopiló y procesó información pluviométrica y fluviométrica a nivel medio mensual tanto en régimen natural como observado, lo que permitió posteriormente el desarrollo de un método de pronóstico de caudales durante la temporada de riego y un período anterior a ella, tanto para los ríos Loa en Conchi como Salado en Ayquina.

Se llevó a cabo análogamente una caracterización hidrológica de las crecidas registradas y un análisis del efecto de su propagación en los cauces y a través del embalse Conchi.

Por otro lado, se estimaron las demandas para el año 1978 que tendrían incidencia en el sistema embalse Conchi y aquellas que podrían plantearse ante un escenario de extracción futura. Dentro de las demandas consideradas se incluyeron tanto las destinadas a un uso agrícola como las del tipo no agrícola (industrial y agua potable). Para las demandas agrícolas se estimaron tasas de riego y evapotranspiración, y también eficiencias de riego para cada una de las localidades de riego consideradas.

Por consiguiente toda esta información relativa al funcionamiento del embalse ha sido considerada en el modelo integrado de la cuenca para la correcta representación del Embalse Conchi.

2.1.5. Evolución Isotópica en Ríos del Norte de Chile. Universidad de Chile. 1983

En este estudio se analiza la isotopía de las aguas de los ríos Tarapacá y Loa en términos de Oxígeno-18, Deuterio, Carbono-13 y Carbono-14.

En particular para el río Loa, el análisis permite diferenciar los contenidos isotópicos de cada cauce y asociarlos con el comportamiento real de la cuenca. Sin embargo, la información proporcionada en este informe no es de relevancia para el presente estudio.

2.1.6. Análisis Crítico de la Red Fluviométrica Nacional: Red de Calidad de Aguas, I y II Región. BF Ingenieros Civiles. 1984

En este estudio, realizado por BF Ingenieros Civiles para la DGA en 1984, se realizó un análisis crítico de la red de medición de calidad de aguas de esa fecha y además se propuso una red primaria de estaciones para el futuro.

Para esto, se realizó una recopilación de antecedentes de calidad de aguas de la DGA, IREN-CORFO y universidades. De estos, sólo la información de la DGA fue procesada, ya que es la única que cuenta con registros sistemáticos. El resto de la información fue utilizada en forma referencial.

El procesamiento correspondió a un análisis de la continuidad y frecuencia de los muestreos, de distintos parámetros. Además, se realizó un análisis temporal y espacial de la información, el cual resultó poco representativo debido a que la información no presenta una cobertura temporal suficiente, salvo escasas excepciones y las estaciones que presentan una buena cobertura temporal no acusa ninguna tendencia clara de variación en la calidad. Sólo se observa fluctuaciones de naturaleza aleatoria.

Posteriormente, considerando el grado de desarrollo y el uso de suelos existente en cada cuenca y la calidad de las aguas, se define la necesidad de información de calidad de agua y se estima cuál es la red de estaciones de muestreo que permite obtener esta información a un costo razonable.

Parte de la información anterior, y especialmente lo referente al uso de suelo y grado de desarrollo de las cuencas, han sido considerados en la implementación del modelo a desarrollar en el presente estudio.

2.1.7. Análisis Crítico de la Red Fluviométrica Nacional: II Región. DGA. 1985

En este estudio, realizado por la DGA en 1985, se realizó un análisis crítico de la red de medición fluviométrica de esa fecha y además se propuso una para el futuro.

Se basó en la revisión de estudios existentes, visitas a terreno e información proporcionada por la Oficina Regional. En particular, los antecedentes recopilados desde este estudio son los siguientes:

- Descripción de la hidrografía de la cuenca del río Loa.
- Descripción del clima de la cuenca del río Loa.
- Isoyetas anuales promedio del sector de la cuenca del río Loa.
- Diagrama unifilar de fuentes y centros de consumo urbanos e industriales en la cuenca del río Loa.
- Canales y respectivas áreas de riego, en el sector.

Debido a la antigüedad de este estudio, sus datos son utilizados como referencia, priorizando la información más actual.

2.1.8. Balance Hidrológico Nacional: II Región. DGA. 1986

En este estudio, realizado por la DGA en 1986, se entregaron los componentes del balance hídrico por cuencas, a nivel anual, considerando un período de tiempo suficientemente representativo. Para esta región, el período de tiempo escogido contempla los años hidrológicos entre 1961/62 y 1980/81.

En este estudio se analizaron las precipitaciones, la evapotranspiración y la esorrentía. Además se realizó un análisis de las extracciones de agua en la cuenca.

2.1.8.1. Precipitaciones

En esta región se dispone de registros pluviométricos continuos desde 1969/70 en adelante y con registros discontinuos en años anteriores. Por esta razón, el período escogido para representar los valores medidos fue el comprendido entre 1961/62 al 1980/81, en años hidrológicos entre mayo y abril. A la estadística que se tiene, se le realizó un proceso de relleno, extensión y verificación de la estadística. Esta estadística no se incluye en este informe, debido a que se cuenta con un registro más actual de las precipitaciones en la zona.

Sobre la variación estacional de las precipitaciones, en esta región se distinguen claramente dos períodos de precipitación en el transcurso del año:

- Uno con ocurrencia durante los meses de invierno y que afecta la zona costera y Pampa del Tamarugal
- Otro con ocurrencia durante los meses estivales y que afecta la zona cordillerana, el cual es de gran importancia debido al aporte que realiza.

Con respecto a la relación de la precipitación y la altura, se observó que las precipitaciones disminuyen en sentido este-oeste y en el sentido norte-sur.

2.1.8.2. Temperatura

El régimen de temperaturas en esta región es el siguiente:

- Zona costera: Marcada homogeneidad a través de todo el año, como consecuencia del efecto moderador del océano, reflejada en una pequeña amplitud del ciclo diario y del ciclo estacional.
- Zona de la Pampa: La escasa humedad atmosférica y los intensos intercambios radiativos diurnos y nocturnos imponen un régimen térmico con fuertes amplitudes diarias.
- Zona cordillerana: El régimen de temperatura tiene un marcado descenso con la elevación. También cabe mencionar que la procedencia de mayor proporción de humedad en el período estival, atenúa la amplitud estacional.

Con respecto a la relación entre la temperatura y la altura, se observó un aumento de la temperatura con la altura en los primeros 1400 m., siendo este fenómeno consecuencia de la acción de la inversión de subsidencia. Por encima de este nivel la temperatura disminuye con la elevación, con un gradiente medio de $-0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m.}$

2.1.8.3. Escorrentía

El análisis de la escorrentía superficial se realizó a base a la estadística de esa época, de las estaciones fluviométricas de la Región. Esta información está compuesta de registros continuos y aforos aislados.

La estadística fue corregida a régimen natural para extracciones no agrícolas y considerando la situación anterior a la construcción del embalse Conchi. Posteriormente, la estadística fue rellenada en forma mensual y anual, y extendida sólo en el caso de los caudales medios anuales.

Con el objetivo de poder corregir la estadística a régimen natural, se evaluaron las extracciones que sufre la región.

Estas extracciones se concentran en la cuenca del río Loa, existiendo múltiples bocatomas para uso doméstico e industrial. Además existen trasvases de cuencas y se manifiesta en forma importante el efecto regulador del embalse Conchi.

A continuación, se presentan la estimación de las extracciones en la cuenca del río Loa:

- Río Siloli
- Río San Pedro
- Río Toconce
- Río Hojalar
- Río Salado Chico
- Río Loa Alto
- Río Loa Bajo
- Río San Salvador

2.1.8.4. Evapotranspiración

a) Evapotranspiración desde Cultivos

Niemeyer (1979) indica que la agricultura en la zona de estudio se ha mantenido en las últimas décadas más o menos estacionaria. Por lo tanto sus demandas de agua son también constantes, aceptándose su representatividad en el período de análisis.

El Cuadro 2.1-3 presenta las tasas de uso consuntivo, en las diferentes zonas consideradas de importancia, obtenidas a partir de antecedentes entregados en los estudios existentes y que se indican al pie de la tabla citada

**CUADRO 2.1-3
TASAS DE USO CONSUNTIVO POR ZONA**

Zona	Caudal Medio Anual	
	l/s/ha	l/s
Lasana	0,497 (1)	34,8
Chiu-Chiu	0,568 (1)	56,8
Turi	0,5 (3)	25
Calama	0,672 (1)	746
Quillagua	0,904 (1)	109
San Pedro de Atacama	0,5 (2)	500
Socaire	0,5 (3)	90
Tilomonte	0,5 (3)	20

Fuente: Balance Hídrico Nacional, II Región. DGA (1996)

- (1) Niemeyer, H. (1979)
- (2) CHI-535 (1978)
- (3) Valor estimado

b) Evapotranspiración desde Superficies de Agua

Para estimar la evaporación desde superficies de agua libre, se han utilizado los datos proporcionados por los tanques evaporimétricos tipo A.

Para obtener la evaporación desde un lago, es necesario multiplicar los resultados obtenidos en el tanque por un coeficiente de embalse menor que la unidad. Según experiencias realizadas en otros países, para valores medios anuales este coeficiente varía entre 0,7 y 0,8 para zonas húmedas, mientras que en zonas áridas fluctúa entre 0,5 y 0,7. Al no existir experiencias en la zona objeto del presente estudio, ha sido necesario adoptar un valor.

c) Evapotranspiración desde Cauces

La considerable longitud del cauce del río Loa y el alto poder evaporante de la atmósfera, inducen a pensar que la evaporación directa desde los cauces superficiales pueden ser significativas.

Para evaluar la evapotranspiración desde el cauce, se utiliza la evapotranspiración promedio de los distintos puntos de medición de tanques tipo A.

Considerando los objetivos de este estudio, se ha considerado que el efecto de pérdidas en el cauce por evapotranspiración adquiere importancia exclusivamente aguas abajo de la ciudad de Calama. Entonces, los caudales perdidos hacia la atmósfera en el cauce son los siguientes:

- Tramo Río Loa entre Chintoraste y la confluencia con el río San Salvador
L = 59 Km
ETR (cauce) = 136 l/s
- Tramo Río San Salvador
L = 56 Km
ETR (cauce) = 129 l/s
- Tramo Río Loa entre la confluencia con el río San Salvador y la desembocadura al mar
L = 163 Km
ETR (cauce) = 375 l/s

2.1.8.5. Balance Hídrico de la Cuenca del Río Loa

El Cuadro 2.1-4, presenta el balance hídrico obtenido para las subcuencas de la cuenca del río Loa.

**CUADRO 2.1-4
BALANCE HÍDRICO POR SUBCUENCA DEL RÍO LOA**

Subcuenca	Sección Control		Precipitación	Escorrentía	Evapotranspiración	Error
	Aguas Abajo	Aguas Arriba	l/s	l/s	l/s	l/s
San Pedro	Parshall 1	Siloli + Inacaliri	2,849	412	2,438	-1
	Antes Loa	Siloli + Inacaliri	4,019	461	3,562	-4
Salado	(1)	-	5,232	1,280	3,995	-43
	Antes Loa	(1)	5,425	540	4,938	-53
	Antes Loa	-	10,667	1,820	8,930	-83
Loa Alto	Loa en Lequena	-	8,833	533	8,212	+88
	(2)	-	23,527	3,164	20,710	-347
Loa Intermedio	Loa después Junta con San Salvador	(2)	8,744	-404	9,261	-113
	Loa después Junta con San Salvador	-	32,584	2,760	29,985	-161
Loa Bajo	Loa en Desembocadura	Loa después junta con San Salvador	9,975	580 (4)	9,029	+432 (4)
	Loa en Desembocadura	-	42,559	3,268 (3)	39,014	+277

Fuente: Balance Hídrico Nacional, II Región. DGA (1986)

- (1) Secciones de Control: Toconce + Hojalar + Caspana + Curti + Salado Chico.
- (2) Secciones de Control: Loa en Lequena + San Pedro de Inacaliri antes Loa + Salado Antes de Loa.
- (3) Calculado restando la evapotranspiración estimada a la precipitación.
- (4) La escorrentía según la fórmula de Turc es de 940 l/s, la cual se divide en 508 l/s generados en la cuenca y 432 l/s como error de cierre.

2.1.9. Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa: Contrato N° 218412-021. Agua Ingenieros Consultores. 1987

Este estudio hidrogeológico se desarrolló en un área acotada correspondiente a la cuenca del río San Pedro y tuvo como objetivo principal la evaluación de los recursos hídricos subterráneos en las zonas de San Pedro-Inacaliri y quebrada Perdiz-Pampa Perdiz para poder así estimar las cantidades de agua que pueden ser captadas de forma permanente y segura en dicho sector por CODELCO.

Esta referencia entrega información tanto geológica como hidrogeológica a partir de prospecciones geofísicas, levantamientos geológicos de superficie y la construcción de varios sondajes estratigráficos y ejecución de un sin número de pruebas de bombeo. Todos estos antecedentes permitieron la elaboración de un sólido marco hidrogeológico que permitió una adecuada caracterización de las unidades acuíferas identificadas en el área de estudio, se definieron valores de parámetros hidráulicos para sistema acuífero analizado y se determinó la extensión y potencia de los distintos acuíferos encontrados. En el Cuadro 2.1-5, se adjunta los valores de transmisibilidades y coeficientes de almacenamiento estimados a partir de pruebas de bombeo llevados a cabo en sondajes.

**CUADRO 2.1-5
VALORES DE TRANSMISIBILIDADES Y COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO EN
POZOS UBICADOS EN CUENCA DE SAN PEDRO DE INACALIRI**

Sondaje	Transmisibilidad (m²/día)	Coficiente Almacenamiento
CHU-1	40.000	-
CHU-6	3.000	0,0029
CHU-10	10.000	0,0014
CHU-10B	3.000	-
CHU-17	85.000	0,0031
CHU-18	100.000	0,0022
B-2	105.000	-

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

Paralelamente, se obtuvieron muestras de aguas en el sector estudiado las cuales se les realizó un análisis químico y sólo a un conjunto de ellas se les efectuó un análisis isotópico para determinar contenidos de Oxígeno-18, Deuterio (H-2), Carbono-14 y Azufre-34. Lo anterior con la finalidad de establecer interconexiones de los flujos subterráneos entre la zona de interés y cuencas vecinas, así como también chequear la existencia de flujos regionales.

Finalmente este estudio, realizó una estimación de los caudales subterráneos entrantes y salientes del área de estudio, los cuales resultaron ser iguales a 1.000 l/s y 110 l/s, respectivamente. Análogamente, se determinó un volumen de agua subterránea almacenada cercano a los 860 Mm³.

Este estudio proporciona información relevante para la caracterización hidrogeológica que la zona alta de la cuenca, además de parámetros necesarios para la representación de los acuíferos en el modelo MAGIC.

2.1.10. Catastro de Usuarios de Aguas de la Subcuenca del Río Salado, Afluente del Río Loa: II Región. DGA. 1991

Este catastro ofrece un recabado análisis sobre la infraestructura de riego existente en la cuenca del río Salado, detallando la red de canales de regadío (a nivel matriz, derivado, subderivado y subderivado), la superficie asociada a cada uno, longitudes, diagramas unifilares, descripción de las obras de captación, etc.

Esta información fue considerada al momento de definir la red de canales dentro del Modelo Conceptual e Integrado en MAGIC focalizado en el sector de la cuenca del río Salado, así como también en las labores de Levantamiento de Demandas y Consumos.

2.1.11. Diagnóstico del Uso y Evaluación de los Recursos Suelo, Clima y Agua en Comunidades étnicas de la Provincia del Loa: Informe Final. Codelco División Chuquicamata. 1993

Este estudio fue encomendado por Codelco División Chuquicamata con el objetivo de evaluar los recursos naturales de la cuenca del Loa desde un punto de vista agropecuario y hacer un diagnóstico de su uso actual.

Si bien la información más relevante en relación con el presente informe se encuentra en la evaluación del recurso agua, en que se analizó la infraestructura, métodos de riego, y balance hídrico, ésta no pudo ser revisada debido a que el volumen asociado a esta temática (Volumen 2) no se encuentra disponible. Debido a lo anterior, este estudio no fue considerado.

2.1.12. 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

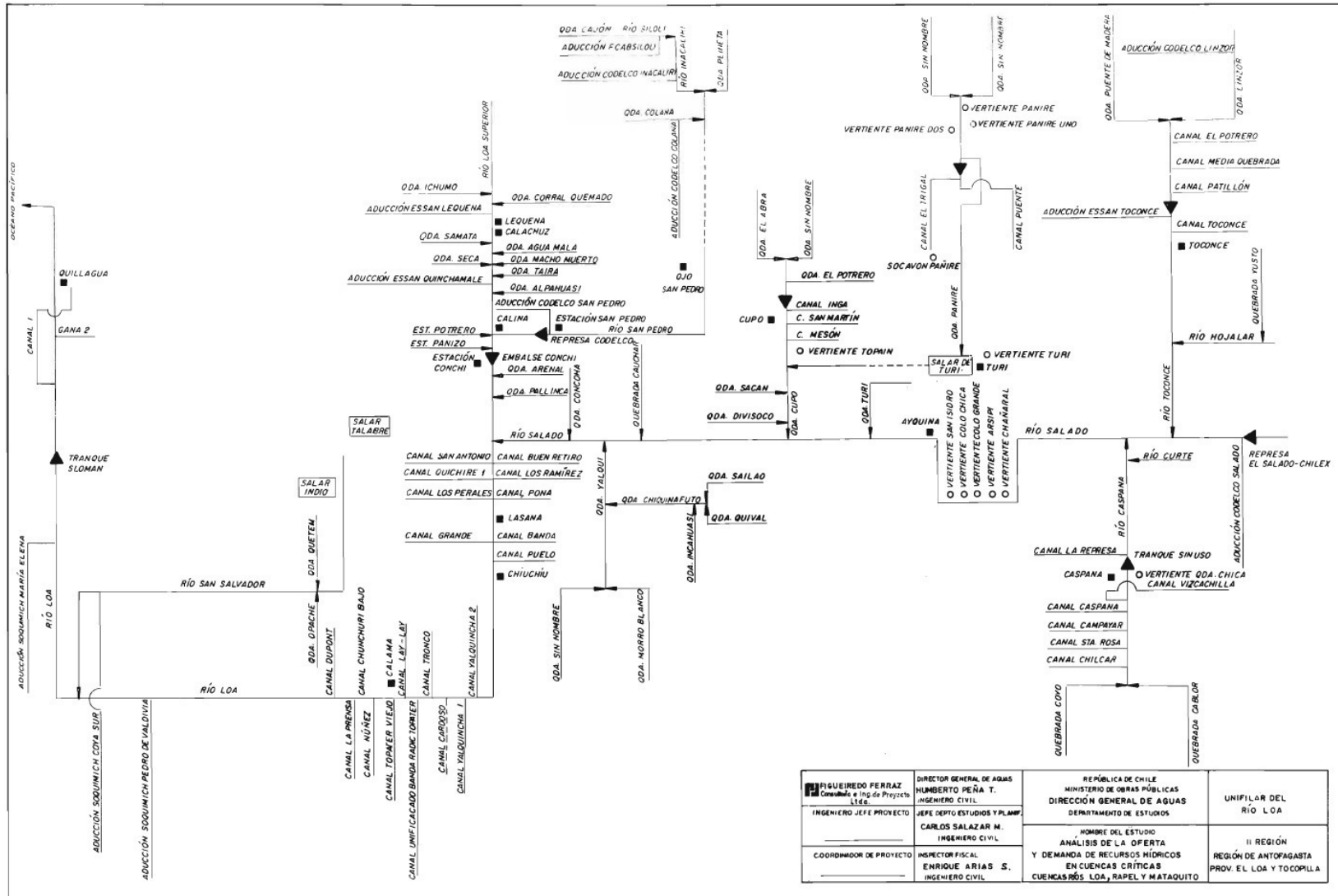
Este estudio tuvo como objetivo general efectuar un análisis de los recursos hídricos en la cuenca del río Loa, con el fin de entregar herramientas a la autoridad de la época para declarar el agotamiento de los recursos hídricos superficiales de la cuenca.

Para esto, se evaluó la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca, se efectuó un estudio de la demanda asociada, así como un análisis del aprovechamiento de los recursos hídricos basado en la infraestructura de canales existente.

Este trabajo presenta, para la cuenca del río Loa, en particular para cada una de las subcuenca conformantes (río San Pedro, San Salvador y Salado), un análisis de la infraestructura de canales, su dimensionamiento, caudal máximo de explotación y de derechos, además de la situación jurídica de sus usuarios. Además, elaboró un diagrama unifilar de la red hídrica del río Loa, el cual se presenta en la Figura 2.1-1. La información de este diagrama es útil con respecto a la red de canales considerada y su ubicación espacial.

Todos estos resultados fueron considerados, principalmente en las labores de Levantamiento de Demandas y Consumos y en la implementación del modelo integrado empleando la herramienta MAGIC.

**FIGURA 2.1-1
UNIFILAR RÍO LOA**



Fuente: Análisis de la Oferta y Demanda de Recursos Hídricos en Cuencas Críticas de Loa, Rapel y Mataquito. Figuerido Ferraz Consultoría e Ingeniería de Proyecto. 1996.

2.1.13. Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile, 1997.

Estudio realizado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) de acuerdo a lo solicitado por la Comisión Nacional de Riego (CNR). El estudio presenta valores para la evapotranspiración potencial en todo Chile por medio del método de Penman, el que mejor se ajusta a la diversidad de climas del país, con el objetivo de unificar este valor que presenta alta variabilidad dependiendo del método de cálculo.

El informe entrega el valor de la evapotranspiración potencial total mensual, calculada de acuerdo a la estadística registrada en diferentes estaciones meteorológicas del país. Dentro de la cuenca del río Loa se presentan valores para las estaciones presentadas en el Cuadro 2.1-6.

CUADRO 2.1-6
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (mm/mes)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Parshall 2	288	307	320	344	326	299	332	291	299	285	265	270
Inacaliri	252	270	246	234	194	152	175	162	184	230	232	251
Embalse Conchi	316	292	279	331	315	292	300	298	313	345	358	333
Linzor	161	171	156	165	143	106	120	139	134	177	195	190
Turi	135	144	81	118	110	72	71	88	113	146	153	132
Caspana	262	285	258	281	280	278	293	322	321	345	346	302
Chiuchiu	327	344	322	352	357	331	336	359	368	397	386	359
Calama	294	287	285	308	317	309	300	323	329	352	354	341
Aeródromo El Loa	187	163	167	123	102	86	93	109	133	164	178	198

Fuente: Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile. CNR (1997).

2.1.14. Pampa Puno: Aguas Subterráneas. GEOTEC Boyles BROS. 1999

Este documento corresponde al informe técnico de construcción y prueba de bombeo de los sondajes PUNO-314B y PUNO-6B, los cuales forman parte de la solicitud de aprovechamiento de aguas subterráneas de ambos.

La prueba de bombeo de gasto constante para el sondaje PUNO-314B se realizó en repetidas ocasiones, logrando finalmente un caudal de explotación de 5 l/s con un descenso de 81,29 m. En cuanto al sondaje PUNO-6B, éste mostró una mayor potencia del acuífero, logrando un caudal de 50 l/s con un descenso máximo de 60,16 m.

La información presente en estos estudios sirve como base para establecer las propiedades hidráulicas de un posible acuífero ubicado en el sector alto de la cuenca del río Loa.

2.1.15. Diagnóstico del Impacto Ambiental de la Minería en la Zona del Río Loa (II Región de Chile): Resultados de un Diagnóstico Geoambiental de la Cuenca del Río Loa (II Región): Informe Técnico Resumido. Erico Fritsh et al. 1999

Este estudio se enfoca en el esclarecimiento de un evento de contaminación ocurrido en 1997 en el río Loa, detectado en el sector de Tranque Sloman.

Para este efecto se analizaron diferentes elementos contaminantes en las aguas de los cauces de la cuenca mediante análisis de calidad de las aguas. Además se realizaron análisis químicos de suelos y sedimentos, concluyéndose finalmente que el episodio tuvo un origen natural.

Dado que el informe se enfoca en la calidad de las aguas, sus resultados no proporcionan información relevante para el desarrollo del presente estudio.

2.1.16. Solicitud de Declaración de Agotamiento del Cauce Natural del Río Loa y sus Afluentes. Comunidad Atacameña San Francisco Chiu. 2000

Este informe presenta toda la documentación asociada y presentada para la solicitud de declaración de agotamiento del cauce natural del río Loa y sus afluentes desde el año 1998 hasta principios del año 2000, cuando esta solicitud fue aceptada.

Como parte de la documentación disponible, se presenta un informe técnico complementario que realiza un análisis de la disponibilidad de agua en la cuenca en régimen natural (Cuadro 2.1-7), y un análisis de los derechos de aguas otorgados y en trámite a 1998, con lo cual se realiza un balance de aguas que refleja el agotamiento de la cuenca (Cuadro 2.1-8). Estos valores sirven como referencia en cuanto al total de derechos captados desde la cuenca.

2.1.17. Una Aproximación al Estudio Integral de la Contaminación del Río Loa, II Región, Chile: Periodo Marzo 1997 – Febrero 2000. Hugo Román, Carlos Valdovinos. 2001

Este documento corresponde a un paper enfocado en determinar el origen de la contaminación del río Loa ocurridos en 1997 y 2000, y determinar las variaciones espaciales y temporales de dicha contaminación.

Debido al enfoque de calidad de aguas del estudio, este no proporciona información relevante para el presente informe.

**CUADRO 2.1-7
DISPONIBILIDAD HÍDRICA RÍO LOA RÉGIMEN NATURAL**

Estación	Subcuenca	Caudal (l/s)		
		Mínimo	Máximo	P. Anual
Río Loa antes Represa Lequena	Río Loa	410	510	490
Río Loa en Conchi	Río Loa	1.580	1.860	1.760
Río Loa en Yalquincha	Río Loa	3.430	4.000	3.990
Río Loa en Quillagua	Río Loa	60	1.150	520
Río Loa en Parshall N° 1	Río San Pedro	960	1.010	990
Río Salado en Sifón Ayquina	Río Salado	1.240	1.340	1.300
Río Inacaliri	Río San Pedro	710	740	740
Río Colona	Río San Pedro	170	180	180
Río Siloli	Río San Pedro	80	80	80
Quebrada Opache	Río San Salvador	60	60	60
Quebrada Quetena	Río San Salvador	90	100	90
Río Caspana	Río Salado	350	380	370
Río Toconce antes junta Salado	Río Salado	920	1.070	990
Quebrada Cupo	Río Salado	260	300	280
Quebrada Panire	Río Salado	270	320	290

Fuente: Informe Técnico Complementario, 2.1.14. Solicitud de Declaración de Agotamiento del Cauce Natural del Río Loa y sus Afluentes. Comunidad Atacameña San Francisco Chiu Chiu. 2000

**CUADRO 2.1-8
BALANCE HÍDRICO DE DERECHOS DE AGUA RÍO LOA (l/s)**

Río/Estación	Subcuenca/Sector	Q85%	Qec	Qot	Qtr	D
Siloli	San Pedro	80	9	162	0	-91
Inacaliri	San Pedro	740	84	119	0	537
Colana	San Pedro	180	21	60	0	99
S.P. Parshall N°1	San Pedro	990	113	879	0	-2
Caspana	Salado	370	40	66	0	264
Cupo	Salado	280	32	117	0	131
Panire	Salado	290	33	4	0	253
Toconce a/Salado	Salado	990	111	660	100	219
Salado en Sifón	Salado	1.300	141	1.292	100	-133
Q. Opache	San Salvador	60	7	0	0	53
Q. Quetena	San Salvador	90	11	0	0	79
San Salvador a/Loa	San Salvador	150	18	90	230	42
Loa	Lequena	490	57	587	126	-154
Loa	Conchi	1.760	195	1.766	126	-201
Loa	Yalquincha	3.990	426	4.414	259	-850
Loa	Quillagua	520	77	144	273	299

Fuente: Informe Técnico Complementario, 2.1.14. Solicitud de Declaración de Agotamiento del Cauce Natural del Río Loa y sus Afluentes. Comunidad Atacameña San Francisco Chiu Chiu. 2000

2.1.18. Estudio Hidrológico del Río Loa – Sector Yalquincha junta con Río San Salvador. Fernando Peralta y Cía. Ltda. 2002.

Este estudio fue realizado como parte del proceso de tramitación de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas por 719,1 l/s en 14 pozos del acuífero de Calama en el sector comprendido entre el río Loa, Calama, río San Salvador y vertiente Ojos de Opache.

El informe presenta información fluviométrica tanto en estaciones DGA como en puntos de aforo, la que puede ser utilizada para complementar y chequear los registros de la DGA. Además posee una recopilación de crecidas registradas en otros estudios, en los que se han observado caudales de hasta 90 m³/s en el río Loa.

Finalmente, se realiza un análisis de la relación acuífero río, reconociéndose posibles afloramientos en el río Loa de alrededor de 100 – 200 l/s en la sección entre Yalquincha y La Finca. Asimismo, se estiman afloramientos en el río San Salvador en su nacimiento y en la vertiente Ojos de Opache de entre 530 y 580 l/s.

2.1.19. Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa. MOP. 2003

Este estudio surge a raíz de la gran cantidad de solicitudes de derechos de agua subterránea en algunos sectores específicos de la cuenca del río Loa, entre los años 1999-2002, y tuvo como objetivo principal evaluar la disponibilidad de aguas subterránea en sectores específicos de la cuenca del río Loa y los efectos de una explotación subterránea intensificada sobre los recursos superficiales. Para esto, se integró la información existente a la fecha de realización del estudio y se desarrollaron los análisis correspondientes.

Los derechos subterráneos solicitados en la cuenca del río Loa se concentran en 3 sectores: en el acuífero de Calama, en Quebrada de León o sector de las vegas de Turi, y en la Pampa Llalqui, afluente por el sur a la confluencia de los ríos Loa y Salado. El estudio se enfocó en resolver, a la luz de los antecedentes existentes a la fecha, la situación de solicitudes de derechos en el acuífero Calama y en Pampa Llalqui.

Para cumplir con el objetivo principal, se realizó una investigación que consideró la hidrología, el balance hídrico, la hidroquímica y la geología de toda la cuenca del Loa desde un punto de vista general. Además, se implementó un modelo hidrogeológico aplicado sólo al sector de Calama que permitió definir la magnitud de los eventuales caudales subterráneos a extraer del acuífero del mismo nombre. Esto último puede ser relevante de considerar en el capítulo 4 referente a la "Caracterización Hidrogeológica".

El estudio presenta al inicio un marco geológico general de la cuenca del Loa, y una descripción también general del clima en la zona. Además, realiza un análisis hidroquímico general de la cuenca con el objetivo de establecer un marco geoquímico general de los principales acuíferos y su interacción con las aguas superficiales. Para esto, recopiló datos de parámetros físico-químicos desde distintos estudios efectuados en la zona.

A continuación de ello, el estudio desarrolla un balance hidrológico en régimen natural, que abarca toda la cuenca del río Loa y sus afluentes. Este análisis comienza con la caracterización y cuantificación de la precipitación y de la evapotranspiración en la

cuenca, y termina con la obtención de la cantidad de recurso disponible para escorrentía superficial y subterránea en cada subcuenca constitutiva.

Este balance, bastante sencillo y modesto en su desarrollo, sostiene como hipótesis que el principal aporte proviene desde las precipitaciones. Allí estima que para la cuenca del río Loa, el total del recurso hídrico aportado por precipitaciones es de 69 m³/s. Estima además, mediante la fórmula de Turc, que la evapotranspiración potencial en la cuenca del río Loa alcanza los 62,6 m³/s.

A partir de estos resultados, el estudio concluye que en la subcuenca del río Salado existe un caudal disponible por escorrentía de 6,41 m³/s.

Además, para cada subcuenca, el estudio desarrolla el balance de escorrentía versus usos en toda la cuenca. Para esto, el estudio recopiló los derechos superficiales y subterráneos existentes en las zonas de interés. De estos antecedentes y en el caso de sólo derechos superficiales éstos se contrastaron con los obtenidos en el documento citado en el punto 2.22 del año 2005, en donde se pudo constatar que existen discrepancias entre ambos, en cuanto a considerar uno u otro derecho. Sin embargo para el actual estudio, este consultor obtendrá la información de derechos directamente de la Dirección General de Aguas Regional con el objeto de analizar la condición actual de la demanda hídrica referente a derechos tanto superficiales como subterráneos efectivamente constituidos a nivel cuenca del río Loa.

Los derechos superficiales mencionados anteriormente y considerados en este estudio del año 2003, corresponden a usuarios sometidos a la jurisdicción de la Junta de Vigilancia del río Loa en formación y conforman un total de 5.501,3 l/s. Mientras que los subterráneos corresponden a un listado de derechos de aguas subterráneas en la cuenca del río Loa a Noviembre de 2002, de los cuales hasta esa fecha existían 2476,4 l/s asociados a derechos constituidos y 2016,1 l/s correspondientes a derechos solicitados.

El estudio, por otro lado, realizó una estimación de los factores de uso por riego, agua potable o minería en toda la cuenca del río Loa. Para el uso destinado a riego, se estimaron del orden de 1500 has regadas y un uso efectivo igual a 885,1 l/s. En el caso del uso por agua potable, el estudio concluye un factor de uso de 0,66 para toda la cuenca del Loa, mientras que en para usos mineros, este factor se estimó en 0,75. El estudio determinó además, valores de evaporación para los salares de Turi, Brinkerhoff, Rudolph, Talabre, Indio, Miraje y Llamara.

Mediante todos estos valores, se concluye, mediante un simple balance, que existiría una escorrentía superficial disponible en la cuenca del río Loa de 300 l/s efectivos.

Toda esta información fue utilizada de referencia para la generación del Modelo Conceptual.

2.1.20. Modelación Hidrogeológica Sector Pampa Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región de Antofagasta. MOP. 2003

Este estudio fue elaborado por el Departamento de Estudios y Planificación de la DGA con el objetivo de evaluar las posibles extracciones de agua subterránea en el sector de Pampa Llalqui y los posibles efectos asociados. Para ellos se construyó y calibró un modelo hidrogeológico numérico de la zona, el cual se utilizó para simular diferentes escenarios en régimen transiente.

El modelo numérico abarca desde el río Loa en junta con el río Salado hasta el río Loa en Angostura, incluyendo todos los pozos con derechos en trámite en Pampa Llalqui. El modelo considera tres capas: acuífero superior, acuitardo y acuífero inferior.

Los valores de permeabilidad adoptados en el modelo corresponden a aquellos obtenidos desde antecedentes disponibles y corregidos debido a la unificación de algunas formaciones en su representación numérica. Es así como el acuífero superior adoptó un valor de 5 m/día, mientras que el acuífero inferior fue simulado con una permeabilidad de 1 m/día. Finalmente, el estrato confinante posee un valor de 10^{-5} m/día.

En cuanto a las condiciones de borde, se considera una condición de caudal conocido, una condición de nivel constante y una condición de río.

Luego de calibrado, el modelo fue utilizado para simular 12 escenarios de explotación entre 31 y 399 l/s. Se concluye que es factible extraer 264 l/s del sistema, lo que permite mantener el aporte del almacenamiento en un 5% y valores razonables de disminución del caudal subterráneo de salida, de aporte al río Loa y de disminución de niveles freáticos.

Si bien los resultados de este estudio ya han sido considerados como antecedentes para estudios más recientes, los valores presentados en él se utilizaron como referencia principalmente en la implementación de los acuíferos y llenado de las tablas correspondientes para el modelo MAGIC.

2.1.21. Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea Factibles a Constituir en los Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región. DARH. 2003

Este estudio contiene una evaluación hidrogeológica de los sectores de Calama y Llalqui, junto con analizar las componentes hidrológicas e hidroquímicas de la zona. Además, presenta el estado de situación de las solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas que recaen en estos sectores.

Esta referencia permite, por un lado, obtener una visión general del marco hidrogeológico, hidrológico e hidroquímico de la zona, mientras que por otro lado entrega cuadros resumen de la demanda de agua subterránea y las solicitudes pendientes a su fecha de realización, información relevante para la elaboración del modelo conceptual proyectado en el actual estudio.

2.1.22. Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cade-Idepe. 2004

Este trabajo se encuentra inserto dentro del marco de una serie de estudios desarrollados por la empresa consultora CADE-IDEPE para la DGA, donde se define una propuesta técnica en términos de asignación de la calidad objetivo para los cursos y cuerpos de agua prioritarios del país. En concreto, este estudio analiza el caso de la cuenca del río Loa, y su objetivo general fue conocer la calidad natural y actual de las aguas; en particular, tipificar y segmentar los cursos y cuerpos de agua superficial para luego identificar aquellas aguas que presentan una calidad idónea para diversos usos: in situ, extractivos y para la preservación de la biodiversidad.

Dentro de las actividades para la elaboración de este estudio se reunieron antecedentes relacionados principalmente con: datos vectoriales (cartografía), clima, geología y vulcanismo, hidrogeología, geomorfología, suelos y usos de éstos, flora y fauna, asentamientos humanos, etc., con la meta de caracterizar y describir lo más generalmente posible la cuenca del Loa.

Análogamente, se creó una base de datos integrada que toma en consideración información fluviométrica, proporcionada por la DGA, y datos de calidad de aguas, recopilados de diversas fuentes. La información fluviométrica analizada en este estudio, permitió la estimación de curvas de variación estacional para distintas probabilidades de excedencia, a saber: 5, 10, 20, 50, 85 y 95%.

Entre las fuentes de calidad revisadas y anexadas a la base de datos realizado por CADE-IDEPE, es posible citar los siguientes: monitoreos de la DGA que van desde los años 1981 al 2002, el programa de muestreo del SAG entre los años 1997 y 2000, el programa de muestreo puntual llevado a cabo por la misma empresa consultora, entre otros estudios más.

Como se mencionó anteriormente, en este documento existen datos condensados de parámetros físico-químicos, inorgánicos, metales esenciales, metales no esenciales, microbiológicos, entre otros más, que fueron recopilados por monitoreos tanto de la DGA como del SAG y por un muestreo puntual ejecutado por CADE-IDEPE.

2.1.23. Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Loa. DARH. 2005

Este estudio tuvo como objetivo principal evaluar en forma global y detallada, a nivel de cuenca y subcuenca, la disponibilidad de recursos hídricos de la Cuenca del Río Loa. La determinación de la demanda el estudio se basó en trabajos realizados en las Direcciones Regionales DGA II, y en el Departamento de Administración de Recursos Hídricos, y considera el levantamiento de solicitudes presentadas en la Dirección General de Aguas hasta Septiembre de 2002.

El alcance de este estudio fue determinar la disponibilidad de recursos hídricos de ejercicio eventual en la cuenca de río Loa y servir como herramienta de apoyo en la resolución de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales.

El estudio enfatiza que tanto el río Loa como sus afluentes fueron declarados agotados mediante Resolución DGA N° 197 de fecha 24/01/2000. Por esto, sólo existe disponibilidad para constituir derechos de aprovechamiento consuntivos de ejercicio eventual. Además, se definió tanto para el río Loa como sus afluentes, el caudal ecológico asociado para cada uno de los tramos considerados.

Para efectos del presente estudio, esta referencia entrega una lista de derechos superficiales constituidos en la cuenca del río Loa, junto con un listado de derechos pendientes ingresados hasta junio de 2002 (tanto permanentes como eventuales). Incorpora además un balance de derechos eventuales en la cuenca.

Esta última información se utilizó al momento de analizar la demanda de recursos hídricos en la totalidad de la cuenca del río Loa en la etapa Levantamiento de Demandas y Consumos y su posterior incorporación al modelo a desarrollar en MAGIC.

2.1.24. Análisis de los Posibles Impactos por Extracción de Agua en el Acuífero de Calama. DGA. 2005

La fuente consultada, es un informe técnico elaborado por el Departamento de Estudios y Planificación de la DGA, el cual realizó una evaluación de la situación del acuífero de Calama para el año 2005 tendientes a esclarecer si las extracciones de agua subterránea autorizadas por la autoridad, pertenecientes a la Compañía Contractual Minera Leonor (CCML) y a la Compañía Minera Lomas Bayas (CMLB), han generado una disminución de los caudales de las vertientes aledañas al sector.

Para abordar dicha evaluación, se realizó un análisis estadístico en base a correlaciones entre los aforos mensuales de la DGA registrados en la vertiente Opache y los niveles piezométricos monitoreados en pozos de explotación de CCML ubicados aguas arriba de la vertiente anterior. Lo anterior tuvo por objeto la identificación algún tipo de relación entre las variables caudal de la vertiente Opache y el descenso piezométrico, comprobándose que efectivamente existía una fuerte correlación entre ambas variables.

Posteriormente, se llevó a cabo una modelación en Visual MODFLOW tomando como base el modelo implementado en el Informe Técnico DGA SIT N° 85 e incorporando los efectos:

- Desconexión hidráulica entre el acuífero superior e inferior del sistema Calama.
- Una escorrentía subterránea comparativamente mayor en el acuífero superior que en el inferior.
- El hecho de que el acuífero superior posee características anisotrópicas de origen cársticos que se reflejan en valores de conductividades hidráulicas de dos y tres órdenes de magnitud superiores en el sentido del flujo subterráneo.

Esta modelación tanto en régimen estacionario como transiente, tuvo como finalidad la realización de una evaluación general del sistema subterráneo y su respuesta frente a la explotación de los recursos hídricos subterráneos del sector.

En base a todo lo anteriormente desarrollado en este estudio de carácter público se llegó a la conclusión de que las extracciones efectuadas en el acuífero superior, rápidamente producen modificaciones en las descargas y en consecuencia se tiene una disminución de los caudales en las vertientes del sector y aguas abajo de éstos.

La utilidad de esta referencia en el presente proyecto, se orienta en la etapa denominada de Calibración del Modelo Subterráneo proporcionado por la DGA.

2.1.25. Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos. FAO. 2006

Publicación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO por sus siglas en inglés, que se enmarca en la serie de documentos de riego y drenaje. Presenta metodologías para el cálculo de la evapotranspiración de diferentes tipos de cultivos a partir de datos meteorológicos y coeficientes de cultivos. La gran variedad de condiciones climáticas aquí estudiadas dan la posibilidad de obtener los parámetros necesarios en el cálculo de las necesidades netas mensuales de las zonas de riego, definidas en el modelo MAGIC, bajo un importante grado de certeza al representar la zona de Calama.

2.1.26. El Río Loa: Usos y Conflictos por el Agua en el Desierto de Atacama. Comunidades Indígenas, Mineras, Ciudades y Pueblos. Raúl Molina. 2006

Este informe estudia la distribución de las aguas del río Loa para los diversos usos, además de los conflictos por su aprovechamiento e impactos que han ocurrido principalmente para las comunidades indígenas de la zona. Para ello, se analizaron y describieron las características del río Loa y la de sus tributarios. Estas descripciones permiten entender los mecanismos de distribución y usos de las aguas, tanto agrícolas, sanitarios y mineros-industriales y los intereses involucrados. Así también, el análisis permite dar cuenta de la localización de los conflictos sociales, territoriales, económicos y ambientales por el aprovechamiento de las aguas del río Loa y sus afluentes.

En este informe además, se hizo una relación pormenorizada de los derechos de aprovechamiento otorgados, con identificación de usos y de los respectivos titulares del derecho real de aprovechamiento, lo que permite tener un panorama del funcionamiento económico de la cuenca de interés y de las tensiones que se han provocado o se pueden provocar. También, se presenta un balance integrado de la distribución y participación en el aprovechamiento de las aguas por los distintos usuarios identificados. El trabajo también aborda un estudio descriptivo de cuatro casos que sirven para ilustrar la actual situación de las comunidades atacameñas y los impactos ambientales que se han provocado o pueden provocar como consecuencia de la ejecución de proyectos de captaciones de aguas en la cuenca.

Se presenta además, un resumen con las principales obras de captación, sus propietarios y los respectivos usos para lo cual están destinadas. Esta información se presenta a continuación en el Cuadro 2.1-9:

**CUADRO 2.1-9
OBRAS DE CAPTACIÓN, PROPIETARIO Y USOS DE AGUA**

RÍO LOA	OBRA DE INTERVENCIÓN	PROPIETARIO	USO Y DESTINO DE LAS AGUAS
Cuenca Superior	Captación Lequena	Empresa Sanitaria Aguas Antofagasta	Agua potable para ciudades de Calama, Antofagasta, María Elena Pedro de Valdivia, Tocopilla.
	Pequeño canal de riego en Taira	Comunidad Indígena Atacameña de Taira	Agrícola
	Captación Quinchamale	Empresa Sanitaria Aguas Antofagasta	Agua potable para ciudades de Calama, Antofagasta, María Elena Pedro de Valdivia, Tocopilla.
	Embalse Conchi	Dirección de Riego del Ministerio de Obras Públicas	Almacenamiento de aguas de riego y de CODELCO y regulación del caudal del río.
	Bocatomas de canales de riego de Lasana	Comunidad Indígena Atacameña de Lasana	Agrícola

**CUADRO 2.1-9
OBRAS DE CAPTACIÓN, PROPIETARIO Y USOS DE AGUA**

RÍO LOA	OBRA DE INTERVENCIÓN	PROPIETARIO	USO Y DESTINO DE LAS AGUAS
	Bocatomas de canales de riego de Chiu Chiu	Comunidad Indígena Atacameña de Chiu Chiu	Agrícola
Cuenca Intermedia	Bocatoma minera en Calama	S/I	Minero
	Bocatomas de canales de riego de Calama	Agricultores de Calama y Asociaciones Indígenas	Agrícola
	Captación Oficina Vergara	SOQUIMICH	Industrial
Cuenca Inferior	Captación María Elena	SOQUIMICH	Industrial
	Embalse Santa Fe	---	
	Embalse Sloman	Consejo de Monumentos Nacionales	Sin función, acumulación.
	Bocatomas de canales de riego de Quillagua	Agricultores y Comunidad Indígena de Quillagua	Agrícola
RÍO SAN PEDRO Y SUS AFLUENTES (Tributario del Loa en la cuenca alta)			
Río San Pedro	Embalse Chilex o San Pedro	CODELCO	Agua potable para Chuquicamata
Río Siloli	Captación cañería	Ferrocarril Antofagasta Bolivia FCAB	Agua Potable y abastecimiento minero
Río Siloli (en Inacaliri)	Captación cañería	CODELCO	Agua Potable para Chuquicamata
Río Inacaliri	Captación cañería	CODELCO	Agua potable para Chuquicamata
Río Colana	Captación cañería	CODELCO	Industrial-minero y agua potable
Río Cabana	Captación cañería	Azufera Cabana	Industrial
RÍO SALADO Y SUS AFLUENTES (Tributario del Loa en la cuenca alta)			
Río Salado	Captación cañería	CODELCO	Industrial-minero
Río Linzor	Captación cañería	CODELCO	Industrial-minero y bebida
Río Toconce	Captación cañería	Empresa Sanitaria Aguas Antofagasta	Agua potable
Río Toconce	Canales	Toconce	Agrícola
Río Caspana	Captación cañería	Empresa Sanitaria Aguas Antofagasta	Agua potable

**CUADRO 2.1-9
OBRAS DE CAPTACIÓN, PROPIETARIO Y USOS DE AGUA**

RÍO LOA	OBRA DE INTERVENCIÓN	PROPIETARIO	USO Y DESTINO DE LAS AGUAS
Río Caspana	Canales	Caspana	Agrícola
Vertientes Ayquina	Canales	Ayquina	Agrícola
Vertiente Turi	Canales	Turi	Agrícola
Vertiente Cupo	Canales y captación	Cupo	Agrícola y agua potable
RÍO SAN SALVADOR (tributario río Loa en sección baja)			
A 20 mt de su confluencia en el Loa	Estación de bombeo y cañería	SOQUIMICH	Industrial

Fuente: El río Loa: Usos y Conflictos por el Agua en el Desierto de Atacama. Comunidades Indígenas, Mineras, Ciudades y Pueblos. Raúl Molina. 2006.

En particular, el estudio aborda el proceso de recuperación de las aguas del río Toconce por parte de las comunidades indígenas de la zona, el cual ha contado con la resolución a favor de la corte Suprema, quien ha reconocido la propiedad ancestral de dichas comunidades sobre los derechos de agua demandados, en desmedro de la entonces Empresa de Servicios Sanitarios de Agua Potable de Antofagasta (ESSAN). El estudio concluye que esta situación podría sentar un precedente e incentivar a otras comunidades a luchar por la recuperación de sus derechos ancestrales.

El estudio entrega una visión clara del rol de las comunidades indígenas existentes en la zona en la distribución de los recursos hídricos, tanto desde el punto de vista legal, como del punto de vista práctico. Además permite estimar las demandas asociadas en cuanto al uso que le dan estas comunidades al recurso hídrico, todo esto dentro del marco de la actividad denominada Levantamiento de Demandas y Consumos y su posterior inclusión dentro del Modelo Conceptual y su implementación en MAGIC.

2.1.27. Censo Nacional Agropecuario y Forestal. Instituto Nacional de Estadísticas. (Varios Años)

A partir de los registros públicos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), se obtuvieron diversos resultados de los Censos Agropecuarios desarrollado entre los años 1976 y 2007. Estos resultados han sido utilizados directamente en la determinación de las demandas de agua generadas por el riego de los cultivos de la cuenca. Toda la información anterior está disponible únicamente por tabla, y ha sido adecuada a la cartografía de zonas de riego que se determine en la etapa de modelación.

En particular, los antecedentes recopilados son los siguientes:

- Número y superficie de las explotaciones censadas por tipo, según región, provincia y comuna.
- Superficie de las explotaciones agropecuarias con tierra por uso del suelo, según región, provincia y comuna.

- Número y superficie de las explotaciones agropecuarias con tierra por tamaño, según región, provincia y comuna.
- Número y superficie de las explotaciones agropecuarias por condición jurídica del productor(a), según región, provincia y comuna.
- Superficie regada en las explotaciones agropecuarias, por sistemas de riego, según región, provincia y comuna.
- Superficie total sembrada o plantada por grupo de cultivos, según región, provincia y comuna.
- Superficie sembrada, producción y rendimiento de cereales, leguminosas y tubérculos, en riego y secano, según región, provincia y especie.
- Superficie sembrada, producción y rendimiento de cultivos industriales, en riego y secano, según región, provincia y especie.
- Superficie cultivada con hortalizas, por sistema de cultivo, según región, provincia y especie.
- Superficie con frutales en plantación compacta o industrial y huertos caseros en formación y producción, según región, provincia y especie.
- Superficie plantada con viñas y parronales viníferos por grupo de variedades, en riego y secano, según región, provincia y comuna.
- Superficie de las explotaciones forestales por uso del suelo, según región, provincia y comuna.
- Superficie de las plantaciones forestales por especie, en las explotaciones forestales, según región, provincia y comuna.

El Anexo 2-1 muestra los resultados anteriores.

2.1.28. Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 2007

Este estudio fue realizado para la Dirección General de Aguas con el objeto de que la autoridad disponga de información de la situación actual y futura de las demandas de los recursos hídricos para las distintas cuencas dentro del país. Estas demandas se identificaron para diferentes rubros: Agropecuario, Agua Potable, Industrial, Minero, Generación de Energía, Forestal, Acuícola, Turismo, Receptor de Contaminantes y Caudal Ecológico.

Gran parte de esta información es relevante para el presente estudio, ya que contribuye con valores necesarios en una serie de tablas del modelo MAGIC, como lo son evapotranspiración, usos de suelo, coeficientes de cultivo, etc.

En particular para la cuenca del río Loa, en el rubro agropecuario se proporciona valores de consumo de agua asociado a ganado y aves domésticas, los cuales son valores pequeños en comparación al consumo de agua para cultivos, los que de acuerdo al estudio corresponden a 20.407.990 m³/año para la subcuenca del Loa Alto y 17.806.825 m³/año para la subcuenca del Loa Medio-Bajo. Estas cifras corresponden a un total de 38 diferentes cultivos, cuya demanda se encuentra detallada de manera mensual.

Referente al uso de agua potable, en el estudio se realizó una estimación en base a la población de las localidades que consumen agua de la cuenca, la cual se presenta en el Cuadro 2.1-10.

**CUADRO 2.1-10
USO DE AGUA POTABLE**

Localidad	Población	Q estimado (l/s)
Caspana	353	0,6
Lasana - Chiu Chiu	980	1,7
San Pedro de Atacama	3.462	6,0
Antofagasta	303.864	631,3
Playa Brava	2.799	7,5
Calama	133.651	269,0
TOTAL	445.109	916,1

Fuente: Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 2007.

Gran parte de los rubros estudiados no son aplicables para la cuenca del río Loa, mientras que de los que se encuentran presentes, sólo el uso minero posee un consumo de importancia. En este sentido, el consumo minero en la subcuenca del Loa Alto es de 694,2 l/s, mientras que en la subcuenca del Loa Medio-Bajo el valor asciende a 4.758,5 l/s.

Adicional a las demandas de agua, el estudio presenta información de descargas tanto de aguas servidas como industriales. En el caso de la cuenca del río Loa, sólo existe información de descargas de aguas servidas en Calama por un valor de 270,0 l/s el año 2001 y de 292,3 l/s el año 2005, cuyo cuero receptor corresponde a la Quebrada Quetena – Río San Salvador.

Finalmente, se proporciona una estimación del caudal ecológico para diferentes tramos de los cauces dentro de la cuenca, los cuales se muestran en el Cuadro 2.1-11.

**CUADRO 2.1-11
CAUDALES ECOLÓGICOS**

Cauce	Tramos	Qec (m³/s)
Río Loa	Estación Río Loa antes Represa Lequena	0,06
Río Toconce	Estación Río Toconce antes Represa Sendos	0,04
Río Salado	Desde Estación Sifón Ayquina a Junta con Río Loa	0,04
Río Loa	Desde Yalquincha a Junta con San Salvador	0,14
Río Loa	Desde Loa en Junta San Salvador hasta Quillagua	0,07
Río San Salvador	Desde Estación Río San Salvador hasta Junta Río Loa	0,03

Fuente: Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 2007.

2.1.29. Declaración de Impacto Ambiental Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama, Optimización Operativa. 2007

El estudio presenta la descripción del proyecto de instalación de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas y sus obras asociadas. Se centra principalmente en las medidas necesarias por adoptar que permitan una optimización operativa de la planta de acuerdo al proyecto original aprobado el año 2001 y de esa forma solucionar problemas referentes a la capacidad de tratamiento, manejo de lodos y malos olores. Se describen las principales descargas y externalidades generadas ya sea durante la etapa de construcción de estas nuevas obras como del periodo de operación. En este contexto se presenta la proyección de crecimiento de los caudales de tratamiento de la planta acorde a la población de la comuna de Calama, lo que es de importancia para la construcción del modelo en MAGIC.

2.1.30. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. Prammar Ambiental Consultores. 2008

Esta referencia que forma parte del EIA del proyecto de desarrollo minero llamado Pampa Hermosa ubicado en la región de Tarapacá, en el cual la empresa SQM tiene por objeto aumentar la producción de yodo y la construcción de una nueva planta para producir nitrato de sodio y nitrato de potasio. En particular el Anexo VIII, que guarda relación con la caracterización de la hidrogeología, se abordó el análisis del funcionamiento del acuífero del Salar de Llamara mediante un modelo conceptual y numérico.

Para ello, se definieron para el acuífero del Salar de Llamara las correspondientes unidades hidrogeológicas y los sectores de permeabilidades y almacenamientos tanto para el estrato superior como inferior que fueron complementados con la información proveniente de pruebas de bombeo realizadas en pozos del sector. Asimismo, se identificaron y cuantificaron las componentes de recarga y descarga del sistema acuífero, como por ejemplo: evaporación, transpiración desde árboles, recargas subterráneas, entre otras más. En el caso de la evaporación, se estimaron tasas en los sectores de Pampa El Tamarugal y del Salar de Llamara, en base a campañas llevadas a cabo en terreno y se estudió su correspondiente relación con los niveles subterráneos registrados.

La información anterior permitió caracterizar en términos hidrogeológicos el área norponiente de la cuenca del río Loa, en particular la zona del Salar de Llamara y el tramo del río Loa hasta antes de su descarga al océano.

2.1.31. 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

Este estudio consistió en la entrega de los resultados que se generaron a partir del desarrollo y posterior empleo de un modelo de flujo de agua subterránea que simuló el comportamiento hidráulico del sistema acuífero de la cuenca de Calama, siendo el objetivo principal, la evaluación de la factibilidad de un bombeo a largo plazo en la Formación Calama y la identificación de los potenciales impactos de este bombeo.

Además se proporciona una descripción de la hidrogeológicas de la cuenca de Calama y se presenta el modelo conceptual, generado a partir del procesamiento de todos los datos estratigráficos disponibles.

En cuanto al modelo numérico implementado, se entrega una descripción pormenorizada de éste en el cual se menciona el diseño de la malla de modelación, las condiciones de borde impuestas en los distintos estratos considerados, los parámetros hidráulicos del acuífero adoptados, recargas procedentes desde sectores de riego y la infiltración de redes de agua.

Como resultado del proceso de modelación, en los que fueron simulados tanto un régimen permanente como uno transiente, se obtuvieron balances de agua preliminares en ambos regímenes, mapas de niveles freáticos y piezométricos para el estrato superior e inferior respectivamente y los descensos proyectados productos de los bombeos en el área de análisis en los diferentes estratos acuíferos después de 10 años de extracción continua.

Esta información será utilizada en el presente estudio, sobre todo en la etapa que tiene que ver con la calibración del modelo subterráneo que dispone la DGA para el acuífero de Calama, ya que se considerarán por ejemplo, los pozos que posee Minera El Tesoro y las consideraciones empleadas en el modelo numérico tales como, distribución de permeabilidades, condiciones de borde, caudales de recarga, etc.

2.1.32. Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-Knight Piésold. 2010

Este documento elaborado por Knight Piésold para Codelco Chile, tuvo como objetivo principal estudiar la relación hidráulica del sistema conformado por el Tranque Talabre de propiedad de Codelco y los acuíferos y cauces superficiales del sector analizado. Para ello, se elaboró un modelo conceptual y numérico que integró las entradas y salidas de este sistema, los procesos de infiltración de las aguas contenidas en los relaves, la forma y velocidad de dispersión de los eventuales contaminantes y la vulnerabilidad de los acuíferos.

En cuanto al modelo numérico, éste fue implementado utilizando el software Visual MODFLOW, el cual permitió analizar el efecto de cambios previstos en la operación actual del Tranque Talabre y la predicción del sistema ante la ocurrencia de situaciones negativas para los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos. Del mismo modo se determinaron los respectivos balance hídricos para cuantificar los flujos subterráneos entre los distintos estratos acuíferos, así como también las recargas y descargas del sistema. En el Cuadro 2.1-12, se adjunta un resumen del balance hídrico obtenido en régimen permanente a escala cuenca.

**CUADRO 2.1-12
BALANCE HÍDRICO TOTAL A NIVEL CUENCA EN DOMINIO DE MODELACIÓN**

Entradas (l/s)		
Recarga	Tranque	21
	Precipitación	19
Flujo Subterráneo	Noreste	241
	Sureste	48
	Noroeste	164
	Este	221
Total Entradas		714
Salidas (l/s)		
Descarga	Flujo Salida Oeste	349
	Afloramiento Río Loa	372
Total Salidas		721
Balance Total Nivel Cuenca		-7

Fuente: Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-Knight Piésold. 2010.

Para la calibración de este modelo numérico se emplearon los registros de niveles medidos por Codelco en pozos de su propiedad y que se encuentran emplazados en el área de estudio. Como producto del proceso de calibración se obtuvieron valores de permeabilidades, coeficientes de almacenamientos y rendimientos específicos para los distintos estratos acuíferos. Dichos valores se presentan en los siguientes Cuadros, agrupados de acuerdo a la unidad hidrogeológica que representan.

**CUADRO 2.1-13
RANGO DE PERMEABILIDADES CALIBRADAS PARA EL ACUÍFERO CALAMA SEGÚN
MODELO NUMÉRICO CODELCO-KP (2010)**

Unidades Hidrogeológicas	Permeabilidad (m/día)
Acuífero Superior	0,01 -3,9
Acuífero Inferior	0,1 - 6

Fuente: Elaboración propia en base a estudio "Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-KP. 2010

**CUADRO 2.1-14
RANGO DE RENDIMIENTOS ESPECÍFICOS CALIBRADOS PARA EL ACUÍFERO DE
CALAMA SEGÚN MODELO NUMÉRICO CODELCO-KP (2010)**

Unidades Hidrogeológicas	Rendimiento Específico
Acuífero Superior	0,0021 - 0,101
Acuífero Inferior	0,1

Fuente: Elaboración propia en base a estudio "Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-KP. 2010

CUADRO 2.1-15
RANGO DE COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO ESPECÍFICO CALIBRADOS
PARA EL ACUÍFERO CALAMA SEGÚN MODELO NUMÉRICO CODELCO-KP (2010)

Unidades Hidrogeológicas	Coef. Almac. Específico (1/m)
Acuífero Superior	1×10^{-5}
Acuífero Inferior	$3 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-5}$

Fuente: Elaboración propia en base a estudio "Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-KP. 2010

Previo al trabajo de modelación se procesó toda la información generada en base a las interpretaciones geológicas e hidrogeológicas obtenidas de perforaciones de sondajes, perfiles geofísicos y geológicos y estudios anteriores. El resultado de lo anterior, permitió la confección de un marco hidrogeológico conceptual que permitió la definición de las unidades hidrogeológicas, la geometría del sistema acuífero, la distribución espacial y una estimación de los rangos de valores aproximados para los distintos parámetros hidráulicos del acuífero.

Finalmente este estudio termina proponiendo y posteriormente evaluando técnicamente, a través del modelo numérico generado, algunas de las medidas de mitigación ambiental tendientes a proteger los acuíferos del sector y los ríos Los y San Salvador.

Esta fuente de información fue de relevancia para caracterizar en términos hidrogeológicos la cuenca del río Loa, por lo que se empleará principalmente en la Caracterización Hidrogeológica y en la Calibración del Modelo Subterráneo, proyectadas para este estudio.

En lo referente a los valores calibrados de parámetros hidrogeológicos obtenidos para los estratos acuíferos, éstos fueron considerados para la representación de los cuerpos acuíferos mediante el programa MAGIC.

2.1.33. Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012

Este estudio elaborado por Arrau Ingenieros Consultores para la DGA en 2012, tuvo como finalidad la elaboración de un diagnóstico del Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos para la Región de Antofagasta, en el cual se evaluó la cantidad y la calidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la región permitiendo una posterior caracterización tanto de la oferta como de la demanda hídrica. Asimismo, se identificaron aquellos factores limitantes del desarrollo productivo regional mirado bajo la óptica del recurso hídrico, así como también los factores que afectan al patrimonio ambiental o social de esta región, con la consecuente proposición de los lineamientos para el desarrollo de la correspondiente Evaluación Ambiental Estratégica.

Específicamente, se llevaron a cabo las siguientes actividades para dar cumplimiento con los objetivos planteados anteriormente y que son de relevancia para el actual estudio:

- Caracterización de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos
- Demandas Hídricas por Uso
- Diagnóstico de Capacidad y Cobertura de la Infraestructura Hídrica

A continuación se detallan brevemente los antecedentes recabados en cada una de las actividades mencionadas anteriormente, y que poseen especial interés para este trabajo.

2.1.33.1. Caracterización de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos

Para la caracterización de los recursos hídricos superficiales, se efectuó un análisis de los datos pluviométricos y fluviométricos registrados en las estaciones hidrométricas de la DGA en la región de Antofagasta. Para las series de datos pluviométricos obtenidas considerando el período 1960/61 a 2010/11, se realizó un análisis de frecuencia, de manera tal, de estimar las precipitaciones asociadas a las probabilidades de excedencia: 0,3 , 1, 5, 20, 50, 70, 85, 95, 98% y considerando para el ajuste, las distribuciones Normal, Gumbel, Log Normal y Log Pearson III. Análogamente, en base al análisis de frecuencia anterior, se elaboraron Curvas de Duración de la precipitación media anual en las estaciones meteorológicas consideradas en dicho estudio.

En lo referente al análisis de los datos de las series de caudales para ese estudio, se generaron las correspondientes estadísticas para aquellas estaciones de control fluviométrico que poseían un registro más extenso, completo y espacialmente más significativo. Además, se llevó a cabo un análisis temporal de las series de caudales medios anuales para las anteriores estaciones fluviométricas seleccionadas.

En cuanto a los recursos hídricos subterráneos, se realizó una completa descripción de las unidades hidrogeológicas que se identifican en la región y también una caracterización de los principales acuíferos sedimentarios de la cuenca de Calama, Ojos de San Pedro, Vegas de Turi y los asociados a los salares. De esta última caracterización, se entregaron además rangos de parámetros elásticos y espesores de los acuíferos señalados anteriormente, los cuales fueron recopilados de estudios anteriores.

Por lo tanto, la información que aporta esta actividad resulta útil como perspectiva general de la condición hidrológica de la cuenca del río Loa y para la caracterización hidrogeológica que se desarrolló más adelante en el presente estudio.

2.1.33.2. Demandas Hídricas por Uso

En esta actividad desarrollada en este estudio recopilado, se realizó una caracterización de las demandas por uso tales como, agua potable, agrícola, producción de energía eléctrica, minería, industrial y uso paisajístico-turístico y recreacional, donde se incluyó en aquellos usos más relevantes, una proyección de las demandas estimadas en el corto, mediano y largo plazo (5, 10, 20 años).

En el Cuadro 2.1-16, se presenta la demanda para uso agrícola por comuna.

**CUADRO 2.1-16
DEMANDA HÍDRICA ANUAL POR COMUNA DE LA REGIÓN**

Comuna	Demanda Año 2007 (m³/año)	Demanda Año 2007 (m³/s)
Antofagasta	81.898	0,0026
Mejillones	549	0,00002
Sierra Gorda	1.749	0,00006
Tal Tal	68.947	0,0022
Calama	15.799.747	0,501
Ollagüe	26.329	0,0008
San Pedro de Atacama	33.537.341	1,063
María Elena	345.129	0,011
TOTAL	49.861.688	1,58

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

En el Cuadro 2.1-17, se presenta los consumos de agua para su uso en la minería, para cada una de las cuencas hidrográficas relevantes de la región de Antofagasta.

**CUADRO 2.1-17
CONSUMO DE AGUA DE LA MINERÍA POR CUENCA HIDROGRÁFICA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

Cuenca	Consumo asociado al uso minero (l/s)
Cuenca del Río Loa	2.760
Cuenca Fronterizas Salar Michincha-	76
Cuenca Salar de Atacama	1.406
Cuenca Endorreicas Salar Atacama-	1.027
Cuenca Quebrada La Negra	33
TOTAL	5.303

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

En el Cuadro 2.1-18, se presenta la demanda de agua destinada para producción eléctrica de toda la región de Antofagasta.

En el Cuadro 2.1-19, se presenta los consumos de agua asignados para un uso del tipo industrial en toda la región Antofagasta, en tanto que en el Cuadro 2.1-20, se adjuntan la demanda actual para este tipo de uso estimada en base a los derechos consuntivos y no consuntivos.

**CUADRO 2.1-18
CAUDAL UTILIZADO POR TERMOELÉCTRICAS DE LA REGIÓN DE
ANTOFAGASTA**

Nombre	Propietario	Ubicación	Potencia Nominal (MW)	Q Actual (l/s)
Central Termoeléctrica Mejillones (a)	EDELNOR S.A.	Mejillones	591	296
Central Termoeléctrica Norgener (b)	NORGENER S.A.	Tocopilla	277,3	139
Central Termoeléctrica Atacama (a)	Gas Atacama Generación Ltda.	Mejillones	780,6	390
Central Termoeléctrica Diesel ENAEX (c)	Gas Atacama Generación Ltda.	Norte de Antofagasta	2,7	1,4
Central Termoeléctrica Tocopilla (a)	Electroandina	Tocopilla	1.029	515
Central Termoeléctrica Antofagasta (c)	EDELNOR S.A.	Antofagasta	28,7	14,5
Central Termoeléctrica Mantos Blancos (c)	EDELNOR S.A.	Oriente de Antofagasta	28,6	14,5
Central Termoeléctrica Taltal (c)	ENDESA	Norte de Taltal	243	122,5

Nota: (a) Utilizan agua de mar según los estudios presentados al SEIA.

(b) Utilizan agua de mar según otras fuentes de información.

(c) No se posee información del afluente.

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

**CUADRO 2.1-19
CAUDAL ACTUAL ASIGNADO SEGÚN TIPO DE ACTIVIDAD INDUSTRIAL**

Tipo de Industria	Caudal (l/s)
INDUSTRIA EXPLOSIVOS	256
MINERIA NO METALICA (LITIO, AZUFRE, YESO, ETC.)	2.946
NO ESPECIFICADA	9.232
TOTAL	12.434

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

**CUADRO 2.1-20
DERECHOS DE AGUA OTORGADOS EN LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

NATURALEZA DEL AGUA	CAUDAL POR TIPO DE	
	CONSUNTIVOS	NO CONSUNTIVOS
SUBTERRÁNEA	177,0	11
SUPERFICIAL Y CORRIENTE	322,8	9.934
TOTAL	499,8	11.934

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

Se determinaron además caudales ecológicos reales constituidos para la región, en base a la revisión de los derechos de aprovechamiento concedidos. Del mismo modo, se citaron los caudales ecológicos teóricos estimados para cada tramo de y sección del río Loa, de acuerdo a lo obtenido por el estudio de la DGA "Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Loa" elaborado el año 2005. Estos caudales ecológicos teóricos se presentan en el Cuadro 2.1-21.

**CUADRO 2.1-21
CAUDALES ECOLÓGICOS TEÓRICOS ESTIMADOS PARA DISTINTOS TRAMOS EN
LA CUENCA DEL RÍO LOA**

Tramo del Río	Cauce	Caudal Ecológico (l/s)
Desde Yalquincha a junta con San Salvador	Río Loa	140
Desde Loa en junta San Salvador hasta Quillagua	Río Loa	66
Desde Estación Loa en Desembocadura al mar	Río Loa	20
Desde Estación Sifón Ayquina a junta con río Loa	Río Salado	40
Desde Estación río San Salvador hasta junta con río Loa	Río San Salvador	30

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

Finalmente se presentó un balance entre la oferta y demanda hídrica en cada una de las cuencas relevantes de la región de Antofagasta, en particular para el caso de la cuenca del río Loa, se obtuvo el balance hídrico mostrado en el Cuadro 2.1-22.

Esta información fue utilizada en el modelo MAGIC para representar e identificar las distintas demandas hídricas que interactúan en la cuenca ya sea para uso de agua potable, riego, electricidad, minería, etc. Además, fue de relevancia en la etapa del presente estudio denominada: Levantamiento de Demandas y Consumos.

**CUADRO 2.1-22
BALANCE OFERTA-DEMANDA HÍDRICA EN CUENCA RÍO LOA**

Ítem	Caudal (m³/s)
Oferta	4,8
Demanda Agrícola	0,51
Demanda Agua Potable	1,09
Demanda Minera	2,76
Evaporación Cuerpos de Agua	1,59
Caudal en Desembocadura	0,29
Reusos de Agua Potable	Desconocido
Reusos en Riego	Desconocido
Reusos en Minería	Desconocido

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

2.1.33.3. Diagnóstico de Capacidad y Cobertura de la Infraestructura Hídrica

En esta actividad se desarrolló una caracterización de la infraestructura hídrica existente en la región de Antofagasta, la cual se centró principalmente en infraestructura relativa al agua potable urbana, riego, redes de monitoreo hidrometeorológico e infraestructura de control de crecidas.

En el caso de la caracterización de la infraestructura destinada a riego, se realizó una descripción de la red de canales destinadas para los sectores de riego de la región de Antofagasta, las que utilizan esencialmente como fuente de recursos hídricos superficiales el río Loa y se concentran en las comunas de Calama y San Pedro de Atacama. La red de canales identificadas por sectores de riego se presenta en el Cuadro 2.1-23, mientras que en el Cuadro 2.1-24 se muestra el detalle de estos canales en particular.

**CUADRO 2.1-23
CANALES POR SECTORES DE RIEGO EN LA REGIÓN**

Sector	Nº Canales	Capacidad	Estado	Superficie Regada (ha)
Oasis Lasana	8	100-300	Sin revestimiento	100
Oasis Chiu Chiu	4 (matrices)	1.000 (matrices)	Existen obras de revestimiento con un total de 1700 m de obra de distribución	Sin info.
Calama	11	Sin info.	La red de canales combina canales antiguos, que debieran estar sin uso, con canales revestidos más recientes.	1.000

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

**CUADRO 2.1-24
CANALES Y SUPERFICIES DE RIEGO**

Territorio/Localidad	Canales Existentes (m)	Superficie Bajo Riego (ha)
1. ADI ALTO LOA		
LASANA	21.052	54
CHIU-CHIU *	27.900	176
TOCONCE	6.204	26
TURI *	10.425	50
AYQUINA	1.561	4
CASPANA *	9.382	59
CUPO	11.114	19
TAIRA	1.500	5
OLLAGÜE	2.750	7,7
SUBTOTAL	91.888	401

**CUADRO 2.1-24
CANALES Y SUPERFICIES DE RIEGO**

Territorio/Localidad	Canales Existentes (m)	Superficie Bajo Riego (ha)
2. ADI ATACAMA LA GRANDE		
SAN PEDRO DE ATACAMA Y RÍO GRANDE	100.000	1.635
TOCONAO	36.500	49
TALABRE	10.500	92
CAMAR	5.200	15
SOCAIRE	5.200	15
PEINE	9.800	220
MACHUCA	4.000	28
SUB TOTAL	5.000	20
	176.200	2.074
3. VALLE DE CALAMA Y OASIS DE QUILLAGUA		
VALLE DE CALAMA	53.571	1.113
OASIS DE QUILLAGUA	9.100	150
SUBTOTAL	62.671	1.263
4. SECTOR COSTA		
LA CHIMBA	S/I	84
KM 12	S/I	10
ESTACIÓN URIBE	S/I	2,5
SUBTOTAL	-	97
TOTAL REGIONAL	330.759	3.834

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

Por otra parte en el Cuadro 2.1-25, la información recopilada en este estudio, referente a la infraestructura de regulación disponible para la región de Antofagasta. En particular de dicho Cuadro, se observa que para el caso de la cuenca del río Loa, existen dos obras de regulación: el embalse Conchi y el tranque Sloman. Esta información, según Arrau Ingenieros Consultores, fue obtenida a partir de datos proporcionados por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

**CUADRO 2.1-25
INFRAESTRUCTURA DE REGULACIÓN EN LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

Obra Riego	Capacidad (m³)	Sistema Regulado	Territorio y Sectores y/o Comunidades que involucra
Embalse Conchi	22.000.000	Río Loa	Lasana, Chiuchiu, Valle de Calama y
Estanques Guachar y Solor	25.000	Río San Pedro	San Pedro de Atacama
Tranque Sloman	Prácticamente cero	Río Loa	Quillagua

Fuente: Estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídrico, Región de Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012.

Esta información fue relevante en la etapa de la elaboración del modelo conceptual y posteriormente en la definición de los elementos y parámetros del software MAGIC.

2.1.34. Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Matraz. 2012

Este estudio fue elaborado el año 2012 para la Dirección General de Aguas con el objetivo de desarrollar un modelo hidrogeológico numérico del acuífero de Calama a partir de la integración de la información disponible en otros estudios, y la realización de una campaña geofísica en la zona de estudio. Si bien el estudio cuenta con la elaboración de estudios básicos necesarios para el correcto desarrollo de un modelo hidrogeológico numérico, éste no fue calibrado, por lo que KP realizará este proceso para el régimen permanente.

En este estudio, se identifican las siguientes actividades como estudios básicos previos a la construcción del modelo numérico que poseen información relevante para la elaboración del modelo MAGIC:

- Descripción Geológica
- Descripción Hidrogeológica
- Modelo Conceptual
- Modelo Numérico

A continuación se detallan los antecedentes más significativos de este estudio, los cuales podrán ser utilizados en el modelo integrado MAGIC de la cuenca. Además, se corroborará que ésta información se encuentre correctamente implementada en el modelo numérico, previo a su calibración.

2.1.34.1. Descripción Geológica

Este capítulo del estudio realizado por Matraz tuvo como objetivo la recopilación de la información geológica existente en la cuenca del acuífero de Calama y lograr un análisis integral de su funcionamiento geológico. En base a esta recopilación, fueron identificadas 7 unidades geológicas principales, las cuales se muestran en el Cuadro 2.1-26.

De manera de complementar la información recopilada en otros estudios, Matraz realizó una campaña de prospección geofísica, en la cual se realizó una campaña gravimétrica de aproximadamente 200 km, con el objetivo de establecer correctamente los límites del basamento y estudiar la estratigrafía de la zona estudiada. Esta campaña abarcó aquellas zonas en las que no existía información geofísica previa.

La información disponible y generada permitió construir un modelo geológico en donde se identificó la ubicación del basamento y de los tres principales estratos: Acuífero superior, Acuitardo y Acuífero Inferior.

**CUADRO 2.1-26
FORMACIONES GEOLÓGICAS**

Unidad	Formación Geológica	Descripción Geológica
UG-1	Basamento	Rocas Ígneas, volcánicas y metamórficas
UG-2	Fm. Calama	Depósitos de gravas y conglomerados (UG-2a). Intercalaciones de lavas y brechas andesíticas (UG-2b)
UG-3	Fm. Jalquinche	Limolitas y arcillitas (UG-3a); Tobas, cenizas volcánicas, areniscas y limos (UG-3b); Calcarenitas y calizas (UG-3c)
UG-4	Fm. Lasana	Areniscas, limolitas y conglomerados
UG-5	Fm. Chiquinaputo	Conglomerados y areniscas
UG-6	Fm. Opache	Lutitas y areniscas (UG-6a); Conglomerados y areniscas (UG-6b); Calizas, travertinos y calcarenitas (UG-6c)
UG-7	Fm. Chiu-Chiu	Areniscas, travertinos y cenizas volcánicas

Fuente: Modelación Acuífero Calama, sector medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Matraz. 2012.

2.1.34.2. Descripción Hidrogeológica

En este capítulo se definieron, en base a estudios previos, 6 unidades hidrogeológicas, las cuales se agrupan de acuerdo a lo mostrado en el Cuadro 2.1-27, el cual muestra valores de permeabilidad asociados a cada unidad. Además, el Cuadro 2.1-28 muestra los valores estimados del coeficiente de almacenamiento para las dos unidades acuíferas identificadas. Todas estas estimaciones corresponden a campañas de perforaciones y ensayos realizadas con anterioridad al estudio.

**CUADRO 2.1-27
PERMEABILIDAD DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS**

Unidades Hidrogeológicas		Permeabilidad (m/día)
Acuífero Superior	Cobertura aluvial (UH-1a)	1×10^2 a 1×10^{-1}
	Cobertura detrítico-evaporítica (UH-1b)	1×10^2 a 1×10^{-3}
	Calizas (UH-2a)	1×10^1 a 1×10^{-2}
	Depósitos limo-arcillosos (UH-2b)	1×10^{-1} a 1×10^{-3}
	Depósitos de arenas negras (UH-2c)	3×10^2 a 1×10^{-2}
Acuitardo	Acuitardo ignimbrítico (UH-3)	1×10^{-6}
	Acuitardo detrítico (UH-4)	$< 5 \times 10^{-3}$
Acuífero Inferior	Depósitos de gravas (UH-5a)	1×10^2 a 5×10^{-2}
	Depósitos limo-arcillosos (UH-5b)	1×10^{-3} a 1×10^{-5}
Basamento	Basamento (UH-6)	1×10^{-5} a 1×10^{-9}

Fuente: Modelación Acuífero Calama, sector medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Matraz. 2012.

CUADRO 2.1-28
COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Unidad Hidrogeológica	Coefficiente de Almacenamiento
Acuífero superior	$1,2 \times 10^{-4}$ a $1,6 \times 10^{-2}$
Acuífero inferior	3×10^{-5} a 3×10^{-1}

Fuente: Modelación Acuífero Calama, sector medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Matraz. 2012.

Los valores anteriores se utilizaron como referencia en la caracterización de los acuíferos asociados al sector de Calama en la modelación realizada con MAGIC.

2.1.34.3. Modelo Conceptual

El modelo conceptual de la zona de estudio se realizó en base a la información geológica, hidrológica e hidrogeológica recopilada y es la base del modelo numérico. En base a ella, se definió el dominio de la zona de estudio, condiciones de borde y flujos de entrada y salida, en base a lo cual se calculó el balance de aguas tal como se muestra en el Cuadro 2.1-29.

El modelo conceptual y balance de aguas es de gran importancia para entender el funcionamiento de la cuenca en el sector, especialmente para el modelo MAGIC, el cual necesita como información base toda extracción y descarga de agua del cauce. Además, el modelo conceptual se utilizará para chequear la correcta implementación del modelo numérico de la cuenca.

CUADRO 2.1-29
BALANCE DE AGUAS

Entradas	Unidad	Flujo (l/s)
Subterránea contornos norte y este	Ac. Superior y Ac. Inferior	1.000 - 1.500
Red de distribución urbana	Ac. Superior	100 - 200
Infiltración retornos riego agrícola	Ac. Superior	50 - 100
Infiltración desde Tranque Talabre	Ac. Inferior	50 - 100
Infiltración operación minera centro-oeste	Ac. Superior	0 - 100
SUB-TOTAL		1.200 - 2.000
Salidas	Unidad	Flujo (l/s)
Descargas hacia el río Loa	A. Superior	300 - 900
Afloramiento vertientes	Ac. Superior	550 - 700
Bombes	Ac. Superior y Ac. Inferior	100 - 300
Contorno subterráneo oeste	Ac. Inferior	200 - 300
Evaporación	Ac. Superior	50 - 100
SUB-TOTAL		1.200 - 2.300

Fuente: Modelación Acuífero Calama, sector medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Matraz. 2012.

2.1.34.4. Modelo Numérico

El modelo numérico desarrollado en este estudio no se encuentra calibrado y es tarea de KP realizar esta labor, por lo que la información disponible en el estudio es de gran utilidad para entender de qué manera fueron implementadas las componentes del modelo conceptual.

Si bien el estudio explica la implementación de la malla, condiciones de borde y parámetros, no se presenta la información en un detalle suficiente como para comprender plenamente la estructura del modelo. Es por esto que la información más relevante a utilizar en este punto fue el modelo numérico mismo, el cual se encuentra disponible para el programa Visual MODFLOW Flex.

2.1.35. Muestreo Químico e Isotópico. 2013

La DGA proporcionó a este consultor los resultados de un muestreo químico e isotópico realizado durante el mes de Mayo de 2013 a aguas superficiales, subterráneas y meteóricas de la cuenca del río Loa, incluyendo además las subcuencas asociadas a los ríos Salado y San Salvador. En el Cuadro 2.1-30 se presenta los puntos muestreados y el tipo de muestreo llevado a cabo ya sea químico y/o isotópico.

**CUADRO 2.1-30
PUNTOS DE MUESTREO QUÍMICO E ISOTÓPICO EN CUENCA RÍO LOA. MAYO 2013**

Muestra	Punto de Muestreo	Coordenadas UTM: WGS-84		Tipo Muestreo
		Este (m)	Norte (m)	
M1	Vertiente Ojos de Opache	499.851	7.513.587	Químico-Isotópico
M2	Río Loa en Finca	502.136	7.511.299	Químico-Isotópico
M3	Río San Salvador	503.201	7.517.911	Químico-Isotópico
M4	Loa en Escorial	511.267	7.517.876	Químico-Isotópico
M5	Loa en Angostura	527.696	7.516.510	Químico-Isotópico
M6	Pozo 5 MET	502.772	7.515.863	Químico-Isotópico
M7	Pozo 3 MET	502.968	7.515.856	Químico-Isotópico
M8	Pozo 21 MET	504.036	7.514.670	Químico-Isotópico
M9	Pozo 2 MET	505.365	7.515.716	Químico-Isotópico
M10	Salado antes del Loa	535.541	7.526.053	Químico-Isotópico
M11	Pozo Chiu -Chiu	541.336	7.529.536	Químico-Isotópico
M12	Vado Santa Barbara	540.243	7.569.856	Químico-Isotópico
M13	Loa salida embalse Conchi	539.131	4.564.050	Químico-Isotópico
M14	Lasana	538.183	7.537.573	Químico-Isotópico
M15	Sal-S7	600.653	7.541.469	Químico-Isotópico
M16	Sal -M7	600.544	7.542.023	Químico-Isotópico
M17	Manantial 1	571.068	7.556.220	Químico-Isotópico
M18	Pozo Turi 10	569.461	7.541.296	Químico-Isotópico
M19	Salado en Ayquina	567.443	7.535.014	Químico-Isotópico
M20	Aguas Arriba Caspana	582.308	7.528.576	Químico-Isotópico
M21	Tatio	604.115	7.526.094	Químico-Isotópico
M22	Estación Toconce	586.497	7.537.670	Químico-Isotópico
M23	Manantial Toconce	585.907	7.538.187	Químico-Isotópico
M24	Pozo OSPB	572.110	7.561.893	Químico-Isotópico
M25	Pozo Turi-2	571.638	7.539.733	Químico-Isotópico

**CUADRO 2.1-30
PUNTOS DE MUESTREO QUÍMICO E ISOTÓPICO EN CUENCA RÍO LOA. MAYO 2013**

Muestra	Punto de Muestreo	Coordenadas UTM: WGS-84		Tipo Muestreo
		Este (m)	Norte (m)	
M26	Salado antes Curti	578.007	7.536.091	Químico-Isotópico
M27	Río Curti antes de Salado	578.023	7.535.976	Químico-Isotópico
M28	Pozo Cupo 1	563.770	7.535.267	Químico-Isotópico
M29	Precipitación Ayquina	-	-	Isotópico
M30	Precipitación Embalse Conchi	-	-	Isotópico

Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la DGA.

**CUADRO 2.1-31
RESULTADOS ANÁLISIS ISOTÓPICO EN MUESTRAS DE AGUAS
EN CUENCA RÍO LOA. MAYO 2013**

Muestra	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^3\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$14 \alpha^{(*)}$ (%)	Acuífero
M-1	-50,9	-	-7,54	-	
M-2	-49,2	-	-7,35	-	
M-3	-56,9	-	-7,58	-	
M-4	-56,1	-	-7,33	-	
M-5	-56,7	-	-7,44	-	
M-6	-64,3	0,2	-8,12	26,25	Inferior
M-7	-61,9	0,4	-7,83	-	Superior
M-8	-54,4	-	-7,14	-	Superior
M-9	-62,6	0,0	-8,45	29,29	Inferior
M-10	-46,0	0,3	-6,76	-	
M-11	-41,9	-	-6,89	-	Superior
M-12	-68,3	-	-9,85	-	
M-13	-60,9	-	-8,47	-	
M-14	-60,5	-	-8,44	-	
M-15	-56,7	-	-8,80	-	
M-16	-75,1	0,0	-10,22	-	
M-17	-64,5	0,1	-8,90	-	
M-18	-55,0	-	-8,36	-	Superior
M-19	-50,3	-	-6,74	-	
M-20	-42,5	0,1	-5,84	-	
M-21	-51,0	0,5	-7,09	3,16	
M-22	-60,1	-	-8,15	-	
M-23	-42,9	0,5	-7,23	-	
M-24	-63,3	0,0	-9,22	0,35	Inferior
M-25	-46,7	-	-8,19	-	Superior
M-26	-54,0	-	-6,67	-	
M-27	-35,6	-	-4,40	-	
M-28	-46,3	-	-7,53	3,17	Inferior
M-29	-37,9	-	-7,69	-	
M-30	-65,7	-	-5,33	-	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la DGA.

Nota: (*) Actividades no corregidas para Carbono-14.

2.1.36. Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013

Este estudio corresponde al antecedente más actual dentro de la cuenca del río Loa y corresponde a un levantamiento de información hidrogeológica de sector Alto de la cuenca. Específicamente, el objetivo del estudio es la revisión y análisis de antecedentes geofísicos, geológicos, estratigráficos e hidrogeológicos, para definir y materializar una campaña de prospección geofísica complementaria, y, a partir de esto, generar una base de datos consolidada de la información de las características y geometría del acuífero ubicado aguas arriba de la ciudad de Calama.

El estudio se enfocó en 4 sectores con información existente en base a estudios anteriores realizados por diferentes entidades: Pampa Puno, Polapi, San Pedro de Inacaliri y Llalqui. En términos hidrogeológicos, para cada uno de los sectores se entregó una descripción de las unidades hidrogeológicas, niveles freáticos, parámetros elásticos del acuífero, recarga, descarga, dirección de flujo y volumen del acuífero, siempre que esa información estuviera disponible en alguno de los antecedentes revisados.

En particular para el presente estudio, se utilizó la información proporcionada para los sectores de Pampa Puno y Polapi, los cuales sirvieron como antecedentes para la caracterización hidrogeológica de la zona alta de la cuenca, así como también como referencia para la representación acuífera de MAGIC.

2.2. Información Facilitada por la DGA

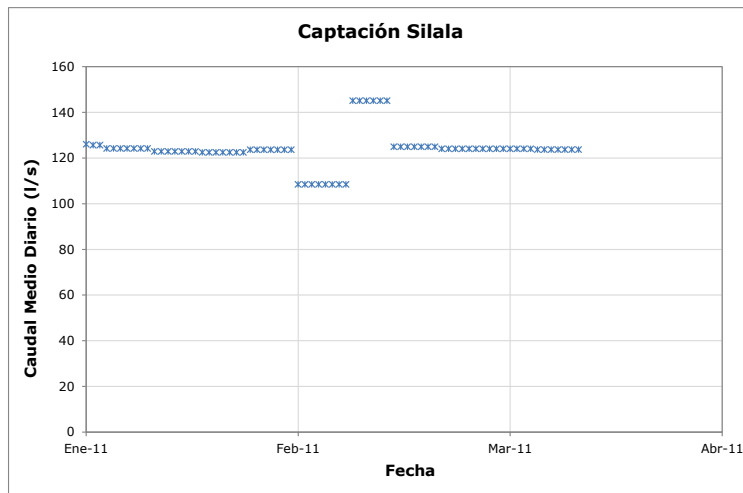
La DGA facilitó a este consultor información hidrológica y cartográfica relevante para el desarrollo del proyecto. Esta información será utilizada de manera directa en el estudio, indicándose cuando sea necesario, su procedencia.

Además, la DGA entregó información referente a los derechos otorgados a cada una de las comunidades de las localidades de Calama, Lasana y Chiu Chiu, las que administran sus respectivos canales.

Por otra parte, también se proporcionaron estadísticas de caudales y volúmenes diarios para las principales captaciones de aguas superficiales de propiedad de las siguientes empresas privadas: ADASA, CODELCO, FCAB y SQM. Estas estadísticas comprenden un período total de tres meses que van entre Enero y Marzo de 2011.

En las siguientes Figuras se graficaron los registros de caudales medios diarios para cada una de las extracciones puntuales que poseen las cuatro empresas anteriores dentro de la cuenca del río Loa.

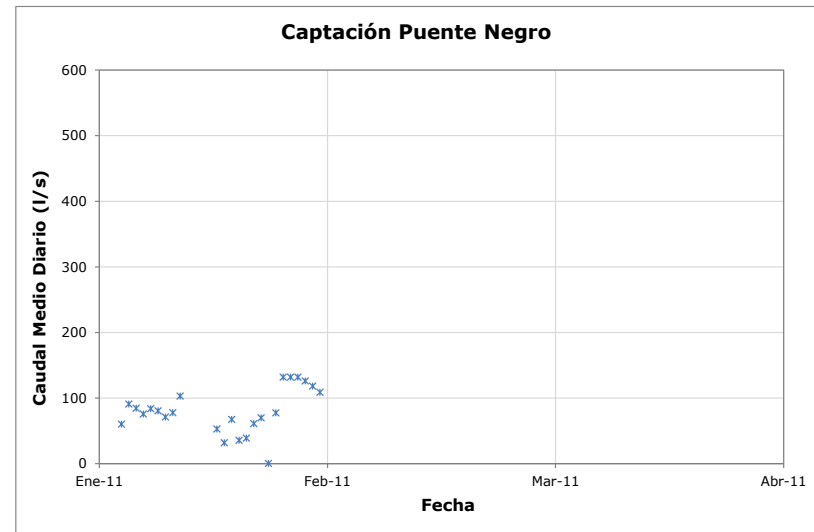
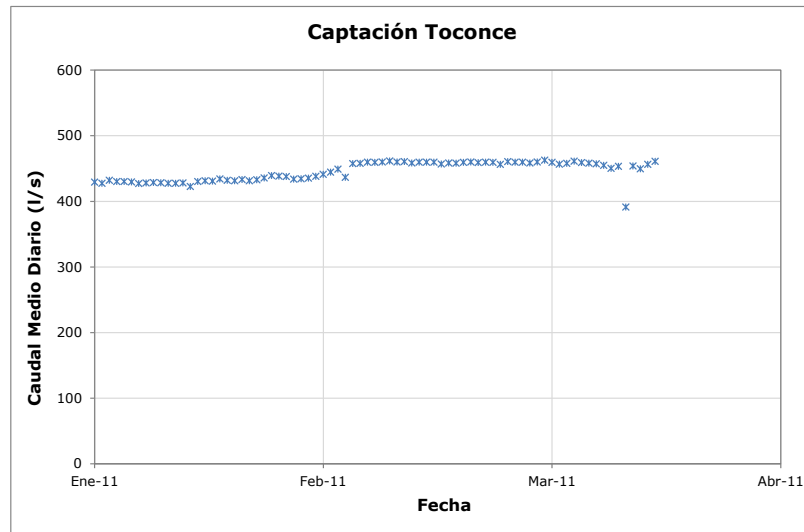
FIGURA 2.2-1
CAUDALES MEDIOS DIARIOS REGISTRADOS EN CAPTACIÓN DE FCAB



CUADRO 2.1-32
RESULTADOS DEL MUESTREO QUÍMICO REALIZADO EN CUENCA DEL RÍO LOA. MAYO DE 2013

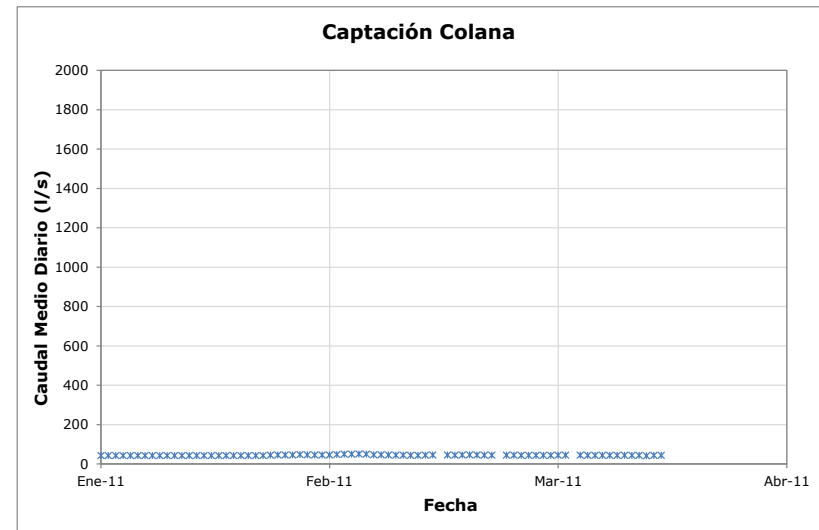
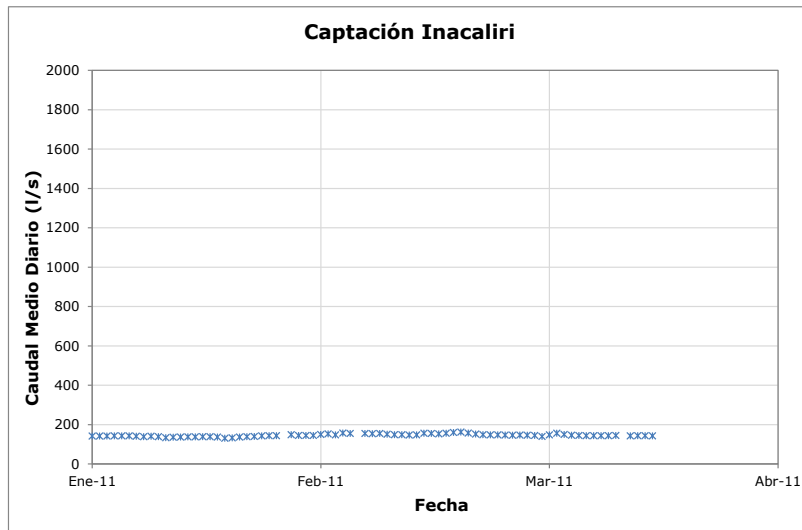
Muestra	CE (uS/cm)	pH In situ	pH Lab.	T (°C)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Si (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)
M-1	7.940	7,70	7,76	16,1	1.251	53,5	142	330	42	90	2.438	305	11	2	5	454
M-2	6.992	8,25	7,70	11,0	1.141	44,9	132	238	36	77	2.167	243	5	2	5	350
M-3	8.850	8,38	8,57	9,5	1.463	55,9	203	333	31	67	2.058	1.204	514	2	5	236
M-4	6.550	8,03	7,86	12,5	1.020	35,5	125	238	35	75	1.656	222	5	2	5	436
M-5	6.095	7,64	7,83	13,8	943	37,4	137	284	36	76	1.810	181	5	2	5	470
M-6	5.893	7,20	7,80	21,4	1.004	25,5	126	243	23	50	1.567	551	11	2	5	338
M-7	6.638	7,27	7,67	15,8	1.102	39,0	148	301	42	89	1.994	292	31	2	5	400
M-8	7.958	7,14	7,56	16,0	1.363	42,6	142	263	40	86	2.509	286	14	2	5	477
M-9	4.605	7,29	7,63	22,8	770	28,3	115	183	31	67	1.366	246	15	2	5	297
M-10	6.836	7,90	8,19	11,3	1.219	53,8	111	199	37	80	2.121	103	5	2	5	388
M-11	10.580	8,32	8,04	13,1	1.877	169,0	131	192	8	16	3.591	95	5	2	5	239
M-12	2.990	6,97	7,70	14,8	383	58,3	83	180	41	89	611	172	5	2	5	648
M-13	2.852	8,08	7,79	10,1	402	54,5	84	151	38	82	601	181	5	2	5	512
M-14	2.732	8,01	7,87	10,8	396	24,8	81	113	35	75	597	170	5	2	5	440
M-15	408	7,65	9,16	23,1	68,1	6,5	5	11	36	77	57	46	5	2	5	76
M-16	903	7,21	9,23	27,7	145	11,3	8	24	44	94	179	83	5	2	5	87
M-17	3.266	6,34	7,25	21,5	380	29,8	118	189	51	108	732	178	5	2	5	634
M-18	8.749	6,20	7,74	26,2	1.364	149,0	108	335	55	118	2.606	69	5	2	5	958
M-19	5.635	7,35	7,98	16,8	840	63,4	68	241	46	98	1.637	91	5	2	5	512
M-20	743	7,64	7,79	5,8	112	5,0	21	61	26	57	95	128	5	2	5	118
M-21	560	6,90	7,63	75,0	27,4	8,3	28	147	56	119	3	77	5	2	5	240
M-22	1.035	7,90	9,23	15,0	132	25,3	25	52	40	86	206	67	5	2	5	154
M-23	774	7,86	8,68	9,1	43,7	10,8	45	78	45	96	73	27	5	2	5	353
M-24	4.250	6,54	7,02	24,6	519	51,0	159	238	53	114	966	202	5	2	5	753
M-25	2.870	6,90	8,10	16,6	422	47,0	50	115	49	105	608	18	5	2	5	532
M-26	4.324	7,53	8,22	9,6	759	71,7	31	124	48	103	1.219	82	5	2	5	336
M-27	12.834	7,00	7,25	6,6	1.829	227,0	194	432	25	53	4.051	110	5	2	5	987
M-28	11.500	6,48	7,14	15,4	1.829	263,0	147	458	43	92	3.625	106	5	2	5	1.140

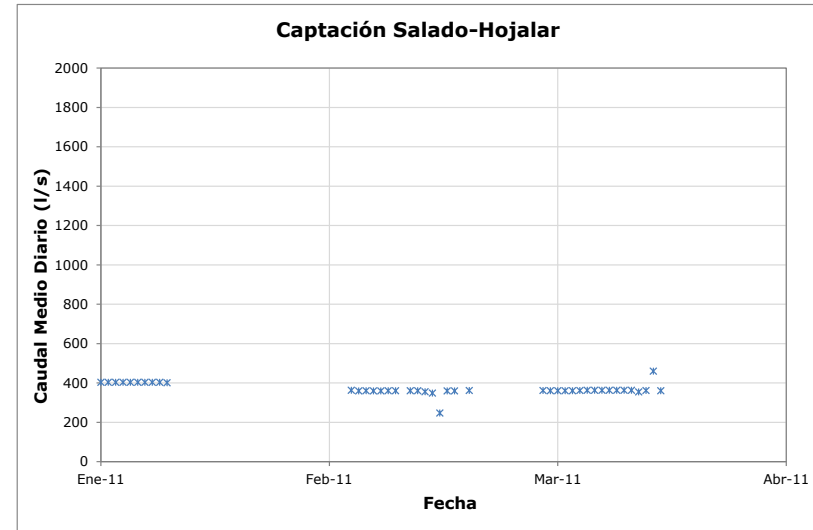
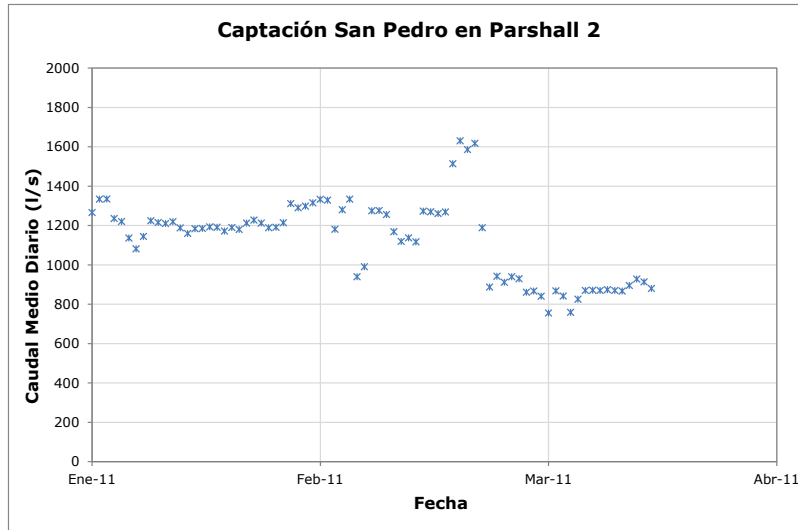
Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por la DGA.



Fuente: Elaboración propia a partir de información facilitada por DGA Antofagasta

FIGURA 2.2-3
GRÁFICOS TEMPORALES DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS REGISTRADOS EN CAPTACIONES DE CODELCO



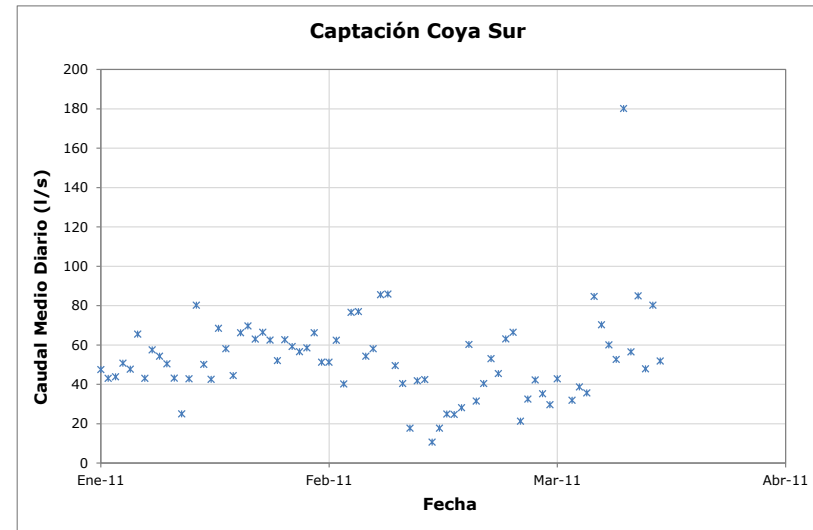
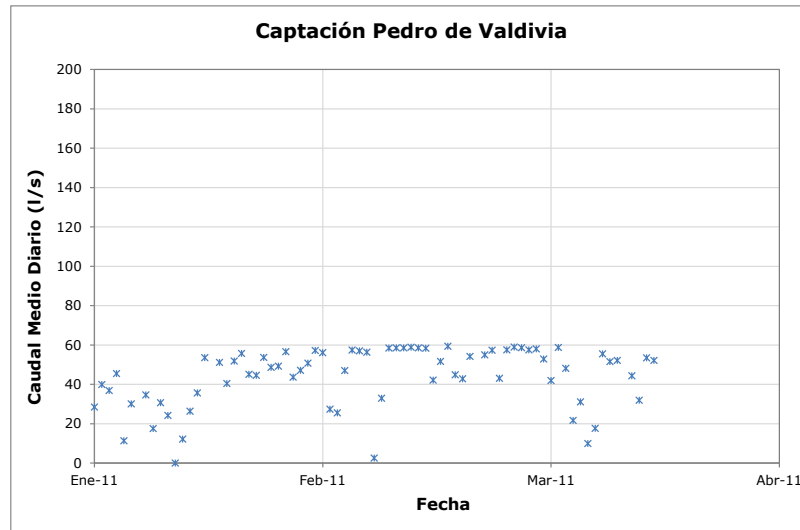


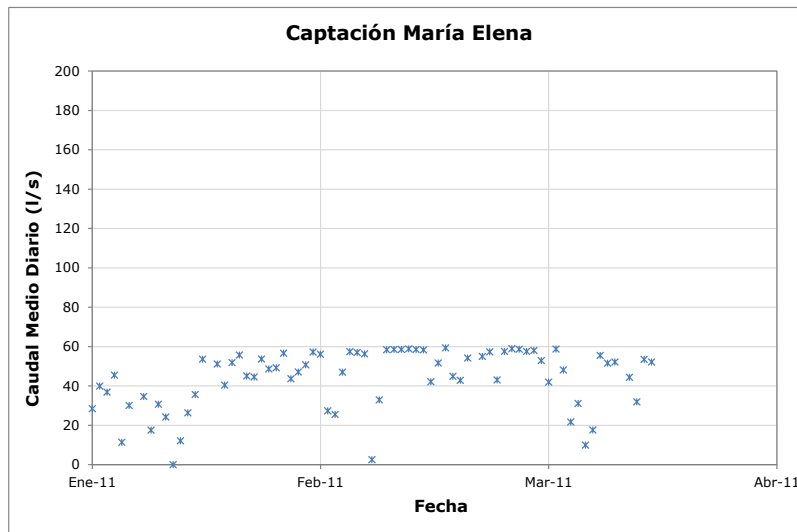
Fuente: Elaboración propia a partir de información facilitada por DGA Antofagasta

Nota: La captación de CODELCO en Linzor, no registra datos de caudales según la estadística proporcionada por la DGA. Por lo tanto no se graficó.

FIGURA 2.2-4

GRÁFICOS TEMPORALES DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS REGISTRADOS EN CAPTACIONES DE SQM



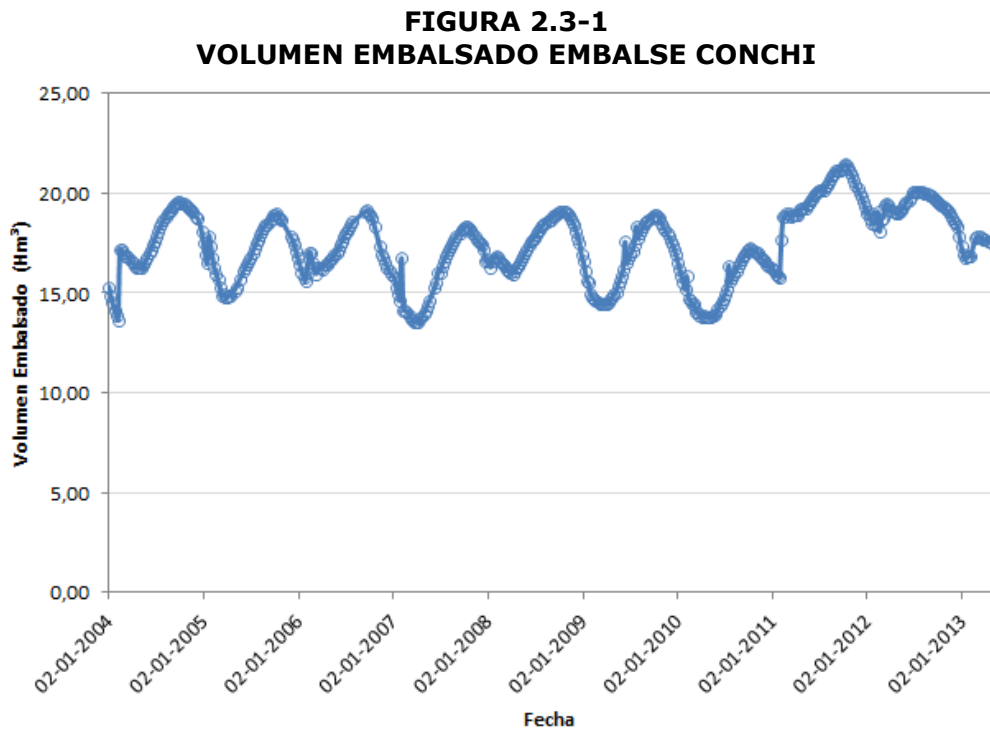


Fuente: Elaboración propia a partir de información facilitada por DGA Antofagasta

2.3. Información Obtenida de Páginas Web Oficiales

A través de la página web de la Dirección de Obras Hidráulicas (<http://www.doh.gob.cl/AcercadelaDireccion/estadodeembalses/Paginas/default.aspx>) fue posible obtener el volumen embalsado del Embalse Conchi, el cual es obtenido de manera semanal y actualizado en el documento asociado al "Estado de Embalses", el cual resume la información disponible desde el año 2004.

El detalle de esta información se presenta en el Anexo 2-2, mientras que la Figura 2.3-1 muestra la información en un gráfico temporal.



Fuente: Elaboración propia a partir de información disponible en sitio web de la DOH

3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

El presente capítulo se centra en el análisis de la información pluviométrica y fluviométrica en la zona de estudio, con el objetivo final de ser utilizada en la implementación del modelo integrado MAGIC.

Previo a lo anterior, se presentan las observaciones realizadas durante una visita de inspección a la cuenca del río Loa, durante la cual se realizó un recorrido con el objeto de estudiar el comportamiento del sistema y además, chequear el estado de las estaciones DGA.

3.1. Reconocimiento en Terreno de la Cuenca

Entre los días 22 y 25 de Octubre de 2013 se realizó una visita a la cuenca del río Loa con el objeto de identificar las estaciones fluviométricas y realizar un diagnóstico de ellas en base a observación. Este procedimiento también fue realizado con algunas de las estaciones meteorológicas, cuyo diagnóstico, debido a su naturaleza, es complementario a los objetivos del estudio.

Al mismo tiempo, este recorrido a través de la cuenca permitió identificar las principales zonas de afloramiento dentro de la cuenca del río Loa, las cuales serán zonas de gran significancia dentro del modelo integrado de simulación.

Los formularios de información completados durante esta visita se muestran en el Anexo 3-1, mientras que el álbum fotográfico de las estaciones visitadas se muestra en el Anexo 3-2. A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas de la visita a la cuenca.

3.1.1. Estaciones Fluviométricas

Se visitó la mayoría de las estaciones fluviométricas vigentes dentro de la cuenca, a excepción de Río Loa en Desembocadura que fue visitada durante el terreno asociado a demandas y consumos. El Cuadro 3.1-1 muestra un resumen de las estaciones visitadas junto con las coordenadas actualizadas en datum WGS-84 que fueron medidas en terreno mediante la utilización de un GPS navegador Garmin Oregon 550.

Junto con lo anterior, se visitaron algunas de las estaciones fluviométricas suspendidas, las cuales se muestran en el Cuadro 3.1-2.

Durante la visita se pudo observar el estado en que se encuentra cada una de las estaciones fluviométricas vigentes, mostrando una gran variabilidad entre estaciones en excelente estado y estaciones con un menor cuidado, de las que se desconfía de su medición.

**CUADRO 3.1-1
ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS VIGENTES VISITADAS**

Código BNA	Nombre Estación	Coordenadas UTM: WGS-84	
		Este (m)	Norte (m)
02101001-4	RÍO LOA ANTES REPRESA LEQUENA	534.965	7.605.225
02112005-7	RÍO LOA ANTES ZONA AGRÍCOLA QUILLAGUA	446.341	7.598.551
02112006-5	RÍO LOA D. J. SAN SALVADOR (CHACANCE)	445.511	7.523.394
02112007-3	RÍO LOA D. J. SAN SALVADOR-(M. ELENA)	441.633	7.528.741
02110031-5	RÍO LOA EN ANGOSTURA	527.100	7.516.391
02110001-3	RÍO LOA EN ESCORIAL	511.266	7.517.881
02110004-8	RÍO LOA EN FINCA	500.925	7.510.780
02104002-9	RÍO LOA EN SALIDA EMBALSE CONCHI	539.088	7.564.044
02104013-4	RÍO LOA EN VADO SANTA BARBARA (DOH)	540.255	7.569.833
02105001-6	RÍO SALADO A. J. CURTI	578.015	7.536.076
02105005-9	RÍO SALADO A. J. LOA	538.765	7.527.735
02105002-4	RÍO SALADO EN SIFÓN AYQUINA	567.493	7.535.007
02103001-5	RÍO SAN PEDRO EN PARSHALL N°1	565.237	7.570.386
02103002-3	RÍO SAN PEDRO EN PARSHALL N°2	550.152	7.573.110
02105007-5	RÍO TOCONCE ANTES REPRESA SENDOS	588.025	7.536.339
02111001-9	VERTIENTE OJOS DE OPACHE	499.861	7.513.592

Fuente: Elaboración Propia.

**CUADRO 3.1-2
ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS SUSPENDIDAS VISITADAS**

Código BNA	Nombre Estación	Coordenadas UTM: WGS-84	
		Este (m)	Norte (m)
02110007-2	RÍO LOA ANTES JUNTA SAN SALVADOR	445.525	7.523.117
02104004-5	RÍO LOA EN ALCANTARILLA CONCHI N°1	540.354	7.569.636
02104003-7	RÍO LOA EN ALCANTARILLA CONCHI N°2	540.328	7.569.440
02110003-K	RÍO LOA EN CHINTORASTE	502.061	7.511.362
02112001-4	RÍO LOA EN QUILLAGUA	444.548	7.604.867
02103003-1	RÍO SAN PEDRO EN CAMINO INTERNACIONAL	548.518	7.573.490
02111002-7	RÍO SAN SALVADOR ANTES JUNTA RÍO LOA	445.619	7.523.214

Fuente: Elaboración Propia.

En general, la gran mayoría de las estaciones se encuentra en buen estado y realiza la medición de caudal en una sección de hormigón rectangular que capta la totalidad del caudal pasante. Dentro de esta categoría se encuentran las siguientes estaciones: Río Loa antes Represa Lequena, Río Loa en Angostura, Río Loa en Escorial, Río Loa en Finca, Río Loa en Salida Embalse Conchi, Río Loa en Vado Santa Bárbara, Río Salado A.J. Curti, Río Salado en Sifón Ayquina, Río San Pedro en Parshall N° 1, Río San Pedro en Parshall N° 2, Río Toconce antes Represa Sendos y Vertiente Ojos de Opache. Estas estaciones representan los puntos de información fluviométrica más confiable para ser usados durante la calibración del modelo integrado MAGIC. No obstante, se debe tomar en cuenta que algunas de estas estaciones presentan muy poca información, como es el caso

de Río Loa en Angostura, que se encuentra en funcionamiento desde 2012, y Río Loa en Escorial, que posee un vacío de información de aproximadamente 30 años.

En el extremo opuesto se encuentran aquellas estaciones cuya información no es confiable debido a lo irregular de la sección de medición, estado de la estación y presencia de vegetación en el cauce. Dentro de esta categoría se encuentran las siguientes estaciones: Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua, Río Loa D.J. San Salvador (Chacance) y Río Salado A.J. Río Loa. Para efectos de calibración, se evitará la utilización de la información proporcionada por estas estaciones.

Finalmente, la estación Río Loa D.J. San Salvador (M. Elena) se encuentra en buenas condiciones, sin embargo, se observó agua fuera de la sección encausada de medición, lo que hace pensar que no se contabiliza todo el caudal pasante en la medición.

En cuanto a las estaciones fluviométricas suspendidas que fueron visitadas, dos de ellas aún conservan la sección de medición canalizada en hormigón y la regleta de medición: Río Loa en Alcantarilla Conchi N°2 y Río San Salvador A.J. Río Loa. En el resto de las estaciones mencionadas en el Cuadro 3.1-2 no se pudo reconocer el punto exacto de la medición, ya que no se encuentra ninguna estructura en el lugar. De cualquier modo, ninguno de estos puntos se encuentra en condiciones que permitan evaluar la calidad de la información en el momento en que se encontraban vigentes.

3.1.2. Estaciones Meteorológicas

Se visitaron algunas de las estaciones meteorológicas vigentes en la cuenca, cuya instrumentación variaba dependiendo del punto. El Cuadro 3.1-3 muestra las estaciones visitadas.

**CUADRO 3.1-3
ESTACIONES METEOROLÓGICAS VIGENTES VISITADAS**

Código BNA	Nombre Estación	Coordenadas UTM: WGS-84		Altitud (m s.n.m.)
		Este (m)	Norte (m)	
02105018-0	AYQUINA	569.644	7.536.489	3.036
02104010-K	CHIU-CHIU	536.224	7.528.896	2.526
02104008-8	CONCHI EMBALSE	538.796	7.564.140	3.026
02101003-0	LEQUENA	534.929	7.604.929	3.314
02103008-2	PARSHALL N 2	549.596	7.573.116	3.334
02112008-1	QUILLAGUA	442.969	7.608.270	804
02105002-4	RÍO SALADO EN SIFON AYQUINA	567.514	7.534.987	2.938
02105001-6	RÍO SALADO A.J. CURTI	578.015	7.536.076	3.076
02105017-2	TOCONCE	585.888	7.537.641	3.313

Fuente: Elaboración Propia.

El Cuadro 3.1-4 muestra un resumen de la información registrada en cada una de las estaciones. En aquellos casos en que se mide evaporación, ésta se realiza utilizando un evaporímetro tipo A, el cual se rellena frecuentemente por un encargado de mantener este registro. A pesar de lo anterior, las estaciones de Ayquina, Parshall N° 2 y Chiu Chiu presentaban evaporímetros secos, mientras que las estaciones de Conchi Embalse y Toconce presentaban evaporímetros operativos, pero con agua con sedimentos, turbia y en general de mala calidad.

**CUADRO 3.1-4
PARÁMETROS METEOROLÓGICOS MEDIDOS**

Nombre Estación	Parámetros					
	Precip.	Tmax	Tmin	V.Viento	Evap.	H.Sol
AYQUINA	X	X	X	X	X	
CHIU-CHIU	X	X	X		X	
CONCHI EMBALSE	X	X	X	X	X	
LEQUENA	X	X	X	X	X	X
PARSHALL N°2	X	X	X	X	X	
QUILLAGUA	X	X	X			
RÍO SALADO EN SIFÓN AYQUINA	X					
RÍO SALADO A.J. CURTI*						
TOCONCE	X	X	X	X	X	

Fuente: Elaboración Propia. *No fue posible identificar la instrumentación.

3.1.2.1. Zonas de Afloramiento

Durante la visita se reconocieron 5 zonas principales de afloramientos, que hacen que las aguas de los cauces superficiales aumenten en caudal. Estas zonas corresponden a: Sector Ojos de San Pedro, Sector Vegas de Turi, Sector Quillagua, Sector Loa D.J. Salado y Sector Río San Salvador (Figura 3.1-1).

El sector de Ojos de San Pedro posee características de salar y se encuentra ubicado en la zona media de la cuenca del río San Pedro. Actualmente no se observan afloramientos en el sector debido a la explotación del acuífero, sin embargo el lugar es reconocido por haber sido un humedal en el cual las aguas subterráneas afloraban.

El Sector Vegas de Turi se ubica en la cuenca del río Salado, en el cual se observan afloramientos de agua. A su vez, hacia el sur las vegas se observa el nacimiento de vertientes que contribuyen al caudal del río Salado, los cuales son originados por el afloramiento de las aguas subterráneas del sector.

El Sector de Quillagua se ubica en la zona baja de la cuenca del río Loa. Esta zona de afloramientos se reconoce debido a que la totalidad de las aguas del cauce es captada aguas arriba del pueblo de Quillagua con fines de riego, no obstante, aguas abajo del pueblo se observa flujo en el río que sólo puede ser explicado por la presencia de una importante contribución subterránea.

El Sector Loa D.J. Salado corresponde a la zona aguas debajo de la junta con el río Salado y aguas arriba de Loa en Angostura, donde se encuentran ubicados los salares de Rudolph y Brinkelhoff. En esta zona se producen recuperaciones de agua subterránea, las que explican la existencia de los salares y que se ven reflejadas en un aumento de caudal observable en el sector de Angostura.

Finalmente, el Río San Salvador corresponde a un sector reconocido por ser formado por los afloramientos generados por el acuífero de Calama al sector poniente de la ciudad. Los valores de conductividad eléctrica y temperatura medidos en este cauce muestran

que su origen es totalmente distinto al del río Loa, presentando una conductividad y temperatura mucho menores y característicos de las aguas subterráneas.

3.1.3. Evolución de la Conductividad Eléctrica

Como trabajo adicional a las labores de terreno, se realizó la medición de la conductividad eléctrica y temperatura del agua en los puntos donde se encontraban las estaciones fluviométricas visitadas. Lo anterior se realizó con el fin de analizar la evolución de las aguas de la cuenca y la contribución de diferentes fuentes. La Figura 3.1-2 muestra los valores obtenidos en cada punto de medición dentro de la cuenca.

Se puede apreciar que la conductividad eléctrica en el río Loa va aumentando hacia aguas abajo, llegando a su máximo en el sector de Quillagua, aunque se deduce que el máximo real se debería observar en la desembocadura. Las excepciones a este comportamiento son observadas en sectores donde el río Loa recibe el aporte de otros cauces que ya sea mejoran su calidad (río San Salvador y río San Pedro) o empeoran su calidad (río Salado). Situación similar se observa en el río Salado, cuya conductividad eléctrica llega a su máximo en el sector antes de la junta con el río Loa.

Un caso interesante de analizar corresponde a la junta de los ríos Loa y San Salvador. En este sector, el primero presenta una conductividad eléctrica de 12.400 mS/cm, muy superior a los 7.860 mS/cm medidos en el San Salvador. Luego de la junta, y debido a un caudal mayor del río San Salvador, la conductividad eléctrica resultante llega a un valor de 8.610 mS/cm, lo cual representa una mejora en la calidad del río Loa por efectos de dilución. Otro punto importante de analizar es que la temperatura del agua del río San Salvador en el sector de la junta con el río Loa (13,4 °C) es 8 grados menor que la temperatura del agua del río Loa en la misma zona (21,4 °C), lo que refleja el origen diferente de las aguas, que en el caso del río San Salvador corresponde a aguas subterráneas que afloran desde el acuífero de Calama y al aporte de las descargas de agua tratada desde la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama.

3.2. Descripción General de la Cuenca

La cuenca del río Loa comprende una superficie de 33.081 km², pero es activa sólo en un 20% en el sentido de captar recursos hidrológicos de cordillera. El régimen del Loa y sus afluentes es pluvial y las crecidas obedecen a intensas lluvias de verano caídas en la alta cordillera.

El río Loa nace en la falda norte del volcán Miño en Ojos del Miño (5.651 m.). Escurre en dirección sur hasta el punto llamado El Encuentro, donde recibe el aporte de su primer afluente de importancia, el río San Pedro. Después de haber recorrido 45 km. desde que recibió el San Pedro, el Loa recibe su segundo afluente importante, el río Salado. A partir del encuentro con el Salado, el Loa comienza a girar y a tomar dirección Este -Oeste, pasando por el extremo Sur de la Cordillera del Medio. Finalmente, en el sector de Chacance, ubicado a 112 km de la junta con el río Salado, el río Loa se encuentra con el río San Salvador y simultáneamente toma la dirección Sur - Norte.

El río Loa continúa su recorrido manteniendo el rumbo hacia el Norte hasta llegar a Quillagua, donde comienza a doblar hacia el mar y recibe por el Norte la Quebrada Amarga, continuando su recorrido hasta su desembocadura en el océano Pacífico en Caleta Huelén.

Los tributarios más importantes de esta cuenca, son los ríos Salado, San Salvador y San Pedro junto a la quebrada Amarga. Los dos primeros aportan sus aguas regularmente al río Loa y el río San Pedro posee un aporte muy esporádico, no habiéndose observado escurrimiento al Loa en los últimos años.

La subcuenca del río San Pedro o Inacalari drena una superficie de 1.056 km². Nace en la alta Cordillera en la aguada de Inacalari y sus tributarios de importancia son los ríos Siloli y Colana.

La subcuenca del río Salado drena una superficie de 2.288 km². Se origina de más de 30 vertientes frías y termales, a los pies de la Cadena del volcán Tatio. Sus tributarios de importancia son el río Toconce, reunido con El Hojalar y el río Caspana.

La subcuenca del río San Salvador drena una superficie de 1.084 km². Este río nace de la confluencia de varias quebradas secas, con cabeceras en las proximidades de los salares de la pampa. Después de un desarrollo de unos 25 km, se le reúne por su ribera izquierda la quebrada Opache y se considera el verdadero nacimiento del río.

El cuadro 3.2-1 presenta la información relevante de las subcuencas y subsubcuencas, y la Figura 3.2-1 presenta sus ubicaciones.

**CUADRO 3.2-1
SUBCUENCAS Y SUBSUBCUENCAS DEL RÍO LOA**

Cod.	SubCuencas	Cod.	SubSubCuencas	Área km²
0210	Loa Alto (bajo junta Río Salado)	02100	Río Loa bajo junta Estero Chela	1.481
		02101	Río Loa Entre Estero Chela y bajo junta Quebrada de Hachas	864
		02102	Río Loa entre Quebrada de Hachas y Río San Pedro	1.518
		02103	Río San Pedro	1.056
		02104	Río Loa entre Río San Pedro y Río Salado	924
		02105	Río Salado	2.288
Subtotal Subcuenca Loa Alto				8.131
0211	Loa Medio (entre R. Salado y Q. de Barrera)	02110	Río Loa entre Río Salado y Río San Salvador	3.061
		02111	Río San Salvador	1.804
		02112	Río Loa entre Río San Salvador y Quebrada Amarga	12.859
		02113	Salar de Llamara	6.684
Subtotal Subcuenca Loa Medio				24.408
0212	Loa Bajo (entre Quebrada Amarga y Desembocadura)	02120	Río Loa entre Quebrada Amarga y Desembocadura	542
Subtotal Subcuenca Loa Bajo				542
Total Cuenca Loa				33.081

Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Caracterización Pluviométrica de la Cuenca

La estadística pluviométrica proviene de los registros históricos de lluvias mensuales proporcionados por la DGA, correspondientes a estaciones ubicadas en la cuenca del río Loa. Además, se utilizaron algunas estaciones de cuencas vecinas con el fin de caracterizar de manera más completa la pluviometría de la cuenca.

3.3.1. Estaciones Meteorológicas Utilizadas

Las estaciones meteorológicas utilizadas en la estadística de precipitaciones se presentan en el Cuadro 3.3-1, las que se ubican espacialmente como muestra la Figura 3.3-1.

**CUADRO 3.3-1
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
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

**CUADRO 3.3-1
ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS**

Nº	Estación	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Altura (m s. n. m.)	PP Media Anual (mm)
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	Baquedano	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 e Información de la DGA.

3.3.2. Metodología Utilizada y Resultados

3.3.2.1. Relleno y Extensión de Estadística

Se realizó un relleno de los registros de las estaciones, con el fin de contar con estadística pluviométrica completa para el período comprendido entre los años 1974 y 2012. Para esto, se realizaron correlaciones estadísticas de la información disponible entre estaciones vecinas. La decisión de cual estación utilizar para el relleno de información en cada caso, se basó en aquella que presentara un mejor coeficiente de correlación respecto a la estación objetivo.

Dado que esta cuenca posee estadística de precipitaciones bastante incompleta, no es posible rellenar todos los datos faltantes. Algunos de los datos que no pudieron ser rellenados mediante correlaciones fueron asignados con valores nulos ya que las precipitaciones en las estaciones vecinas lo eran, o bien en la tendencia mensual de la estación predominan estos valores.

Pese a realizar la metodología de relleno indicada en los párrafos anteriores, en algunas estaciones no se logró completar toda la estadística.

El resultado del relleno y extensión de estadística se incluye en el Anexo 3-3.

3.3.2.2. Curvas de Variación Estacional

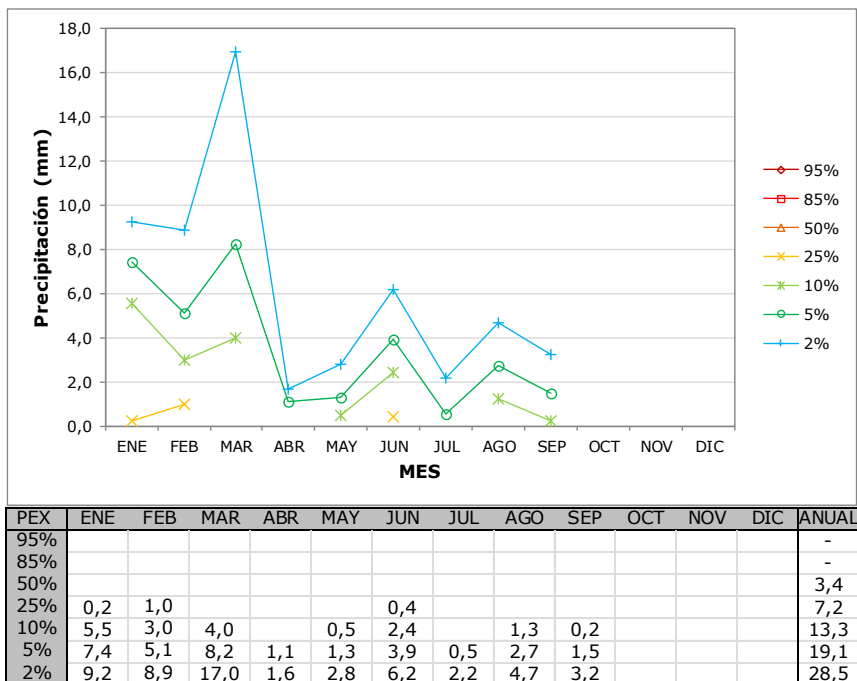
Para construir las curvas de variación estacional se realizó un análisis de frecuencia de las estadísticas obtenidas mediante la metodología del punto anterior. Para esto se analizaron 6 distribuciones de probabilidad: Normal, Gumbel, Pearson III, Log Normal, Log Pearson III y Log Normal III.

De las distribuciones antes mencionadas se escogió la que tenía el mejor ajuste para cada mes y con ella se obtuvieron las precipitaciones asociadas a las probabilidades de excedencia de 2%, 5%, 10%, 15%, 25%, 50%, 85% y 95%.

Las curvas de variación estacional de todas las estaciones se presentan en el Anexo 3-4.

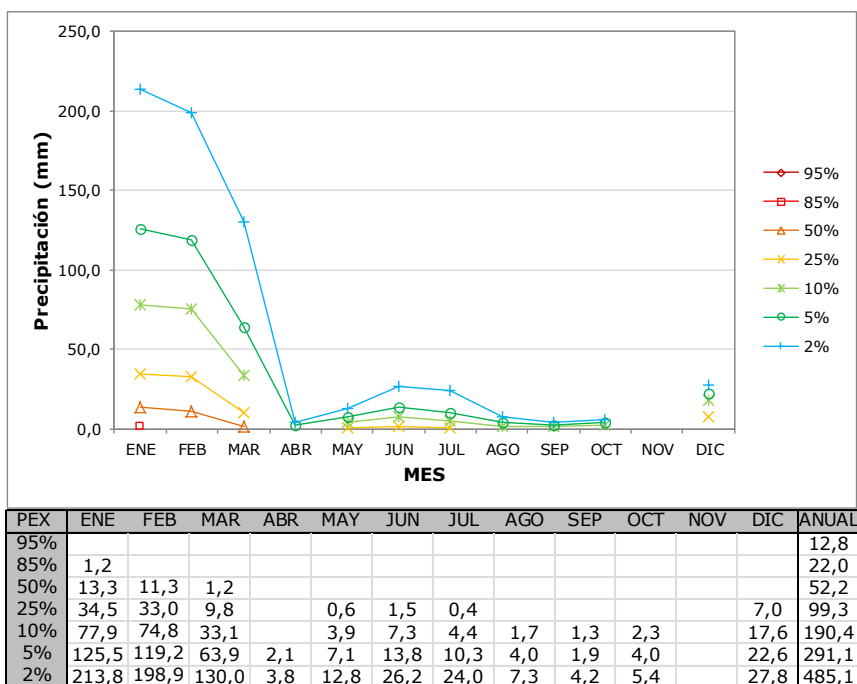
A continuación, se presentan las curvas de las estaciones Chiu-Chiu, Copaquire, Lequena, Linzor, Parshall N°2 y Quillagua, ya que se considera que estas estaciones representan adecuadamente la tendencia espacial de la cuenca.

FIGURA 3.3-2
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN CHIU-CHIU



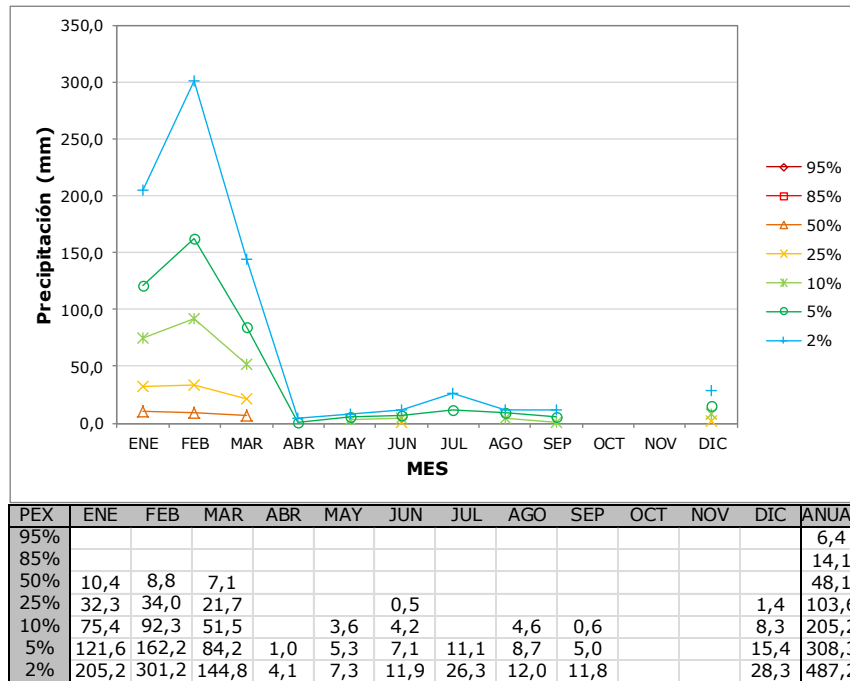
Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 3.3-3
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN COPAQUIRE



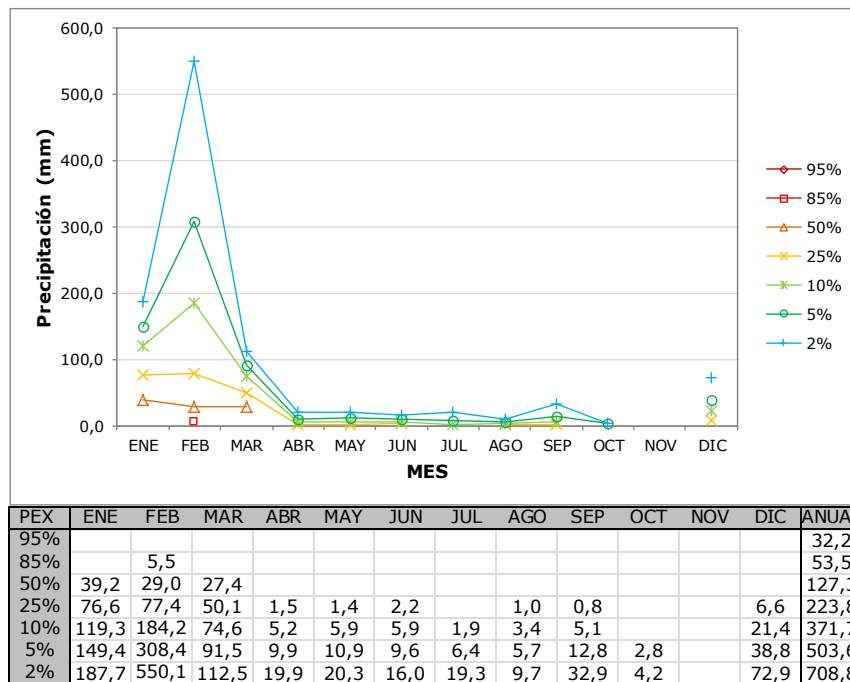
Fuente: Elaboración Propia

**FIGURA 3.3-4
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN LEQUENA**



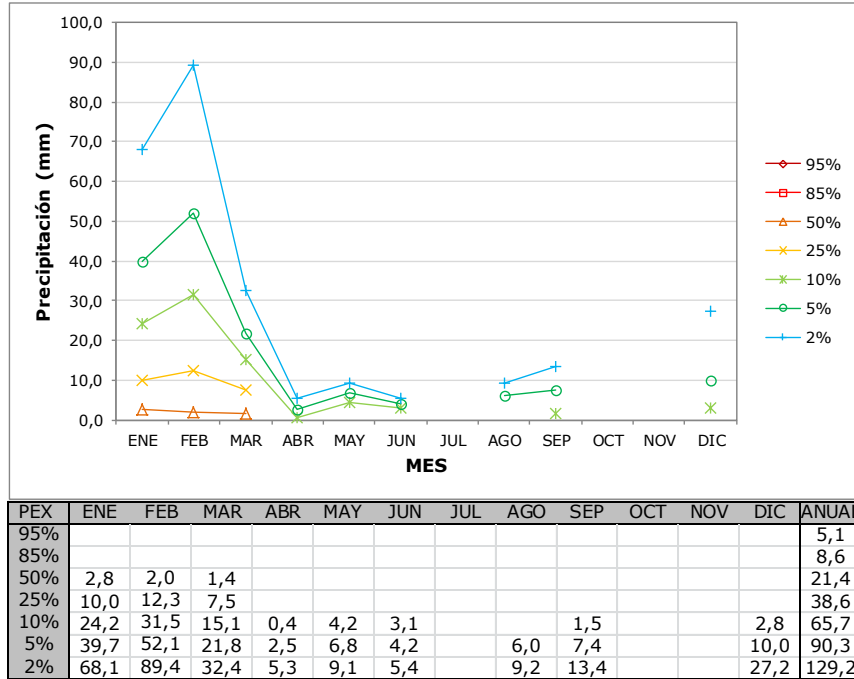
Fuente: Elaboración Propia

**FIGURA 3.3-5
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN LINZOR**



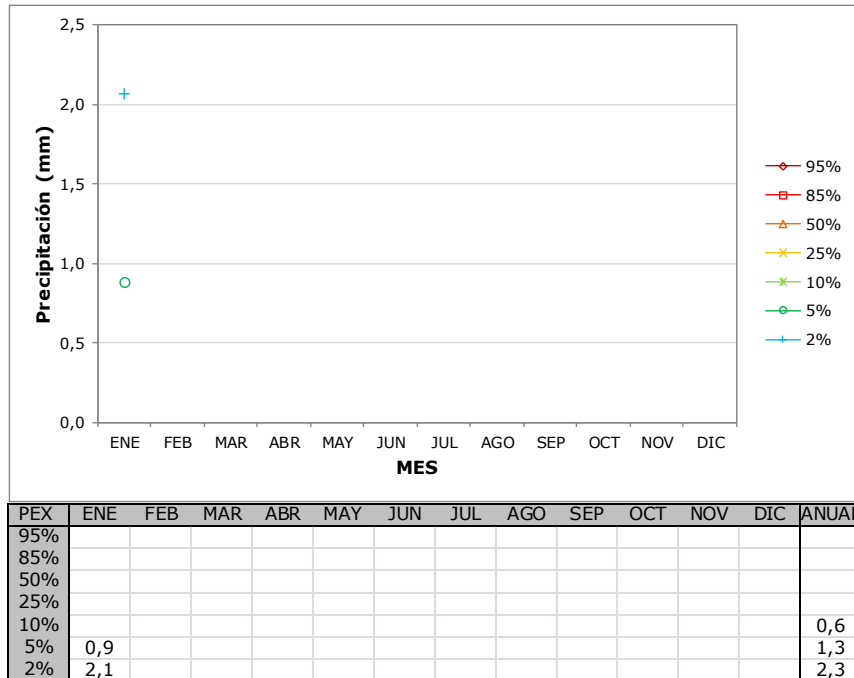
Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 3.3-6
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN PARSHALL N°2



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 3.3-7
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN QUILLAGUA



Fuente: Elaboración Propia

En las figuras anteriores se puede apreciar que la parte baja de la cuenca, representada por la estación Quillagua, no presenta precipitaciones la mayor parte del año y sólo se producen algunas escasas precipitaciones durante Enero. La parte media y alta de la cuenca, representadas por el resto de las estaciones, presentan sus valores máximos entre Enero y Marzo. Por otro lado, durante los meses de Octubre y Noviembre se producen escasas o nulas precipitaciones.

De los valores máximos de las figuras anteriores, se puede apreciar que la estación con el menor valor máximo es Quillagua con 2,1 mm y la con el mayor valor máximo es Linzor, con 550 mm. La estación Quillagua es la de menor altura con 802 m s.n.m. y Linzor es la de mayor altura, con 4.100 m s.n.m.

3.3.2.3. Variación de la Precipitación Versus Altura

Se analizó la variación de la precipitación media anual para una probabilidad de excedencia igual a 50%, en función de la elevación de cada una de las estaciones pluviométricas de propiedad de la DGA, descartando la estación Antofagasta debido a que se encuentra muy alejada de la cuenca del Loa lo que conlleva una baja representatividad en las condiciones pluviales de la cuenca en estudio. Para dicho análisis, se graficaron las precipitaciones medias anuales versus las elevaciones de las estaciones pluviométricas seleccionadas anteriormente, exceptuando la estación Antofagasta tal como se señaló en un comienzo. Las estaciones y precipitaciones medias anuales asociadas a una probabilidad de 50% de excedencia se presentan en el Cuadro 3.3-2, mientras que gráficamente se muestran en la Figura 3.3-8. En base al gráfico anterior, se determinó un gradiente de precipitaciones mediante el ajuste matemático de una línea de tendencia, para la cual se consideró solamente aquellas estaciones meteorológicas por sobre la cota 2.300 m s.n.m. (Calama) con el objeto de representar más adecuadamente el importante efecto orográfico sobre este gradiente a altitudes por sobre esa cota. La expresión algebraica que modela el gradiente de precipitaciones en dicho sector resultó ser de la forma:

$$Pp_{MA} = 0,0585 \cdot H - 143,86$$

Donde:

Pp_{MA} : Precipitación Media Anual con Probabilidad de Excedencia igual a 50% (mm).

H : Altitud (m s.n.m.)

CUADRO 3.3-2
ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DGA CONSIDERADAS Y
PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES CON PROBABILIDAD
DE EXCEDENCIA DE 50%

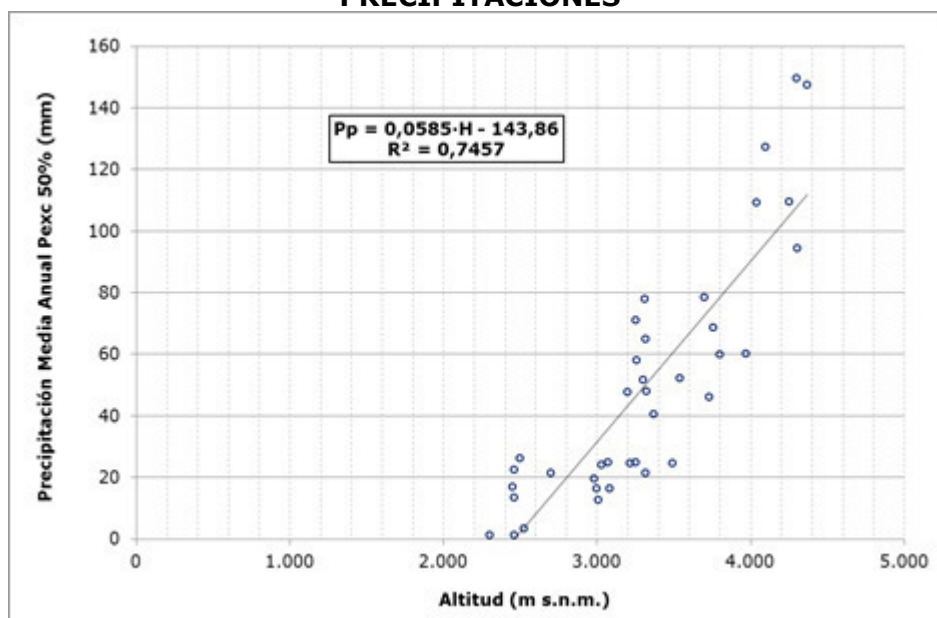
Estación DGA	Altitud (m s.n.m.)	PMA (Pexc 50%) (mm)
Ayquina	3.031	24,04
Calama	2.300	1,33
Caspana	3.260	57,97
Chiu-chiu	2.524	3,40
Conchi Embalse	3.010	12,56

**CUADRO 3.3-2
ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DGA CONSIDERADAS Y
PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES CON PROBABILIDAD
DE EXCEDENCIA DE 50%**

Estación DGA	Altitud (m s.n.m.)	PMA (Pexc 50%) (mm)
Conchi Muro Embalse	3.000	16,41
Conchi Viejo	3.491	24,70
Cupo	3.370	40,59
El Tatio	4.370	147,52
Inacaliri	4.040	109,25
Lequena	3.320	48,05
Linzor	4.100	127,33
Ojos de San Pedro	3.800	59,95
Parshall N°2	3.318	21,37
Quinchamale	3.080	16,31
Río Loa antes Represa Lequena	3.315	64,82
Río Salado en Sifón Ayquina	2.980	19,47
Salado Embalse	3.200	47,55
San Pedro de Conchi	3.217	24,51
Silala	4.305	94,24
Toconce	3.310	77,86
Turi	3.070	24,98
Collahuasi	4.250	109,37
Copaquire	3.540	52,16
Guatacondo DGA	2.460	1,21
San Pedro de Atacama	2.450	17,02
Ujina	4.300	149,64
Coposa	3.760	68,62
Ollague	3.700	78,53
Cebollar	3.730	45,96
Ascotan	3.970	60,18
Toconao Reten	2.460	22,47
Toconao Experimental	2.500	26,09
Camar	2.700	21,51
Socaire	3.251	24,95
Peine	2.460	13,55
Talabre	3.300	51,72
Río Grande	3.250	70,94

Fuente: Elaboración propia y datos de la DGA.

FIGURA 3.3-8
VARIACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN CON LA ALTURA Y GRADIENTE DE
PRECIPITACIONES



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.4. Curvas de Isoyetas

Se trazaron isoyetas para la toda la cuenca del río Loa, empleando tanto la relación funcional de precipitación media anual (Probabilidad de Excedencia 50%) y altitud determinada en el subpunto anterior como curvas de nivel, con el objeto de representar adecuadamente el efecto orográfico de las precipitaciones en el sector de interés.

La construcción de estas isoyetas, que representan una condición hidrológica de año normal, se realizó empleando el software de interpolación geoestadística espacial Surfer y corrigiendo manualmente las curvas generadas de modo de incorporar la variación espacial de las precipitaciones a través del gradiente de lluvias, la que está fuertemente dominada por el relieve de las cordilleras y zonas precordilleranas.

En la Figura 3.3-9 se presenta el mapa de isoyetas para la cuenca del Loa, las que varían aproximadamente desde los 10 mm en la parte media de esta cuenca hasta los 200 mm en los cerros más altos ubicados en la parte alta de la cuenca del Loa. En la misma figura se presentan a modo de comparación las isoyetas correspondientes al Balance Hídrico Nacional de 1987.

En términos de forma se aprecian similitudes entre ambos mapas de isoyetas, sin embargo, en términos de magnitud se aprecia que las curvas actuales corresponden a menores valores de precipitación en comparación con el balance hídrico. Esto se debe principalmente a que el balance hídrico utiliza para la segunda región el periodo 1961 – 1980 en la generación de isoyetas, mientras que en el presente estudio se utilizó la información hasta 2013, es decir, más de 30 años de información adicional en las estaciones más antiguas. Además, el presente estudio considera una cantidad mayor de estaciones.

3.4. Caracterización Fluviométrica de la Cuenca

A continuación se presenta la caracterización de los caudales de la cuenca del río Loa que incluye específicamente los caudales medios mensuales asociados a las estaciones fluviométricas controladas por la DGA en el área en estudio y la generación de curvas de variación estacional en cada una de las estaciones.

3.4.1. Estaciones Fluviométricas Utilizadas

Para esta cuenca se cuenta con estadística de 22 estaciones de control fluviométrico de la DGA, de las cuales 14 se encuentran ubicadas en el río Loa, 3 en el río Salado, 3 en el río San Pedro, 1 en el río Toconce y 1 en el canal Quillagua. El Cuadro 3.4-1 presenta el detalle de las estaciones utilizadas y en la Figura 3.4-1 se observan sus ubicaciones espaciales.

**CUADRO 3.4-1
ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS CONSIDERADAS**

Nº	Estación	UTM N (m)	UTM E (m)	Altura (m.s.n.m.)
1	Canal Quillagua en Quillagua	444.473	7.604.611	910
2	Río Loa antes Represa Lequena	534.949	7.605.229	3.315
3	Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua	446.354	7.598.565	950
4	Río Loa D. J. San Salvador (Chacance)	445.344	7.523.365	1.238
5	Río Loa D. J. San Salvador-(M. Elena)	441.738	7.528.698	1.240
6	Río Loa en Alcantarilla Conchi N°2	540.331	7.569.426	2.932
7	Río Loa en Chintoraste	502.227	7.511.174	2.200
8	Río Loa en Conchi	540.485	7.568.732	3.010
9	Río Loa en Desembocadura	390.619	7.630.039	0
10	Río Loa en Escorial	511.256	7.517.865	2.450
11	Río Loa en Finca	500.936	7.510.768	2.100
12	Río Loa en Quillagua	444.430	7.605.359	802
13	Río Loa en Salida Embalse Conchi	539.131	7.564.050	2.950
14	Río Loa en Vado Santa Bárbara (DOH)	540.243	7.569.856	2.950
15	Río Loa en Yalquincha	512.399	7.517.311	2.300
16	Río Salado A. J. Curti	578.009	7.536.077	3.080
17	Río Salado A. J. Loa	536.670	7.526.151	2.500
18	Río Salado en Sifón Ayquina	567.487	7.534.983	2.980
19	Río San Pedro en Camino Internacional	548.285	7.573.604	3.320
20	Río San Pedro en Parshall N°1	565.242	7.570.373	3.700
21	Río San Pedro en Parshall N°2 (BT. CHILEX)	550.047	7.573.027	3.318
22	Río Toconce antes Represa Sendos	588.046	7.536.321	3.245

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2. Metodología Utilizada y Resultados

3.4.2.1. Caudales Medios Mensuales

Las estadísticas fluviométricas de todas las estaciones consideradas cuentan con años en que para algunos meses no existe registro de datos. Para poder trabajar con estadísticas más completas se debió rellenar la información.

El relleno de los datos se realizó por medio de correlaciones mensuales entre las estaciones. La decisión de cual estación utilizar para el relleno de información en cada caso se basó en aquella que presentara un mejor coeficiente de correlación respecto a la estación objetivo.

En el caso de los caudales no se extendieron las estadísticas y el relleno sólo se realizó en periodos cortos de tiempo con información faltante, debido a que la estadística se utilizará sólo para calibrar el modelo MAGIC y, por lo tanto, no tiene sentido extender la estadística y crear incertidumbre en relación con la precisión del relleno.

Las series rellenadas, se presentan en el Anexo 3-5.

3.4.2.2. Curvas de Variación Estacional

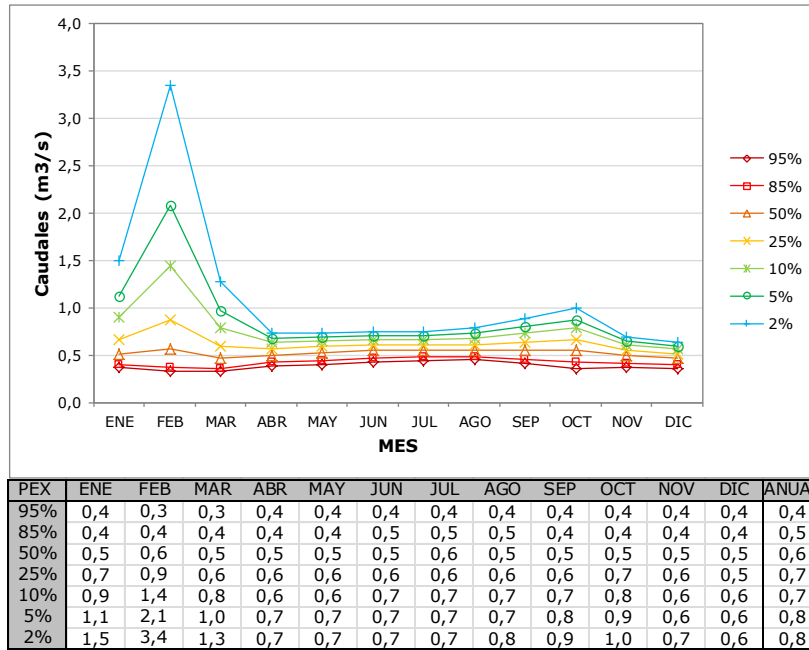
Para construir las curvas de variación estacional se realizó un análisis de frecuencia de las estadísticas obtenidas mediante la metodología del punto anterior. Para esto, se analizaron 6 distribuciones de probabilidad: Normal, Gumbel, Pearson III, Log Normal, Log Pearson III y Log Normal III.

De las distribuciones antes mencionadas, se escogió la que tenía el mejor ajuste para cada mes y con ella se obtuvieron los caudales asociados a las probabilidades de excedencia de 95%, 85%, 50%, 25% y 10%.

Las curvas de variación estacional de todas las estaciones de la cuenca se presentan en el Anexo 3-6.

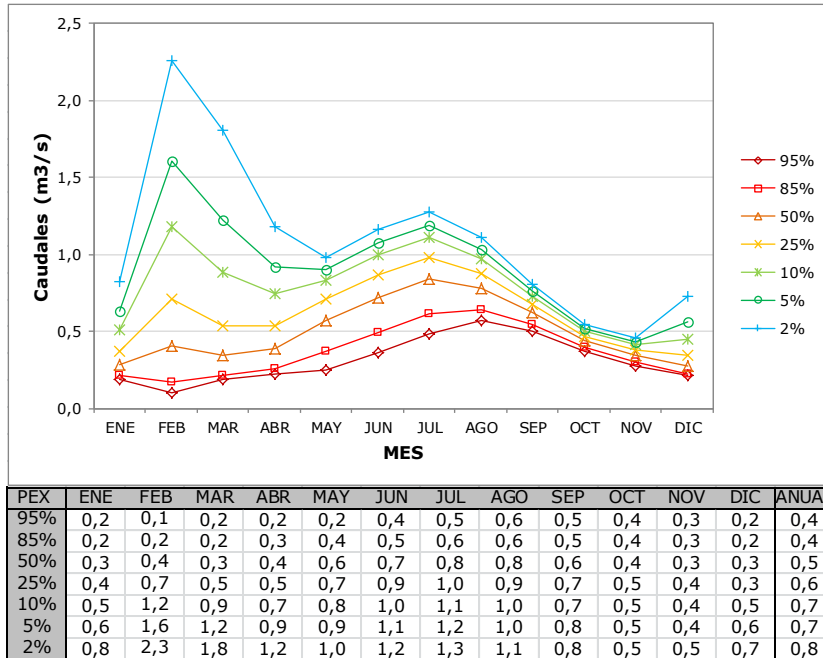
A continuación, se presentan las curvas de las estaciones Río Loa Antes de Represa Lequena, Río Loa Después de la Junta con San Salvador (M. Elena), Río Loa en Desembocadura, Río Loa en Finca y San Pedro en Parshall N°1, ya que se considera que representan adecuadamente la tendencia espacial de la cuenca.

FIGURA 3.4-2
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO LOA ANTES REPRESA LEQUENA



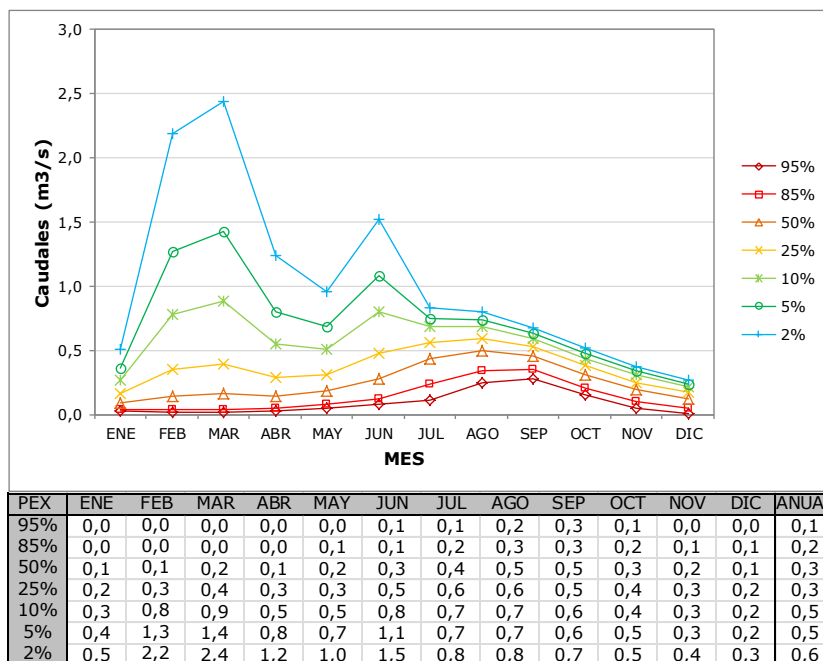
Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 3.4-3
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO LOA DESPUES DE LA JUNTA SAN SALVADOR (M. ELENA)



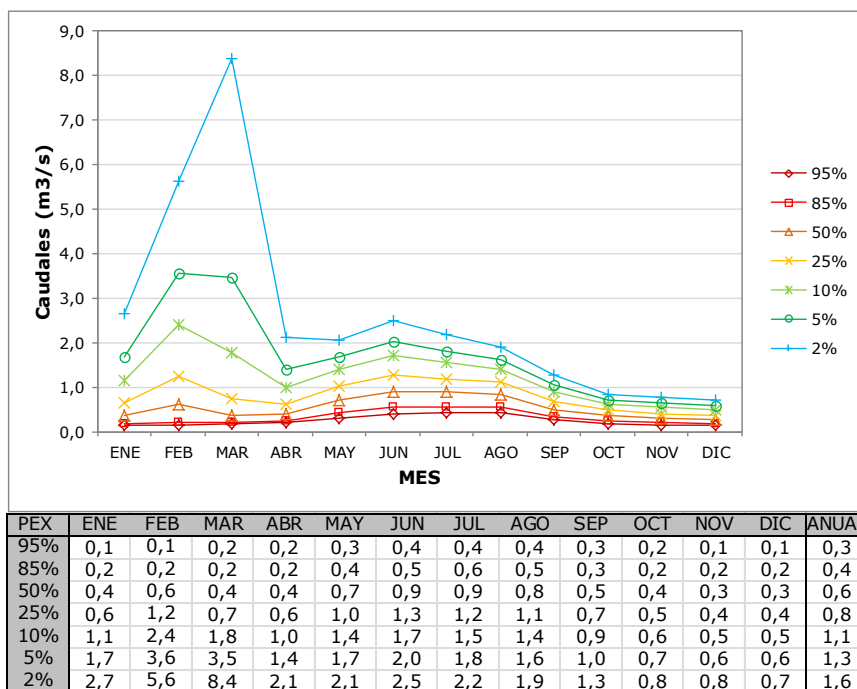
Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 3.4-4
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO LOA EN DESEMBOCADURA



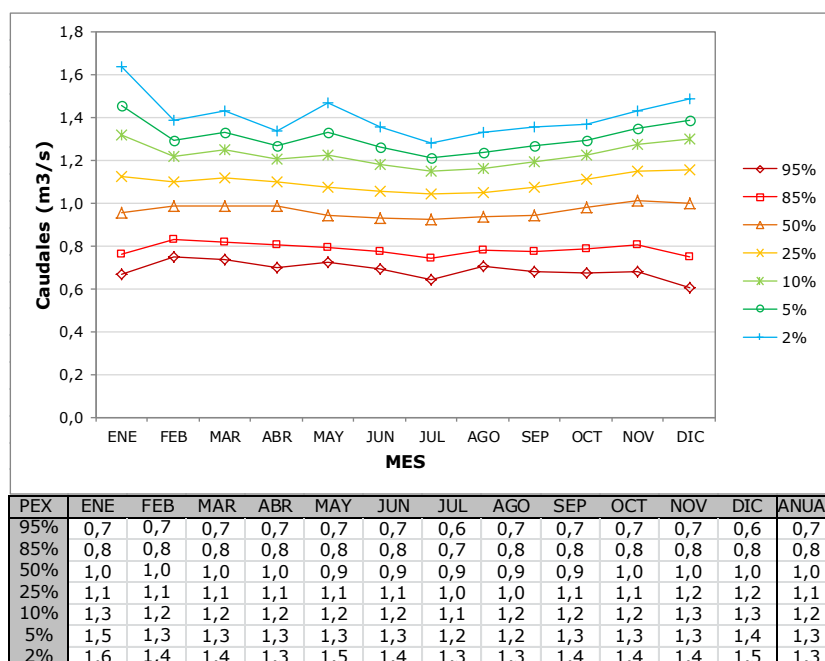
Fuente: Elaboración Propia

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



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 3.4-6
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO SAN PEDRO PARSHALL N°1



Fuente: Elaboración Propia

De las figuras antes presentadas se puede observar que la mayor parte de las estaciones presentan un régimen pluvial para los años húmedos con valores máximos en los meses de Febrero y Marzo. Por otro lado, durante los años secos no existen variaciones importantes de los caudales y los valores máximos se producen, generalmente, en el período entre los meses de Junio y Agosto. De lo anterior, se concluye que la cuenca posee un régimen predominantemente pluvial y los períodos secos están asociados a baja precipitación.

Por otro lado, la estación San Pedro en Parshall N°1 presenta caudales bastante uniformes, tanto en años húmedos como secos. Esto se debería a que la estación se encuentra controlada por el caudal captado por los drenes de Ojos de San Pedro para el periodo anterior al año 1990 y de manera posterior por la explotación subterránea por medio de pozos.

3.5. Estudio de Crecidas

Se ha llevado a cabo un estudio de crecidas en base a la información de caudales instantáneos máximos registrados por la DGA. Estos registros se encuentran disponibles en 15 puntos, con diferente extensión de la información.

Dado el nivel de información disponible, el análisis de crecida desarrollado se enfoca en la estimación de los caudales máximos instantáneos para diferentes periodos de retorno mediante un análisis de frecuencia de la información. De este modo, los resultados obtenidos representan un peak de caudal y no representan el comportamiento del flujo durante la duración total de la tormenta.

Para este análisis fueron considerados sólo los años que disponían de información de caudal máximo instantáneo para todos los meses, por lo que su valor anual representa efectivamente el valor máximo registrado durante ese año. Dado lo anterior, sólo 8 de los puntos con registros presentan información suficientemente extensa como para permitir la realización de un análisis de frecuencia adecuado y se muestran en el Cuadro 3.5-1.

**CUADRO 3.5-1
CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS ANUALES (m³/s)**

Año	RÍO LOA ANTES REPRESA LEQUENA	RÍO LOA EN ALCANTARILLA CONCHI N°2	RÍO LOA EN SALIDA EMBALSE CONCHI	RÍO SAN PEDRO EN PARSHALL N°1	RÍO SAN PEDRO EN PARSHALL N°2	RÍO TOCONCE ANTES REPRESA SENDOS	RÍO SALADO A. J. CURTI	RÍO SALADO EN SIFON AYQUINA
1968	-	-	-	-	1,28	-	-	-
1969	0,87	-	-	-	-	-	-	-
1970	-	-	-	1,06	-	-	-	-
1971	-	-	-	-	0,98	-	-	-
1972	-	-	-	1,21	1,15	-	-	-
1973	-	-	-	-	-	-	-	-
1974	-	-	-	1,41	-	-	-	-
1975	-	-	-	-	-	-	-	-
1976	-	-	-	-	-	-	-	-
1977	26,20	-	-	-	-	-	-	-
1978	2,38	-	5,92	-	0,84	-	1,51	1,63
1979	-	-	6,84	-	1,39	-	5,98	5,01
1980	-	2,49	2,94	-	-	-	-	5,20
1981	4,80	1,45	10,68	-	0,88	-	10,84	24,80
1982	1,21	1,21	3,31	-	0,92	-	7,41	5,20
1983	-	2,77	1,68	1,03	0,85	-	8,94	1,95
1984	25,84	-	16,40	1,21	-	4,37	19,52	19,38
1985	5,00	57,62	5,32	1,49	1,10	8,91	38,40	25,20
1986	-	1,88	2,79	1,21	-	-	12,42	-
1987	9,88	21,11	-	1,03	0,93	2,43	20,38	-
1988	3,68	4,25	2,06	1,38	-	0,80	3,54	-
1989	5,10	3,38	1,66	1,20	1,04	4,53	30,60	25,56
1990	2,51	2,68	2,11	1,27	1,06	2,32	1,36	1,31
1991	4,06	4,06	2,61	1,94	-	1,01	8,61	8,51
1992	1,11	1,82	1,82	1,94	1,23	0,93	0,51	0,79
1993	9,75	32,18	1,42	1,52	1,28	4,62	3,97	1,70

CUADRO 3.5-1
CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS ANUALES (m³/s)

Año	RÍO LOA ANTES REPRESA LEQUENA	RÍO LOA EN ALCANTARILLA CONCHI N°2	RÍO LOA EN SALIDA EMBALSE CONCHI	RÍO SAN PEDRO EN PARSHALL N°1	RÍO SAN PEDRO EN PARSHALL N°2	RÍO TOCONCE ANTES REPRESA SENDOS	RÍO SALADO A. J. CURTI	RÍO SALADO EN SIFON AYQUINA
1994	0,68	0,74	1,32	1,49	1,47	2,17	-	3,57
1995	14,80	21,31	3,39	1,70	1,41	4,63	18,99	14,64
1996	0,83	1,01	1,21	1,41	1,27	0,73	0,50	0,58
1997	7,63	9,74	3,16	1,35	1,29	19,29	59,35	51,54
1998	12,27	44,49	2,03	1,62	1,37	27,28	9,37	7,44
1999	15,09	33,55	-	1,46	1,55	4,48	12,26	9,84
2000	32,25	79,57	5,54	1,74	1,97	28,63	-	69,64
2001	-	25,00	-	1,45	1,82	-	144,84	109,32
2002	2,07	117,18	-	1,52	1,58	-	22,67	31,79
2003	0,66	1,01	1,85	1,41	2,00	0,58	3,34	9,95
2004	10,05	10,18	2,53	1,30	1,31	13,48	69,52	31,48
2005	7,38	8,60	2,05	1,25	1,49	-	27,56	15,26
2006	10,19	-	3,84	1,90	1,26	-	80,55	128,85
2007	5,03	-	2,47	2,21	1,32	0,88	2,72	2,70
2008	3,39	-	1,06	1,42	-	-	-	-
2009	-	-	1,06	-	1,25	-	3,70	1,51
2010	-	-	1,10	-	-	-	0,59	-
2011	-	-	20,12	-	-	-	-	-
2012	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: DGA

De la estadística anterior se observa que, a pesar de las condiciones desérticas y los bajos caudales medios observados en las diferentes estaciones de la cuenca, existen eventos extremos de gran magnitud como el presentado en el año 2002 en Río Loa en Alcantarilla Conchi N°2 (117,18 m³/s), el año 2006 en Río Salado en Sifón Ayquina (128,85 m³/s) y el año 2001 en Río Salado A.J. Curti (144,84 m³/s).

De acuerdo a la estadística DGA, en su mayoría los valores máximos anuales ocurren durante el periodo de verano, principalmente entre los meses de Diciembre y Marzo, debido principalmente a las lluvias de alta cordillera producidas por el invierno boliviano.

El análisis de frecuencia fue realizado tomando en consideración que la estadística utilizada corresponde a eventos extremos, por lo que las distribuciones de probabilidad

Gumbel y Gamma son las más adecuadas para realizar el correspondiente ajuste. De acuerdo a esto, los valores extremos de caudal máximo instantáneo en los diferentes puntos de análisis son los mostrados en el Cuadro 3.5-2.

**CUADRO 3.5-2
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

La estadística de los caudales máximos instantáneos anuales diarios se presenta en el Anexo 3-7.

3.6. Pérdidas y Recuperaciones

Las pérdidas y recuperaciones de agua en los cauces de la cuenca del río Loa fueron analizadas en función de los registros de aforos sistemáticos proporcionados por la DGA. De los sectores aforados por la DGA, 26 puntos poseen una estadística suficientemente larga como para poder llevar a cabo este análisis (Cuadro 3.6-1 y Figura 3.6-1)

**CUADRO 3.6-1
PUNTOS CON AFOROS SISTEMÁTICOS EXTENSOS**

Punto de Aforo	Periodo	
RÍO LOA ANTES REPRESA LEQUENA	1.984	2.012
RÍO LOA EN QUEBRADA QUINCHAMALE	1.985	1.986
RÍO LOA EN VADO SANTA BARBARA (DOH)	2.006	2.012
RÍO LOA EN ALCANTARILLA CONCHI N°2	1.981	2.006
RÍO LOA EN SALIDA EMBALSE CONCHI	1.984	2.012
RÍO SAN PEDRO EN PARSHALL N°1	1.983	2.012
RÍO SAN PEDRO EN PARSHALL N°2 (BT. CHILEX)	1.972	2.012
RÍO SAN PEDRO EN CAMINO INTERNACIONAL	1.973	1.989
RÍO SILOLI ANTES B.T. FCAB	2.001	2.012
RÍO SILOLI ANTES REPRESA INACALIRI	2.001	2.012
RÍO TOCONCE ANTES REPRESA SENDOS	1.976	2.012
RÍO SALADO A. J. CURTI	1.976	2.012
RÍO SALADO EN SIFÓN AYQUINA	1.984	2.012
RÍO SALADO A. J. LOA	1.985	2.010
RÍO LOA EN ESCORIAL	1.997	2.012
RÍO LOA EN YALQUINCHA	1.983	2.009
RÍO LOA EN FINCA	1.982	2.012
RÍO LOA ANTES JUNTA SAN SALVADOR	1.979	2.012
RÍO LOA D. J. SAN SALVADOR (CHACANCE)	1.979	2.012
RÍO LOA D. J. SAN SALVADOR-(M. ELENA)	1.993	2.012
VERTIENTE OJOS DE OPACHE	1.996	2.012
RÍO SAN SALVADOR ANTES JUNTA RÍO LOA	1.985	2.012
RÍO LOA ANTES ZONA AGRÍCOLA QUILLAGUA	1.999	2.012
RÍO LOA EN QUILLAGUA	1.959	1.999
RÍO LOA EN PANAMERICANA	1.979	2.007
CANAL QUILLAGUA EN QUILLAGUA	1.980	2.006
CANAL YALQUINCHA O.D. N°1	1.994	2.006
CANAL YALQUINCHA O.I. N°2	1.995	2.006

Fuente: Elaboración Propia

El análisis realizado consiste en la comparación de los caudales asociados a dos puntos de aforo consecutivos dentro de un mismo cauce, evaluándose de este modo el aumento o disminución del caudal en el tramo. Sin embargo, debido al nivel de intervención de la cuenca, esta metodología no considera las posibles extracciones de agua en los tramos de análisis, por lo que el resultado obtenido es sólo una referencia que será utilizada más adelante en la calibración del modelo integrado de la cuenca.

De cualquier modo, las principales captaciones (asociadas a Codelco, SQM, Aguas Antofagasta y FACB) se encuentran identificadas y son tomadas en cuenta en el análisis realizado.

En primer lugar, se definieron los tramos de análisis, en los cuales existían registros coincidentes de aforo. El criterio utilizado fue comparar aquellos aforos que fueron realizados durante el mismo día en un tramo, de este modo se aseguraba que las condiciones del cauce no habían cambiado durante su realización.

Luego, se realizó el análisis en aquellos tramos en que existía suficiente información coincidente como para cubrir los distintos meses del año. De este modo, se definieron los tramos mostrados en el Cuadro 3.6-2.

**CUADRO 3.6-2
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

Se observa que no es posible analizar el río San Salvador en ningún tramo, ya que sólo existen 2 puntos de aforo en esa cuenca y sólo uno de ellos se ubica en el cauce principal. Sin embargo, es de conocimiento que este cauce se genera en su totalidad por afloramientos desde el acuífero de Calama, lo cual fue observado durante la visita inicial a la cuenca del río Loa.

En cuanto al río Loa, si bien existe una gran cantidad de puntos de aforo, muchos tramos presentan información no coincidente en el tiempo, mientras que otros se ven afectados

por aportes significativos, como la junta con los ríos principales, por lo que su análisis se ve de igual manera imposibilitado.

Los tramos presentados anteriormente se analizaron de manera mensual y sus resultados se muestran en el Cuadro 3.6-3, donde los valores positivos representan aumento de caudal en el tramo, mientras que los valores negativos representan pérdidas.

**CUADRO 3.6-3
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
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

Del Cuadro anterior se aprecian tanto tramos de recuperación como de pérdida, los cuales son analizados a continuación.

La estadística de los aforos realizados por la DGA se presenta en el Anexo 3-8.

3.6.1. Tramos de Recuperación

Si bien los aforos en Lequena y Quinchamale son coincidentes sólo en 2 años, estos muestran (exceptuando el mes de Enero) valores relativamente estables de recuperación.

Si bien el valor promedio corresponde a $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$, el aforo en Lequena se realiza aguas arriba de la captación de Aguas Antofagasta de $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que la recuperación en este tramo sería de aproximadamente $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$.

En el caso del río Siloli, si bien se observa una pérdida de $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ en el tramo entre las captaciones de FCAB e Inacaliri, se debe tomar en cuenta que el valor promedio captado por FCAB es aproximadamente $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que en realidad existe una recuperación de $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$.

El tramo del río Salado entre la junta con el río Curti y Sifón Ayquina presenta, de igual manera, importantes recuperaciones ($0,28 \text{ m}^3/\text{s}$), las cuales son explicadas por la serie de vertientes aportantes al cauce que existen en este tramo.

El tramo del río Salado entre Sifón Ayquina y la junta con el Loa presenta recuperaciones durante los meses de invierno y pérdidas en verano, con un promedio de $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ que se considera dentro de los márgenes de error, por lo que se considera que el caudal en este tramo se mantiene estable.

Por último el tramo del río Loa entre Quillagua y Panamericana presenta un leve aumento de caudal de $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$. Este hecho fue observado en la visita preliminar a la cuenca, ya que si bien los canales de regadío captaban casi la totalidad del caudal, el flujo en Panamericana era claramente superior.

3.6.2. Tramos de Pérdida

Si bien se observa una pérdida promedio de $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ entre el río San Pedro en Parshall 1 y Parshall 2, el valor es muy pequeño, por lo que se considera que este tramo no sufre variación significativa.

En cuanto al tramo entre Parshall 2 y Camino Internacional, se observa una gran pérdida promedio de $0,80 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que la distancia entre ambos puntos es de aproximadamente 2 km. Esto se explica por la presencia de la captación de Codelco en Parshall 2, que extrae un promedio de aproximadamente $1,00 \text{ m}^3/\text{s}$.

En cuanto al tramo del río Loa entre Yalquincha y Escorial, las observaciones en terreno no permiten justificar un caudal de pérdida tan alto en un tramo tan corto. Sin embargo, al encontrarse a la entrada de la ciudad de Calama, esta pérdida podría ser el resultado de captaciones no identificadas.

En el tramo del río Loa entre Escorial y La Finca se observa una gran pérdida de $0,74 \text{ m}^3/\text{s}$, la cual se explica por la gran cantidad de canales que captan agua en este tramo.

Finalmente, el tramo del río Loa entre Chacance y María Elena presenta una pérdida de $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales aproximadamente la mitad corresponden a la aducción María Elena de SQM.

4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Este capítulo tiene como finalidad efectuar una caracterización subterránea que considere la definición del marco geológico en conjunto con uno geomorfológico de la cuenca del río Loa, en el que permitan identificar en definitiva las unidades principales, zonas de interés hidrogeológico y la estimación cuantitativa de los parámetros del acuífero y niveles subterráneos.

Sobre la base de lo anterior, en este capítulo se aborda la caracterización hidrogeológica, principalmente en base a las distintas fuentes consultadas tanto estudios de carácter públicos como privados. El resultado final de esta caracterización, permitirá chequear la consistencia del modelo numérico del sistema acuífero de Calama entregado por la DGA y eventualmente actualizarlo. Por otro lado, la información generada, permitirá la representación de los cuerpos acuíferos a través del programa MAGIC, herramienta en la cual se simulará finalmente el Modelo Integrado.

MAGIC representa la dinámica interna de los acuíferos como un volumen prismático donde es válida la ley de Darcy, y por lo tanto, modela condiciones estacionarias del acuífero. Topológicamente esta herramienta computacional, define un acuífero como un nodo unido mediante conectores de flujo a otros nodos como acuíferos adyacentes, cauces superficiales, zonas de riego, pozos existentes, etc. En los capítulos posteriores, se presentará una descripción más detallada de este programa y la distribución definitiva de la red hídrica adoptada.

La elaboración de los marcos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos para este estudio se realizó a partir de los siguientes antecedentes consultados:

- Proyecto CHI-535: Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande. CORFO. 1977.
- Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa. CODELCO-Agua Ingenieros Consultores. 1987.
- Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea Factibles de Constituir en los Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región. DARH. 2003.
- Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, SIT N°85. DGA. 2003.
- Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. DGA-CADE IDEPE. 2004.
- Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. DICTUC. 2007.
- Modelamiento Hidráulico del Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-Knight Piésold. 2010.
- Estudio Acuífero de Calama Sector Medio del Río Loa, Región de Antofagasta, SIT N°295. DGA-MATRAZ. 2012.
- Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013.

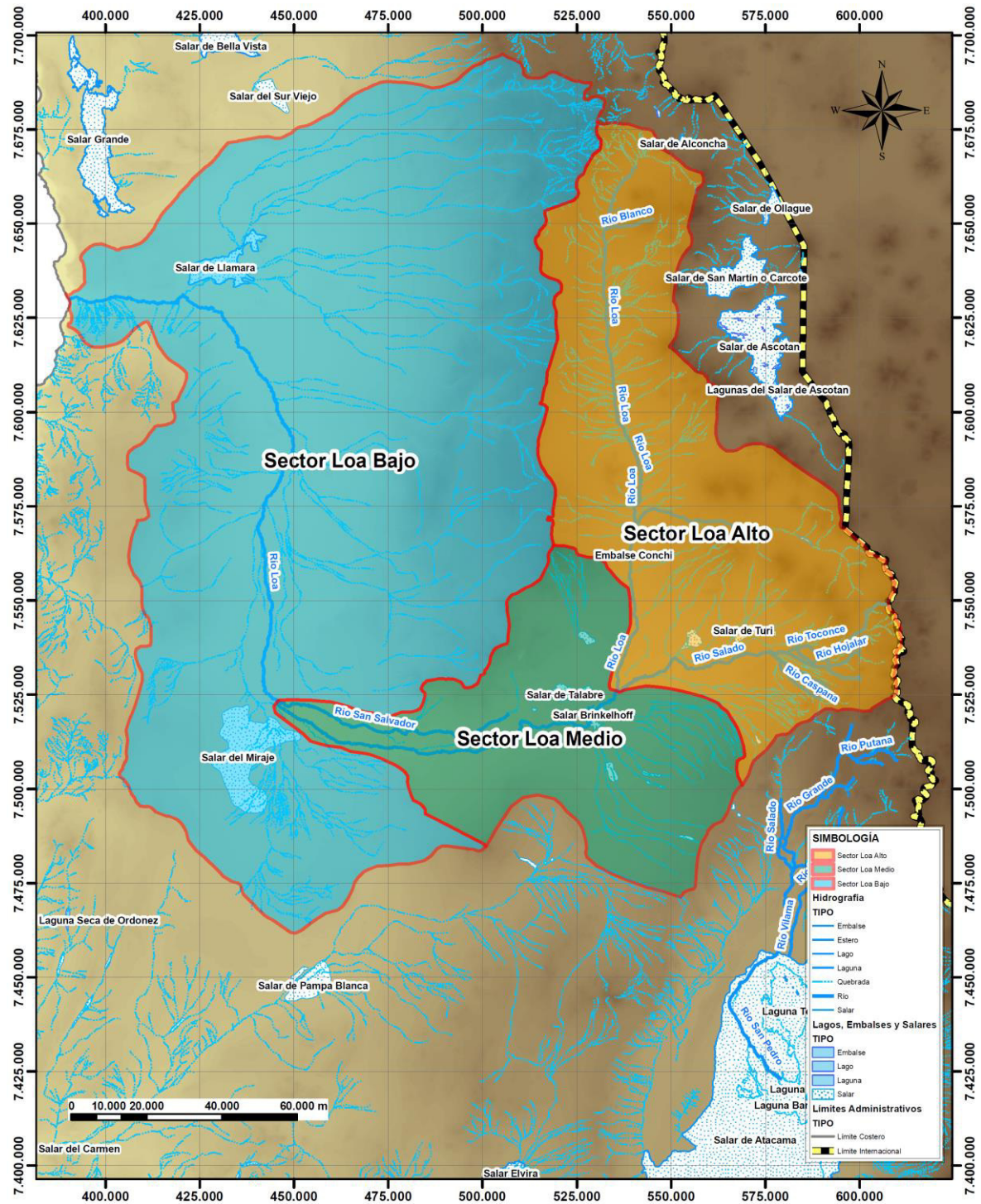
Para el presente estudio y para abordar el marco hidrogeológico, se decidió sectorizar la cuenca del río Loa en 3 sectores de interés para entregar un enfoque de análisis más detallado:

1. 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 de Inacaliri y Salado)
2. Sector Loa Medio (Río Loa desde aguas abajo de confluencia con el río Salado hasta confluencia con río San Salvador)
3. Sector Loa Bajo (Río Loa desde junta con río San Salvador hasta desembocadura)

En la Figura 4.1-1, se presenta la sectorización hidrogeológica detallada anteriormente y definida para el presente estudio.

Cabe hacer hincapié que la presenta sectorización hidrogeológica, no es 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).

FIGURA 4.1-1
SECTORIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA CUENCA RÍO LOA



Fuente: Elaboración propia.

4.1. Marco Geológico y Geomorfológico de la Cuenca del Río Loa

En los siguientes subpuntos, se presenta la descripción general tanto de la geología como de la geomorfología asociada a la cuenca del río Loa.

4.1.1. Marco Geomorfológico

En lo referente a la geomorfología de la cuenca del río Loa, se distinguen cinco unidades morfológicas principales: Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia, Pre cordillera, Depresión Central y Cordillera de la Costa.

i. Cordillera de los Andes

El relieve de esta unidad se caracteriza por presentar diferencias de alturas apreciables entre los sectores más bajo donde se encuentran las quebradas y las cimas de los cerros y volcanes que predominan en esta unidad morfológica, sobrepasando estos últimos muchas veces los 5.000 m. Asimismo, esta unidad se compone en general por franjas de carácter volcánicas de origen cenozoico a cuaternario, destacándose los volcanes Miño, Palpana y Chela, con alturas que alcanzan los 5.425, 6.023 y 5.648 m, respectivamente.

El nacimiento del río Loa se origina a los pies del volcán Miño alrededor de los 5.000 m s.n.m. en su falda occidental. Más hacia al sur, el río Loa recibe como primer aporte hídrico de relevancia, aguas provenientes del río San Pedro, cuya cuenca hidrográfica en su lado más oriental, es posible advertir la existencia de los volcanes de San Pedro y San Pablo con alturas de 6.145 y 6.092 m, respectivamente, en plena Cordillera de Los Andes.

Luego a la altura de la localidad de Chiu Chiu, el río Loa recibe como segundo aporte, aguas procedentes del río Salado, en cuya cuenca asociada, el relieve andino muestra una disminución en su altura en comparación con la zona ubicada hacia el Norte. En este sector se destaca la presencia de los cerros Del León con 5.760 m y Toconce con 5.419 m de altura.

ii. Depresión Intermedia

Esta unidad concuerda mayoritariamente con el cauce del río Loa, desde aguas abajo de su nacimiento hasta aproximadamente en el sector de Calama, con rangos de altitud que se mueven entre los 2.900 y 3.400 m s.n.m. En todo este tramo el cauce de este río se encuentra flanqueado tanto en su parte oriental como occidental por cordones montañosos longitudinales. De acuerdo a esto último, esta unidad geomorfológica separaría lo que es por un lado el sector precordillerano identificado como cordón del Millo y por el otro la Cordillera de Los Andes.

Desde aguas abajo de la confluencia del río Salado con el Loa, este último sufre un cambio en su orientación Norte-Sur, girando en 90° hacia el poniente.

iii. Pre cordillera

Esta unidad se sitúa entre la Depresión Central y la Depresión Intermedia, elevándose entremedio de ambas. Del relieve de esta unidad, destacan los cerros de Poquis (4.589 m), Pajonal (4.542 m), Yoca (4.537 m), Chuncullani (4.808 m) y Yabricoyita (4.896 m). Además es posible identificar el cordón del Millo o Del Medio con alturas sobre los 4.000 m cuya el cual drena aguas de escurrimiento intermitente tanto hacia el lado occidental (Depresión Central) como al oriental (Depresión Intermedia).

Según el estudio de CADE-IDEPE (2004) para la DGA, el valle de Calama se encuentra dentro de esta unidad morfológica, actuando como nexo entre la Depresión Intermedia-Cordillera de Los Andes y Depresión Central. Además este valle está constituido por un amplio plano depositacional cuya mayor longitud está en sentido Este - Oeste, siguiendo el mismo recorrido del río Loa y con una pendiente que varía entre 1 a 2%.

iv. Depresión Central

Esta unidad presenta rangos de alturas máximas que van entre los 1.000 y 3.200 m. Es posible identificar llanuras como La Pampa del Tamarugal y Pampa Joya, donde se ubica el Salar de Llamara.

Por otro lado, cerca de la localidad de Chacance el río Loa que presenta un sentido de escurrimiento de Este a Oeste desde aguas abajo del sector de Calama, vuelve a cambiar su trayectoria, ésta vez tomando un rumbo de Sur a Norte hasta Quillagua. Durante todo este tramo, el río Loa recibe las aguas que provienen de las quebradas intermitentes del lado oriental del cauce del Loa y las procedentes del flanco occidental de la Cordillera de Domeyko. Las salidas de esta quebradas en dirección a la Depresión Central se caracterizan por conos de deyección de importancia y que vierten sobre la Pampa del Tamarugal.

Desde el poblado de Chacance hasta el de Quillagua, el relieve viene dado por las alturas de los cerros La Joya y De La Angostura, con alturas de 1.287 y 1.259 m, respectivamente.

v. Cordillera de la Costa

El relieve de esta unidad se presenta muy elevado y escarpado con cumbres que alcanzan aproximadamente los 2.000 y 1.500 m de altura, destacándose principalmente los cerros: Tolar, Catorce de Julio y Chuculay.

En cuanto a la trayectoria de escurrimiento del cauce del río Loa, éste hace su último giro en dirección Este-Oeste a la altura de la localidad de Quillagua para posteriormente atravesar la Cordillera de la Costa y desembocar al mar en un profundo desfiladero de 500 metros de altura.

4.1.2. Marco Geológico General

Según el estudio de CADE-IDEPE (2004) para la DGA, se analizó el tema geológico a un nivel de detalle en donde a partir de la información entregada por el Mapa Geológico de Chile a escala 1: 1.000.000 del SERNAGEOMIN, realizando una descripción de cada una de las formaciones rocosas que se identifican en toda la cuenca del río Loa. Esta misma descripción se muestra a continuación para cada uno de los sectores analizados de la cuenca en ese estudio.

- Sector de Desembocadura:

Rocas Qa, del tipo sedimentaria del Pleistoceno-Holoceno. Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos.

Rocas JKg, del tipo Intrusivas del Jurásico-Cretácico. Granodioritas, dioritas, monzodioritas y granitos; pórfidos dacíticos y andesíticos.

Rocas CPg, del tipo Intrusivas del Carbonífero-Pérmico. Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas de hornblenda y biotita, localmente de muscovita.

Rocas OM1c, del tipo sedimentaria del Oligoceno-Mioceno. Secuencias sedimentaria continental parálicas o aluviales: conglomerados, areniscas, lutitas, calizas y mantos de carbón.

- Salar de Llamara:

Rocas MQs, del tipo sedimentaria del Mioceno-Cuaternario. Depósitos evaporíticos sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos, localmente bórax y/o litio.

Al poniente del Salar se ubican *rocas DC4*, del tipo metamórficas del Deunimico-Carbonifero. Metareniscas, filitas y en menor proporción mármoles, chesta, metabasaltos y metaconglomerados, metaturbiditas con facies de "melange".

- Zona sur-poniente de la cuenca:

Rocas CPg, del tipo intrusivas del Carbonífero-Pérmico. Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas de hornblenda y biotita, localmente de muscovita.

Rocas MP1c, del tipo sedimentarias del Mioceno Superior- Pleioceno. Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales; conglomerados, areniscas y limonitas.

- Zona central de la cuenca:

Rocas MP1c, del tipo sedimentarias del Mioceno Superior-Pleioceno. Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales; conglomerados, areniscas y limonitas.

Otro tipo de intercalaciones corresponden a:

Rocas MQs, del tipo sedimentaria del Mioceno-Cuaternario. Depósitos evaporíticos sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos, localmente bórax y/o litio.

Rocas DC4, del tipo metamórficas del Deunimico-Carbonifero. Metareniscas, filitas y en menor proporción mármoles, chesta, metabasaltos y metaconglomerados, metaturbiditas con facies de "melange".

Rocas Qa, del tipo sedimentaria del Pleistoceno-Holoceno. Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos.

Rocas KTg, del tipo intrusivas del Cretácico superior-Terciario inferior. Granodioritas dioritas y pórfido graníticas.

- Zona nor-oriente de la cuenca:

Rocas P3i, del tipo Volcánicas del Plioceno. Centros volcánicos; lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclásticos y lavas basálticos a andesítico basáltica.

- Quebrada de Paqui:

Rocas MP1I, del tipo sedimentarias del Mioceno superior-Plioceno. Secuencias sedimentarias lacustres, en partes fluviales y aluviales, limos, arenas, conglomerados, calizas y cenizas.

- Zona media alta de la cuenca:

Esta está compuesta por numerosos tipos de rocas en las que destacan principalmente:

Rocas EOp, del tipo intrusiva del Eoceno-oligoceno. Pórfidos granodioríticos, monzoníticos, dioríticos, dacíticos y riolíticos de biotita y hornblenda, portadores de mineralización de tipo pórfido cuprífero gigante.

Rocas E3, del tipo volcánicas del Eoceno. Secuencias y centros volcánicos continentales, lavas y brechas basálticas a andesíticas con intercalaciones de rocas piroclásticas y domos riolíticos.

Rocas KT1c, del tipo sedimentaria del Cretácico superior-Terciario inferior. Secuencias sedimentarias continentales aluviales y fluviales; conglomerados, areniscas y limolitas rojizas.

Rocas Eg, del tipo intrusiva del Eoceno. Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, dioritas y monzodioritas de piroxeno y bioita; pórfidos dacíticos y riolíticos.

Rocas CP3, del tipo volcánicas del Carbonífero-Pérmico. Secuencia volcánica continentales, lavas, domos, tobas y brechas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas. Incluye cuerpos hipabasales riolíticos.

Rocas Trg, del tipo intrusiva del Triásico. Granitos leucocráticos, monzo y sierogranitos de biotita y muscovita, granodioritas de biotita y hornblenda, pórfidos hipabasales.

Rocas DC1, del tipo sedimentaria del Devónico-Carbonífero. Secuencias sedimentarias marinas en parte transicionales, areniscas, cuarzofeldespáticas, lutitas micáceas, conglomerados.

Rocas pCO4, del tipo metamórficas del Precámbrico-Ordovícico. Esquistos micaceanos, migmatitas y en menor proporción anfíbolitas, ortoneises, cuarcitas y filitas con protolitos de edades desde precámbrico a paleozoico temprano y de metamorfismo del Cámbrico-Ordovícico.

Rocas CPg, del tipo intrusivas del Carbonífero-Pérmico. Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas de hornblenda y biotita, localmente de muscovita.

Rocas Ksg, del tipo intrusivas del Cretácico superior. Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxeno, biotita y hornblenda pórfidos andesíticas y dioríticos

En el Plano 4-1, se presenta el Mapa Geológico a escala 1:1.000.000 del SERNAGEOMIN para la cuenca del río Loa.

Para efectos del actual estudio, resulta adecuado agrupar las variadas formaciones rocosas identificadas en los párrafos precedentes, de acuerdo al análisis realizado por la DGA (2003), en cuyo estudio se abordó el tema geológico desde un punto de vista más macro y a nivel cuenca. Este último análisis resulta ser de utilidad ya que facilita la interpretación hidrogeológica de la cuenca del río Loa y la integración de ésta en el modelo MAGIC.

De acuerdo al informe antes señalado, se postuló la existencia de cuatro grandes series geológicas denominadas: Formación porfirítica (mesozoico), Formación liparítica o riolítica (terciario medio), Formación El Loa o calizas del Loa (terciario medio) y Andesitas y Basaltos de formación más reciente.

La Formación porfirítica básicamente está constituida de rocas fundamentales del tipo sedimentarias volcánicas e intrusivas, tales como: lavas, conglomerados, brechas, areniscas, tobas mesozoicas del jurásico y cretácico inferior, granitos, dioritas, tonalitas, esquistos y anfibolitas. Hidrogeológicamente hablando, estas rocas fundamentales poseen características impermeables y subyacen a todas las demás formaciones.

Esta formación es posible identificarla en la Cordillera del Medio Oeste y en la zona limítrofe que divide los valles de los ríos de San Pedro Inacaliri y Salado. También se la reconoce en el sector de mineral de Chuquicamata y en Cerro Colorado, situada en la ribera Oeste del río Loa.

La Formación liparítica o riolítica la constituyen principalmente las tobas, ignimbritas, tufitas, rodados y areniscas de carácter riolítico. Esta formación se caracteriza por su permeabilidad variable y donde circularían los flujos subterráneos y se producirían determinados afloramientos. Se extiende por sobre la roca fundamental (formación porfirítica) envolviendo los valles del terciario inferior con un estrato de espesor variable, registrándose espesores de 300 m en el sector alto del río Toconce, 60 m en Ayquina y 50 m en el área de Conchi, y dejando libre los cerros mesozoicos.

Se le reconoce también por el nombre de formación Calama, detectándose en el sector de mismo nombre y se encuentra constituida por gravas, en general, mal estratificadas y mal clasificadas, mientras que en otros puntos la parte basal de la secuencia se encuentra cementada por yeso y minerales de cobre.

Las Calizas del Loa o Formación El Loa, se encuentra conformada esencialmente por calizas de agua dulce que habrían sido depositadas, probablemente por un lago del terciario medio, que se habría extendido sobre el actual curso del río Loa desde Conchi hasta Quillagua. Está formada por dos niveles uno superior e inferior, donde el primero lo constituyen calizas, areniscas calcáreas, travertino y con intercalaciones de ignimbritas. En la capa inferior se detectan secuencias de gravas, areniscas, conglomerados, arcillas, limos y diatomitas.

En la cuenca del río Salado, en particular en el sector de quebrada León, al nivel superior se le asocia con el nombre de Formación Opache mientras que a la capa inferior con la denominación Formación Jalquinche.

Por otro lado, otras formaciones asociadas a las de El Loa, son: la de Lasana y Chiquinaputo, en la que la primera, se la identifica en el sector oriental de la cuenca con presencia de areniscas, limolitas y conglomerados. Por otro lado, la Formación

Chiquinaputo yace por sobre la de Opache también en el sector oriental de la cuenca, y está formada básicamente por areniscas de paleocanales y conglomerados.

Las Andesitas y Basaltos producto de una intensa actividad volcánica en la región durante el período del pleistoceno y que dio origen a los principales volcanes de la cuenca del río Loa, se vieron modificados principalmente la topografía y la red hidrográfica lo que trajo como consecuencia la interrupción de los antiguos valles del terciario con inmensas moles de andesitas y basaltos. Estos volcanes depositaron en toda la zona, especialmente en el área cordillerana, una gran capa de ignimbritas de entre las cuales se reconocen las denominadas Sifón y Cupo, detectadas en la quebrada León y pampa Llalqui.

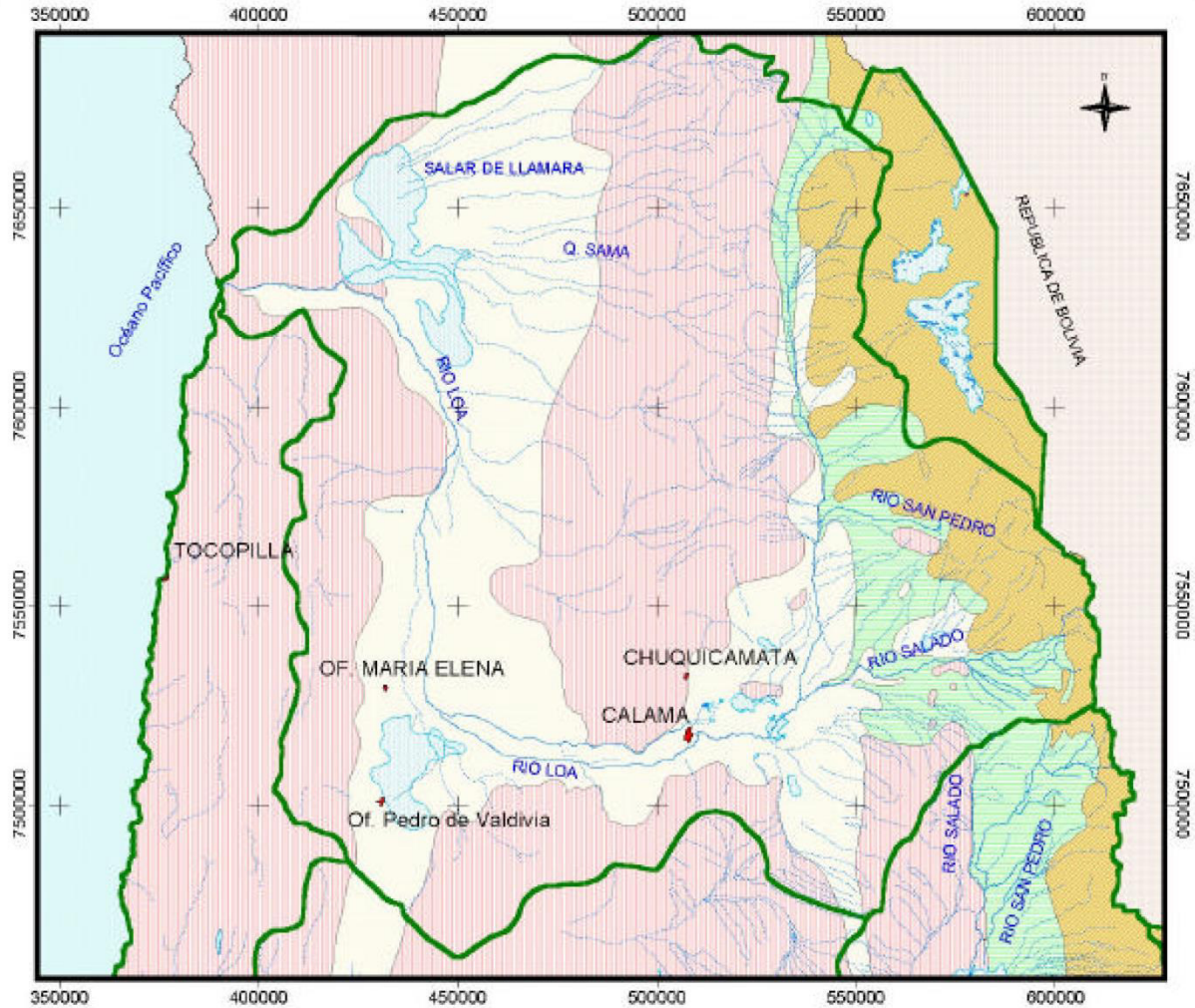
En la Figura 4.1-2, se presenta el mapa geológico general de la cuenca del río Loa elaborado para el estudio "Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa (DGA, 2003)".

Según los estudios "Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea Factibles de Constituir en los Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región (DGA, 2003)" y "Estudio Acuífero de Calama Sector Medio del Río Loa, Región de Antofagasta (DGA-MATRAZ, 2012)", los cuales se focalizaron en la zona media de la cuenca del río Loa se distinguen otras formaciones de interés geológico a parte de las ya mencionadas anteriormente y que se identifican también en el sector medio de esta cuenca.

La Formación Chiu Chiu la cual se emplaza de manera disconformemente sobre la Formación El Loa y corresponden a depósitos de conglomerados de areniscas, evaporitas, diatomitas, travertinos y cenizas volcánicas retrabajadas. Hacia al Noreste de Calama, esta formación posee estratos horizontales de limos y arcillas.

La Formación Toconce corresponde a una secuencia conformada por ignimbritas y sedimentos clásticos, tales como: tobas, areniscas y limolitas. Se dispone de manera concordantemente o discordantemente sobre la ignimbritas Sifón.

**FIGURA 4.1-2
MAPA GEOLÓGICO DGA**



MAPA GEOLÓGICO



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

4.2. Marco Hidrogeológico de la Cuenca del Río Loa

El marco hidrogeológico desarrollado para la cuenca del río Loa, contempla un análisis de las distintas unidades hidrogeológicas identificadas en los distintos sectores acuíferos de esta cuenca.

Luego, se realizará una caracterización de los niveles subterráneos a partir de la información histórica registrada en pozos ubicados en los distintos sectores acuíferos.

Por último, se presentarán los parámetros hidráulicos representativos de cada uno de los sectores acuíferos tomando en cuenta la información entregada en cada uno de los estudios donde se determinaron conjuntamente permeabilidades y coeficientes de almacenamiento.

4.2.1. Unidades Hidrogeológicas

A continuación se presenta una descripción de las distintas unidades hidrogeológicas tanto desde la perspectiva geológica como en la relevancia de las aguas subterráneas en términos de su conducción y existencia. El análisis se efectuó para los tres sectores acuíferos: Loa Alto, Loa Medio y Loa Bajo.

La definición de estas unidades se basó en la interpretación realizada por los estudios consultados a perfiles estratigráficos de sondajes, antecedentes geológicos e hidrogeológicos previos desarrollados por estudios anteriores y de perfiles geofísicos generados para ellos.

4.2.1.1. Sector Loa Alto

El sector Loa Alto agrupa la zona hidrogeológica comprendida entre las cuencas del río Loa hasta su confluencia con el río Salado, la del río San Pedro y la propia cuenca del río Salado. De acuerdo a la información existente, se analizarán los sectores de Ojos de San Pedro, Turi, Pampa Puno y Polapi, cuya información proviene de 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. El primero contempló una completa caracterización tanto de las zonas de Ojos de San Pedro como de Turi, la que para su realización tomó en consideración datos de estratigrafía de pozos construidos, ensayos geofísicos de refracción sísmica y el análisis químico de muestras de aguas superficiales y subterráneas. Por su parte el estudio de CODELCO-Agua Ingenieros Consultores, también generó una robusta caracterización de los recursos hídricos subterráneos enfocándose exclusivamente en la parte alta de la cuenca de San Pedro: Ojos de San Pedro y el área de Inacaliri. Al igual que en el Proyecto CHI-535, el estudio de la Hidrogeología del Alto Loa contó también con información de perfiles estratigráficos para un conjunto de sondajes que fueron habilitados en el lugar, se trazaron e interpretaron perfiles geofísicos y geológicos, además de llevar un monitoreo de niveles subterráneos en algunos pozos junto con la implementación de pruebas de bombeo para la estimación de los parámetros hidrogeológicos relevantes. Finalmente, el estudio de Mayco Consultores proporciona una completa información de los sectores de Pampa Puno y Polapi, en cuanto a unidades hidrogeológicas, niveles, parámetros elásticos y otros valores asociados al acuífero.

En base a los citados documentos anteriores, se han definido para el presente estudio 3 unidades hidrogeológicas para el sector de Ojos de San Pedro:

- Unidad 1: Sedimentos no consolidados.
- Unidad 2: Rocas volcánicas.
- Unidad 3: Basamento de Rocas Intrusivas.

A continuación se describen las unidades anteriores en función de los materiales geológicos identificados y de la geometría de éstas.

i. Unidad 1: Sedimentos No Consolidados

Esta unidad hidrogeológica está compuesta por sedimentos fluviales, aluviales, lacustres y depósitos de evaporitas y se encuentra por sobre el resto de las demás unidades. En el caso de los sedimentos fluviales éstos se encuentran intercalados con lavas e ignimbritas y cuya data se estima que es del Cenozoico Superior.

Su composición granulométrica corresponde principalmente a gravas, arenas y en menor proporción materiales finos como arcillas y limos, los cuales se intercalan con el material más grueso.

En cuanto a los depósitos de evaporitas, éstos son menos frecuentes y se detectan en los alrededores de Ojos de San Pedro.

Esta unidad se distribuye esencialmente a través del cauce del río San Pedro y de sus afluentes, los ríos Inacaliri y Siloli y según lo expresado tanto en los estudios CHI-535 e Hidrogeología del Alto Loa, esta unidad se encontraba casi completamente saturada en la parte baja del área analizada, específicamente en los entornos de Ojos de San Pedro.

De acuerdo a la estratigrafía de los sondajes ubicados en esta cuenca, la potencia de esta unidad es muy variable. De hecho la profundidad máxima que alcanzan los sedimentos no consolidados es del orden de los 300 m, aguas arriba de las Vegas de San Pedro, mientras que en la parte occidental de estas vegas se detecta material no consolidado a profundidades de hasta 135 m. Por otro lado en la parte alta de la quebrada El Aguilucho (ubicado al extremo norte de Ojos de San Pedro), sondajes perforados muestran un espesor superior a 180 m.

Más hacia la parte oriental de la cuenca, específicamente en el sector de Inacaliri, los pozos del área muestran que las mayores potencias de esta unidad hidrogeológica estarían en torno de los 140 m.

ii. Unidad 2: Rocas Volcánicas

Esta unidad hidrogeológica subyace a la unidad anterior y a veces intercalándose. Está formada por lavas andesíticas, andesitas, brechas, dacitas, ignimbritas, piroclastos y capas pumíticas.

Las andesitas forman coladas de gran espesor, y se extienden lateralmente hasta un ancho de unos 10 km aproximadamente.

Los depósitos de ignimbritas se intercalan entre los sedimentos aluviales y los flujos de lavas, aflorando en las riberas del río San Pedro con contenidos de lapilli de pómez e intercalaciones de tobas finas y también en la falda Sur del volcán San Pedro. En

otros sectores, los depósitos aluviales o flujos de lava, se superponen a las ignimbritas, en tanto que las capas pumíticas se intercalan entre las rocas volcánicas y el material sedimentario.

En términos generales esta unidad se distribuye en gran parte de la cuenca de San Pedro y su potencia es variable presentando valores que van desde las pocas decenas de metros hasta aproximadamente 360 m, los que se detectaron en un sondeo construido para el Estudio Hidrogeológico del Alto Loa, ubicada en la parte media de la quebrada Aguilucho.

En base a las estratigrafías de los pozos del sector que se construyeron para el estudio CHI-535, se detecta esta unidad hidrogeológica a partir de los 60 a 135 m de profundidad aproximadamente.

iii. Unidad 3: Basamento de Rocas Intrusivas

Unidad hidrogeológica asociada al basamento la cual subyace al resto de las unidades. Está constituida por ignimbritas, rocas graníticas y granodioríticas de aspecto porfírico. Además se les advierte en general, con un bajo grado de alteración y con un escaso fracturamiento.

Estas rocas se identifican principalmente en la parte Oeste de la cuenca de San Pedro y también en dirección Norte y Este, de esta cuenca.

Según la estratigrafía de los sondeos construidos para el Proyecto CHI-535, se detecta esta unidad a partir de los 220 m a 360 m aproximadamente, en el sector de Ojos de San Pedro.

Por su parte el Estudio Hidrogeológico del Alto Loa estimó, en base a estratigrafías y a prospecciones geofísicas, una potencia para esta unidad del orden de los 300 y 800 m.

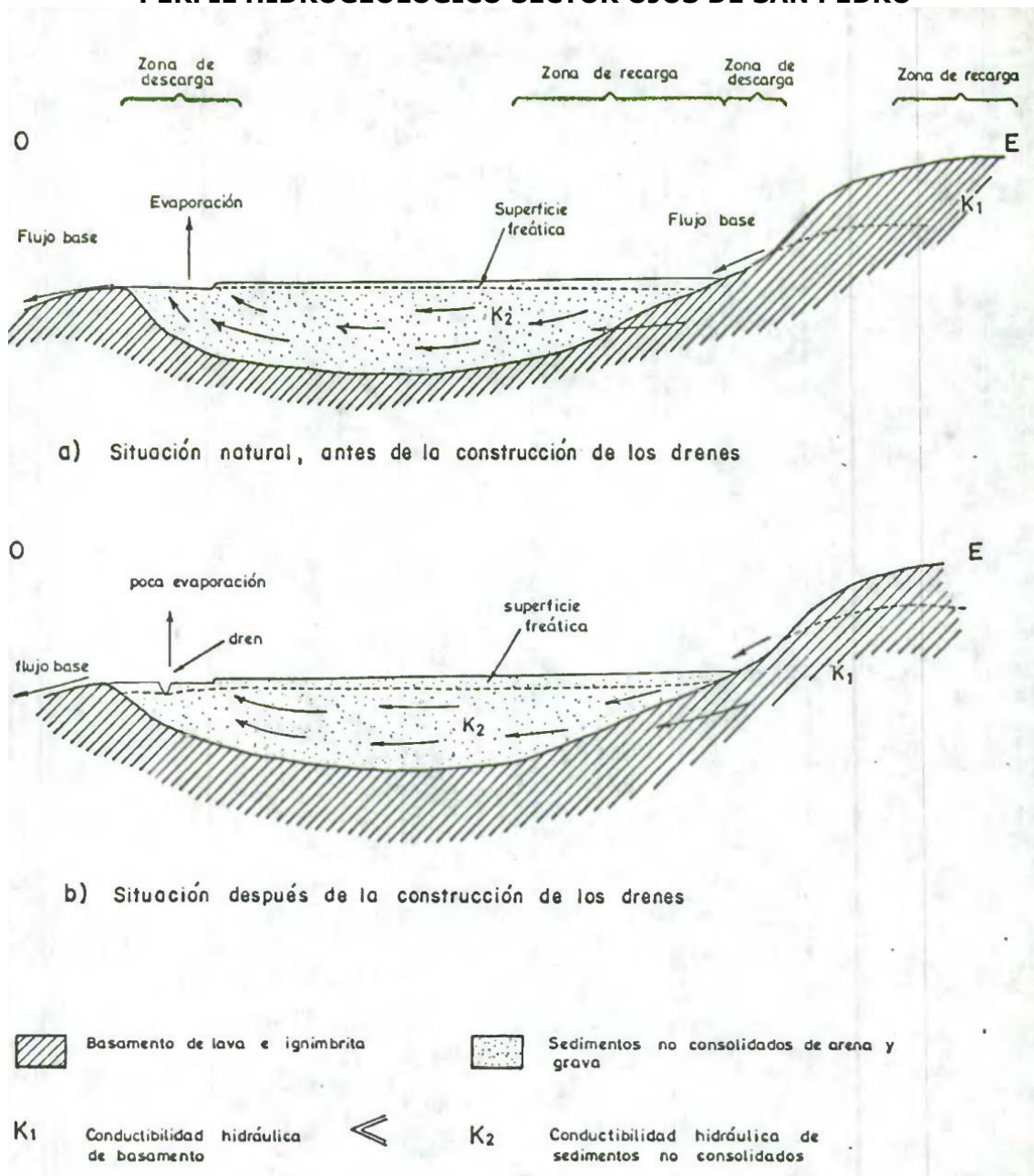
En la Figura 4.2-1, se presenta un perfil hidrogeológico del sector de Ojos de San Pedro en la situación antes y después de la construcción de un dren en ese sector. Cabe señalar que a partir del año 1990 la explotación del acuífero se realiza sólo por medio de pozos de bombeo ya que los drenes quedaron colgados, por lo que el perfil hidrogeológico de la Figura 4.2-1 no representa la situación actual.

Análogamente, para el sector de Turi que forma parte de la subcuenca del río Salado, se definieron para el presente estudio 3 unidades hidrogeológicas, utilizando la información obtenida del Proyecto CHI-535:

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

La descripción de cada una de estas unidades hidrogeológicas, se presenta a continuación.

FIGURA 4.2-1
PERFIL HIDROGEOLÓGICO SECTOR OJOS DE SAN PEDRO



Fuente: Hidrogeología de la Región de Ojos de San Pedro. Proyecto CHI-535. CORFO. (1977)
 Nota: La operación de los drenes en el sector de Ojos de San Pedro dejó de funcionar en 1990.

i. Unidad 1: Rocas Volcánicas

Esta unidad la constituyen ignimbritas, tobas, cenizas, rocas piroclásticas y volcánicas de tipo riolíticas, dacitas y andesitas.

En el caso de las ignimbritas su composición granulométrica es en su mayoría más gruesa donde se destaca la presencia de lapilli de varios tamaños y niveles, aunque también los hay de apariencia más fina junto con fenocristales.

El espesor de las capas de material ignimbrítico es del orden de los 2 a 40 m y su extensión y continuidad es grande.

El espesor de las tobas es limitado y no se han detectados espesores mayores a 1 m. En lo referente a su extensión y continuidad, no es muy importante.

Por otro lado, el espesor de las rocas piroclásticas con intercalaciones sedimentarias en las quebradas situadas al este de Ayquina, es de 50 m, con un máximo que podría alcanzar los 150 m en las cercanías de Ayquina y Turi.

Tal como se señaló anteriormente, esta unidad se prolonga casi por todo el sector, identificándose también rocas volcánicas riolíticas en los cerros de Ayquina, coladas de lava dacítica hacia el Noreste y flujos de lava andesítica escoriácea por sobre las rocas ignimbríticas en la misma dirección.

De acuerdo a la revisión de la estratigrafía de los sondajes construidos en la zona de estudio, el estrato de ignimbritas comenzaría a partir de los 165 m en la parte Este de la localidad de Turi, y a unos 13 m hacia el Suroeste de Ayquina y en las cercanías del río Salado.

ii. Unidad 2: Sedimentos No Consolidados

Esta unidad hidrogeológica está compuesta principalmente por sedimentos de origen fluvial, lacustre y también de material aluvial. Estos sedimentos se encuentran intercalados entre las ignimbritas y tobas las que conforman la unidad de rocas volcánicas.

Su composición granulométrica es variable y va desde arcillas hasta gravas y guijarros. Además existen conglomerados de material grueso dentro de una matriz arenosa.

El espesor de los estratos de material no consolidado no es muy importante, pero si lo es si se considera la continuidad del conjunto. Se cree que el espesor máximo de estos sedimentos tomando en cuenta también las intercalaciones con los materiales volcánicos (tobas, cenizas e ignimbritas) alcance los 280 m.

Esta unidad se extiende en gran parte del sector de Turi. En dirección Oeste existen afloramientos rocosos no consolidados o semi-consolidados, mientras que desde el Noroeste y hacia el Sur se observa un gran cono aluvial. Finalmente en la parte meridional de este sector, es posible encontrar áreas con cubierta aluvial y conglomerados.

iii. Unidad 3: Basamento de Rocas Intrusivas

Esta unidad sobreyace a las demás unidades hidrogeológicas y se compone principalmente de rocas graníticas que conforman el basamento impermeable.

Se detectan afloramientos de esta unidad en el cerro Cerroqui y en el extremo Noroeste del área estudiada.

Según la estratigrafía que muestran los pozos construidos en este sector, se aprecia que hacia el Norte de la localidad de Turi el basamento se detecta a partir de los 150 m aproximadamente. Hacia el Suroeste (cerca de Ayquina) y a medida que las secuencias estratigráficas se aproximan al cauce del río Salado, el basamento se encontraría a los 80 m aproximadamente.

En la Figura 4.2-2, se presenta un perfil hidrogeológico del sector de Turi, elaborado para el Proyecto CHI-535.

El sistema acuífero del sector de Turi, lo conforman dos acuíferos intercalados por dos estratos, uno más somero de arcillas y cenizas y otro de mayor profundidad compuesto por ignimbritas. Ambos acuíferos están albergados por sedimentos aluviales de arenas y gravas (Ver Figura 4.2-2).

De las descripciones anteriores que se realizaron para cada una de las unidades hidrogeológicas se infiere que tanto para el sector de San Pedro Inacaliri como el de Turi, los estratos más condicionantes para los flujos subterráneos son aquellos constituidos por sedimentos no consolidados y en menor medida los estratos de rocas volcánicas los cuales son capaces de almacenar pero no transmitir con facilidad el agua subterránea.

En el sector de Pampa Puno se identificaron 3 unidades hidrogeológicas, las cuales son descritas a continuación.

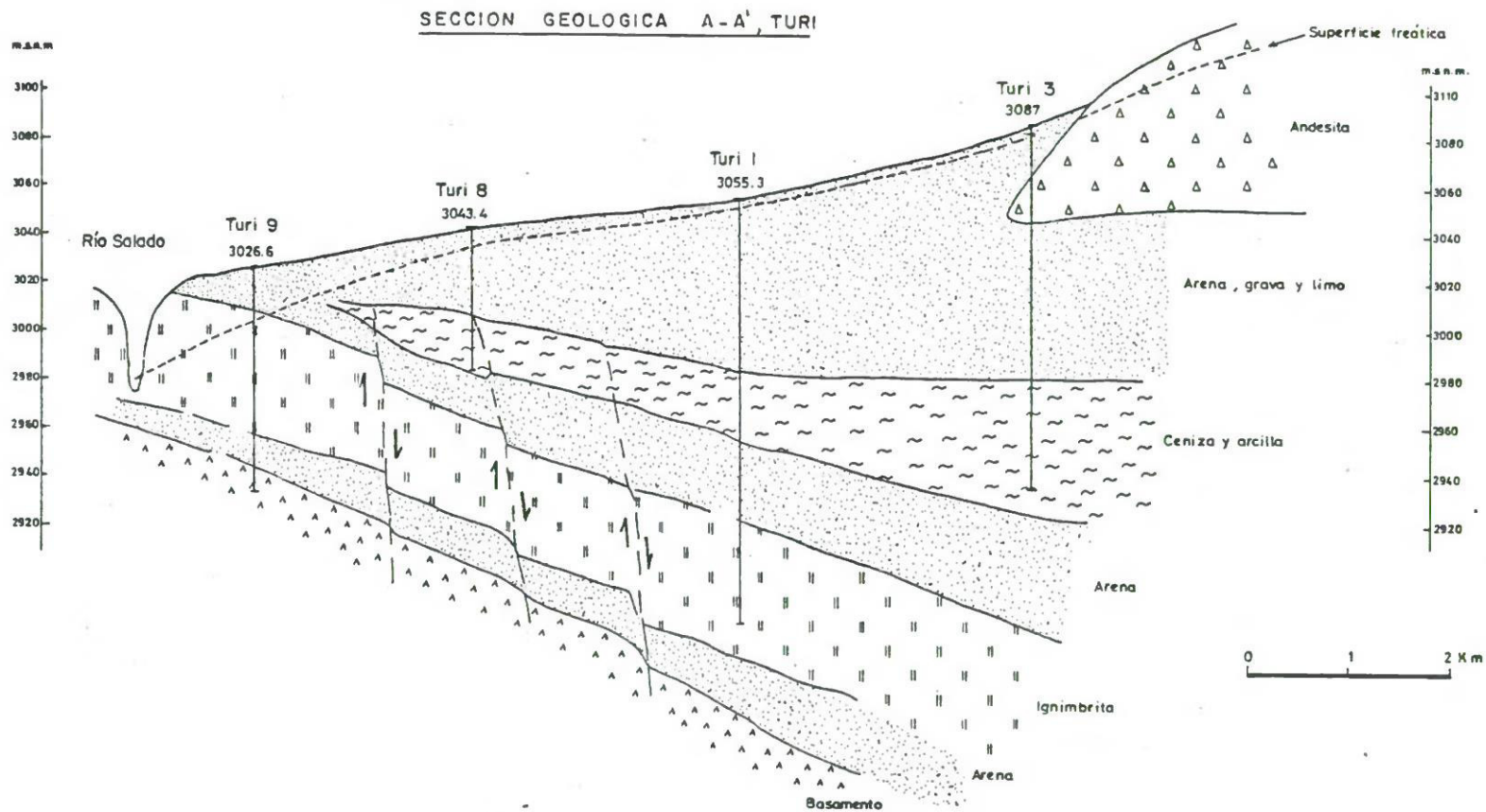
i. Unidad 1: Ignimbritas

Corresponde a depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos fracturados, compuesta principalmente por tobas de ceniza color blanco lechoso, en sectores rojizo. Se asocia a estratovolcanes del Mioceno Superior. Se extiende a lo largo y ancho de la cuenca, presentando espesores entre 6 y 44 metros. Al Norte de Pampa Yocas está cubierta por aluvio del Cuaternario con potencias que varían desde 6 a 9 metros. Hacia el Sur esta unidad se acuña.

ii. Unidad 2: Sedimentaria

Material detrítico sedimentario compuesto principalmente por gravas de tonalidades rojas y anaranjadas, poco compactadas y de estratificación gruesa, con frecuentes intercalaciones de niveles limo-arenosos. Se asocia a depósitos fluvioaluviales del Cuaternario y por gravas del Terciario correspondientes a la Formación Papajoy. Se extiende en forma significativa en casi en toda el área, acuñándose hacia la quebrada Sapunta, en la parte centro oriental de la cuenca de Pampa Puno, donde desaparece. El espesor de es variable, con un potencia promedio de 350 metros y un espesor máximo, en la parte central de la cuenca, cercano a los 700 metros. En función de su granulometría, esta unidad presenta cualidades favorables para el almacenamiento y flujo de las aguas, por lo que corresponde a un acuífero.

FIGURA 4.2-2
PERFIL HIDROGEOLÓGICO SECTOR DE TURI



Fuente: Hidrogeología de la Región de Turi. Proyecto CHI-535. CORFO. (1977).

iii. Unidad 3: Roca de Basamento

Está formada por lavas, tobas y brechas pertenecientes a las formaciones Cerro Empexa e Icanche (Cretácico Superior — Paleoceno y Eoceno Inferior a Medio respectivamente), areniscas grises con intercalaciones de conglomerados (occidente de la cuenca), lavas y tobas cristalinas dacíticas —riolíticas e intrusivos subvolcánicos de similar composición asociados a la Fm Collahuasi (Paleozoico) que conforman las laderas y la base de la cuenca. Corresponde al basamento impermeable de la cuenca.

Finalmente, en el sector de Polapi se identificaron, de acuerdo al estudio de Mayco Consultores, 5 unidades hidrogeológicas, las cuales se describen a continuación.

i. Unidad 1

Se emplaza en arenas y gravas en una matriz limo-arenosa, asociadas a depósitos aluviales, fluvioaluviales, glaciales y piroclásticos, los que se encuentran obreyaciendo a las unidades de rocas volcánicas y volcanoclásticas. Los sedimentos se presentan no consolidados, sin compactación ni cementación. Aparece rellenando las quebradas, llanuras y pampas. El espesor varía entre 20 y 50 y 100 m.

Debido a que su escaso desarrollo no permite almacenamientos de agua subterránea, debido a que el agua proveniente de aguas lluvias y escorrentía superficial infiltra hacia unidades inferiores, esta unidad no representa un acuífero de importancia. Es probable que parte del agua que se infiltra en esta unidad se acumule en la base de esta, formando lentes de agua en las zonas donde se encuentre sobre roca de baja a nula permeabilidad o donde la morfología de este contacto beneficia la disminución de la gradiente hidráulica.

ii. Unidad 2

Está conformada por coladas de lavas principalmente andesíticas, de tipo columnar, asociadas a estrato-volcanes. En superficie está afectada por un intenso fracturamiento, presentándose como bloques y fragmentos disgregados, sin matriz. En subsuperficie mantiene un fracturamiento importante. Los espesores pueden sobrepasar los 400 m en las partes altas.

iii. Unidad 3

Se emplaza en tobas riolíticas y dacíticas mediana a fuertemente consolidadas, con potencias reconocidas entre 150 y 200 m. Aflora en superficie en la parte baja, cubierta por depósitos no consolidados de la Unidad 1, mientras que en la parte alta subyace a coladas de lava de la Unidad 2, acuñaándose y desapareciendo al acercarse a los centros volcánicos. Esta unidad ha sido descrita como un estrato semiconfinante.

iv. Unidad 4

Se emplaza en arenas gruesas y gravas con matriz arenosa, mediana a pobremente consolidadas, asociadas a la unidad Depósitos Aluviales Antiguos. Se encuentra por lo general por debajo de los 150 metros de profundidad, y presenta un espesor promedio de 200 m, alcanzando hasta 300 m.

v. Unidad 5

Representa el basamento del acuífero, y está formado por depósitos asociados a los Estrato-volcanes del Mioceno Superior y a areniscas y conglomerados de edad cretácica.

4.2.1.2. Sector Loa Medio

Este sector, tal como se consignó anteriormente, comprende el área que va entre el río Loa aguas abajo de su junta con el río Salado y hasta su confluencia con el río San Salvador. De los tres sectores analizados, es el que cuenta con más datos e información, lo que lo avalan los numerosos estudios de índole hidrogeológicos que se han llevado a cabo durante el último tiempo.

Conforme a lo señalado en los estudios de MATRAZ (2012) y Knight Piésold (2010) para la DGA y CODELCO, respectivamente, se definieron 6 unidades hidrogeológicas para el acuífero de Calama, ubicado en la zona media de la cuenca del Loa. A continuación se describen de techo a base, dichas unidades.

i. Unidad 1: Depósitos Aluvio-Evaporíticos

La granulometría de esta unidad hidrogeológica se compone de gravas, arenas, depósitos detrítico-evaporíticos y depósitos limo-arenosos, los cuales se encuentran parcialmente saturados.

Esta unidad la constituyen dos subunidades, donde una de ellas está formada por depósitos aluviales de gravas y arenas con matriz arenosa y a veces limo-arenosa. La otra subunidad, está integrada por la secuencia de la formación Chiu-Chiu y rellenos clásticos-salinos de salares.

ii. Unidad 2: Acuífero Superior Cárstico-Detrítico El Loa

Esta unidad está conformada básicamente por rocas carbonatadas y detríticas correspondientes a las formaciones de Opache y Jalquinche.

Esta unidad hidrogeológica la componen 3 subunidades, en el que la primera viene dada por sedimentos del tipo cárstico-arenosos de permeabilidad media a alta y es el medio predominante de esta unidad.

La segunda subunidad, de presencia muy inferior en este estrato, está compuesta principalmente por depósitos de material fino limo-arcilloso, los que probablemente se asociarían con la formación Opache. Esta subunidad se identifica tanto al Noreste como al Sureste del Tranque Talabre.

La tercera subunidad está constituida por depósitos detríticos con una presencia significativa en la fracción arenosa y con permeabilidades importantes.

iii. Unidad 3: Acuitardo Ignimbrítico

Esta unidad lo constituyen tobas consolidadas de baja permeabilidad y que se superponen a los depósitos de material fino del acuitardo detrítico del Loa.

Dependiendo de su disposición estratigráfica, esta secuencia puede desarrollar un confinamiento sobre el medio saturado inferior (Unidad 5).

iv. Unidad 4: Acuitardo Detrítico El Loa

Unidad hidrogeológica compuesta fundamentalmente por materiales finos, tales como: arcillas y limos, relacionados probablemente a las formaciones Lasana, Chiquinaputo y a las secciones inferiores de las formaciones Jalquinche y Opache.

Hidrogeológicamente hablando, se trata de una unidad de muy baja permeabilidad y con un alto grado de homogeneidad, la que aportaría con una condición confinante en el acuífero inferior.

v. Unidad 5: Acuífero Inferior Gravas de Calama

Unidad hidrogeológica que se encuentra en su mayor parte saturada y está formada esencialmente por gravas, conglomerados y arenas gravosas, con matriz arenosa y limo-arcillosa, las que guardan relación con la formación Calama.

Esta unidad la componen dos subunidades, siendo la primera la más representativa del comportamiento hidrogeológico del acuífero inferior con permeabilidades relativamente altas. La conforman depósitos no consolidados aluviales antiguos y depósitos de piedemonte.

La segunda subunidad, de menor presencia en este estrato, está formada por depósito limo-arcillosos.

Por otra parte, esta unidad se dispone bajo las unidades 3 y 4 correspondientes a los acuitardos ignimbríticos y detríticos de El Loa, respectivamente, adoptando un comportamiento hidráulico de confinamiento. No obstante, en la parte alta del área del proyecto Quetena, esta unidad se encuentra libre de confinamiento.

vi. Unidad 6: Basamento

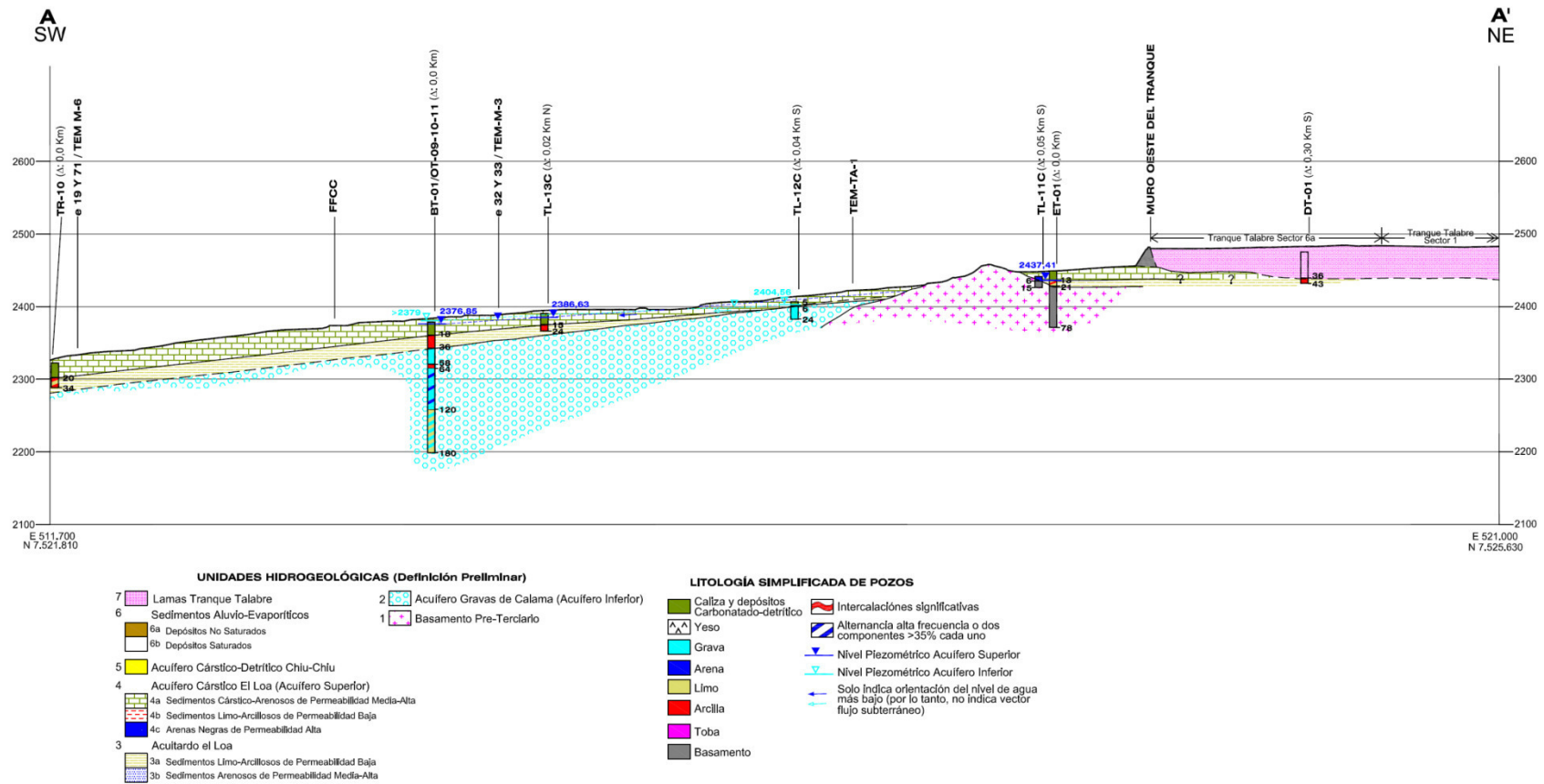
Esta unidad de muy bajas permeabilidades, que le confieren una condición impermeable, se encuentra conformada tanto por rocas intrusivas y metamórficas como también, en menor medida, por rocas volcánicas y sedimentarias. Sin embargo, la conductividad hidráulica podría ser importante en zonas donde existen rocas con un grado significativo de fracturamiento y en áreas de intenso fallamiento.

Acorde a la descripción anterior, las unidades hidrogeológicas que condicionan los flujos subterráneos en el sector Loa Medio, ordenados estratigráficamente de menor a mayor profundidad serían: el Acuífero Superior, el Acuitardo y el Acuífero Inferior. En términos generales, se puede decir que en la mayor parte de este sector, el Acuífero Superior sobreyace al Acuitardo y éste a su vez al Acuífero Inferior.

El Acuífero Superior presenta una potencia variable entre los 30 y 130 m, siendo el rango más habitual el de 30 a 70 m. El Acuitardo posee una extensa presencia en la cuenca de Calama, cuyo rango de espesores va entre los 80 y 100 m, pudiendo llegar a espesores mayores de hasta 200 m. En tanto, el Acuífero Inferior presenta una potencia variable promedio de entre 30 y 150 m, y en zonas puntuales pueden registrarse potencias que podrían superar los 400 m de profundidad.

En la Figura 4.2-3, se presenta un perfil hidrogeológico del acuífero de Calama (Sector Loa Medio).

**FIGURA 4.2-3
PERFIL HIDROGEOLÓGICO ACUÍFERO CALAMA. SECTOR LOA MEDIO**



Fuente: Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-KNIGHT PIÉSOLD. (2010)

4.2.1.3. Sector Loa Bajo

Tal como se mencionó anteriormente, este sector comprende el área de drenaje desde la confluencia del río San Salvador con el río Loa hasta la desembocadura de este último en el mar. Sin embargo, debido a la escasa información de índole hidrogeológica que se tiene de este sector y que únicamente se remite a la zona del Salar de Llamara, sólo será posible analizar el área comprendida por este salar para el presente estudio.

De acuerdo a la modelación hidrogeológica efectuada por DICTUC (2007) para el sector de Salar de Llamara, se identificaron cinco unidades hidrogeológicas:

- Unidad 1: Basamento.
- Unidad 2: Sedimentos Terciarios Semi-Permeables.
- Unidad 3: Depósitos Aluviales y Fluvio-Lacustres.
- Unidad 4: Evaporitas.
- Unidad 5: Depósitos Aluviales Recientes.

La descripción de cada una de estas unidades se presenta a continuación:

i. Unidad 1: Basamento

Esta unidad subyace al resto de otras unidades y lo constituyen principalmente las metasedimentitas de la Formación El Toco, rocas sedimentarias de la Formación Cholita, secuencias impermeables de la Formación El Loa y Quillagua e intrusivos graníticos de la Cordillera de la Costa y del Complejo Granítico de Quillagua.

ii. Unidad 2: Sedimentos Terciarios Semi-Permeables

Esta unidad hidrogeológica se caracteriza por poseer una permeabilidad relativamente más alta que la unidad basamento y está conformada por sedimentos clásticos medianamente compactados asociados probablemente a la Formación El Loa y/o Quillagua.

Esta unidad sobreyace a la unidad 1 anterior denominada basamento.

iii. Unidad 3: Depósitos Aluviales y Fluvio-Lacustres

Esta unidad que sobreyace a la unidad 2, y lo conforman las secuencias sedimentarias clásticas, aluviales y coluviales (conglomerados, areniscas y limonitas); las fluvio-lacustres y evaporíticas con un mayor grado en su composición de material fino.

La principal característica de esta unidad corresponde a su alta permeabilidad en comparación al resto de las registradas en las demás unidades hidrogeológicas definidas y en ningún momento aflora en la zona del salar. Además, es posible correlacionarla con las unidades representadas por las Formaciones Huaylas y Altos de Pica en la parte norte del Salar de Llamara y a las unidades de mayor permeabilidad asociadas a la Formación El Loa.

iv. Unidad 4: Evaporitas

Esta unidad hidrogeológica se encuentra por sobre la unidad anterior y se le asocia fundamentalmente a los miembros yesíferos y salinos de la Formación Soledad, así como también, a los depósitos aluviales salinos de menor espesor.

El espesor de esta unidad va desde un nivel superficial hasta los 100 m bajo el nivel freático, aproximadamente.

En lo referente a su permeabilidad, se puede decir que es comparativamente más baja que la unidad 3 conformada por los depósitos aluviales.

v. Unidad 5: Depósitos Aluviales Recientes

Esta unidad que sobreyace a las demás unidades hidrogeológicas definidas, está constituida principalmente por depósitos de pie de monte, de abanicos, arenas eólicas, corrientes de barro y coluvios.

Esta unidad tiende a intercalarse y a interdigitarse con la unidad 4, por lo que los límites estratigráficos de ambas unidades, no son del todo claros.

De la descripción de las unidades anteriores se desprende que los estratos de interés, en cuanto a la presencia y conducción de aguas subterráneas, lo conforman los depósitos terciarios y cuaternarios.

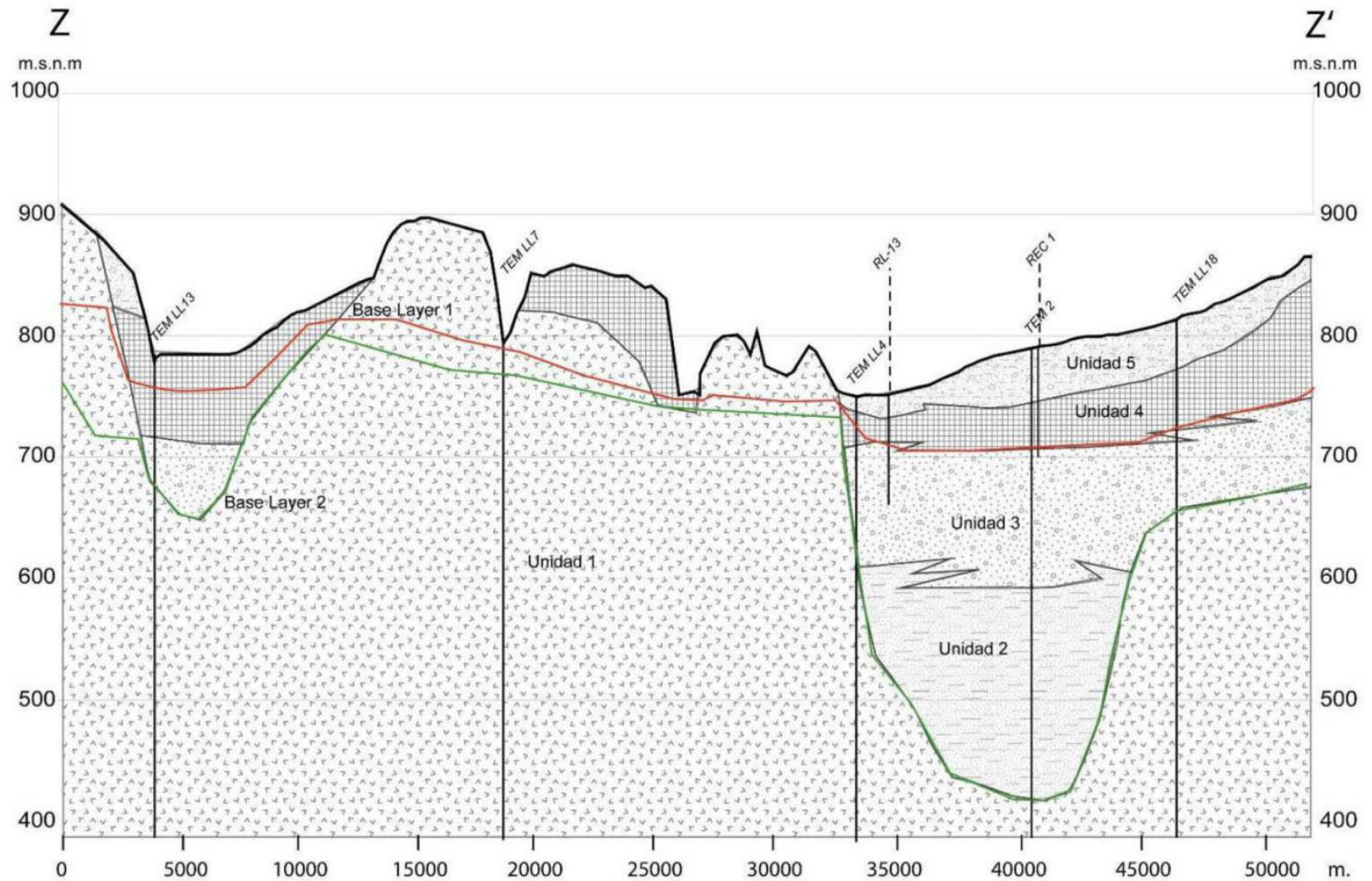
Este acuífero se extiende dentro de lo que se conoce como el sector de Pampa del Tamarugal, y se encuentra delimitado hacia el Este por la Cordillera de Domeyko y al Oeste por los afloramientos de rocas impermeables asociados a la Cordillera de la Costa. En dirección Norte este acuífero se encuentra limitado por los acuíferos de Pampa El Tamarugal y Salar Sur Viejo, mientras que hacia el Sur lo hace con el cauce del río Loa.

Cabe mencionar además, según DICTUC (2007), que el acuífero de Salar de Llamara se subdivide en dos sectores debido a afloramientos rocosos de basamento impermeable que generan dos ambientes de depositación tanto al Norte como al Sur. Estos afloramientos, se localizan en el área de los cerros de Soledad, lo que permite una recarga subterránea hacia el salar sólo desde las quebradas de Guatacondo por el Norte y desde la quebrada Mal Paso por el lado Sur.

En particular para el modelo hidrogeológico elaborado por DICTUC (2007), se adoptó un acuífero compuesto por dos estratos donde el superior representa a las unidades hidrogeológicas superficiales, mientras que el inferior se asocia a las unidades de mayor permeabilidad. Este estrato superior, tienen potencias que van entre los 20 a 70 m de profundidad, en tanto que el inferior posee un espesor promedio de 200 m.

La Figura 4.2-4 muestra un perfil hidrogeológico, el cual da cuenta de la distribución vertical de las 5 unidades hidrogeológicas definidas anteriormente.

FIGURA 4.2-4
PERFIL HIDROGEOLÓGICO ACUÍFERO SALAR DE LLAMARA



Fuente: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. DICTUC. (2007).

4.2.2. Caracterización de los Niveles Subterráneos en la Cuenca

En los siguientes subpuntos, se presentan los niveles subterráneos registrados en diversos pozos emplazados en los sectores: Loa Alto, Loa Medio y Loa Bajo.

Para lo anterior, se recurrió a la información histórica de niveles estáticos proporcionada por la DGA en 8 pozos de su propiedad. Estos pozos de la DGA, se encuentran distribuidos principalmente en los sectores de Calama y Turi (sectores Medio y Alto).

En el Anexo 4-1, se presenta el registro histórico de niveles estáticos en cada uno de los 8 pozos monitoreados por la DGA.

Para caracterizar los otros sectores de la cuenca fue necesario recurrir a estudios donde se presentaron datos de niveles subterráneos. Dentro de las fuentes consultadas, con información de niveles en el resto de los sectores, se encuentran el Proyecto CHI-535, Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa y el Anexo VIII del EIA de Pampa Hermosa, donde las dos primeras abarcan el área correspondiente al sector Alto de la cuenca del Loa, mientras que la última aporta una completa caracterización hidrogeológica en torno al Salar de Llamara.

4.2.2.1. Sector Loa Alto

De acuerdo al registro de pozos construidos para el Proyecto CHI-535 tanto para los acuíferos de San Pedro como Turi, se tiene información de los niveles subterráneos que fueron medidos para dicho estudio. De la misma forma, se dispone de datos de niveles en numerosos sondajes que fueron habilitados para el desarrollo del Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa (CODELCO-Agua Ingenieros Consultores, 1987) en la zona de San Pedro de Inacaliri.

Integrando las referencias anteriores, se seleccionaron aquellos pozos con suficiente información de niveles y que sean representativos de un área más amplia del acuífero de San Pedro. De esta forma se tiene estadísticas de niveles subterráneos que abarcan el período comprendido entre Octubre de 1985 hasta Enero de 1987. Los pozos en cuestión, se resumen en el Cuadro 4.2-1, en tanto que en las Figuras 4.2-5 y 4.2-6, se graficaron los niveles subterráneos para el período de registro 1985-1987.

De acuerdo a las Figuras anteriores (Figuras 4.2-5 y 4.2-6), se aprecia que para la zona de Ojos de San Pedro el pozo B-4(B) mostró niveles subterráneos del orden de los 4 m de profundidad. En cambio en los pozos situados inmediatamente al este de Ojos de San Pedro, presentaron niveles subterráneos para el período 1985-1987 valores entre los 10 y los 25 m aproximadamente (Pozos B-1(B), B-2(B)).

Siguiendo en el mismo sector de Ojos de San Pedro pero hacia el poniente, el pozo CHU-5(B) arrojó en promedio niveles subterráneos del orden de los 115 m.

En el sector de Inacaliri (extremo más oriental de la cuenca), los niveles registrados fueron en promedio cercanos a los 79 m (Pozo CHU-2(B)). Sin embargo, hacia aguas abajo de quebrada Colana, se advirtió una recuperación de los niveles subterráneos llegando a los 10 m aproximadamente en los últimos años que se tiene medición (Pozo CHU-1(O)).

Por su parte, los pozos CHU-6(B) y CHU-9(O) que representan los extremos meridional y septentrional, respectivamente de la cuenca de San Pedro, se observaron niveles subterráneos que en promedio se situaron entre los 81 y 143 m respectivamente.

**CUADRO 4.2-1
REGISTRO DE POZOS CON INFORMACIÓN DE NIVELES EN SECTOR DE SAN PEDRO – INACALIRI**

Sondaje	Ubicación	Coordenadas UTM: WGS-84		Cota Terreno (m s.n.m.)	Constructor
		Norte (m)	Este (m)		
CHU-1(O)	Colana-Inacaliri	7.568.598	579.945	3.842	CODELCO
CHU-2(B)	Inacaliri	7.563.703	589.206	3.890	CODELCO
CHU-5(B)	Río San Pedro	7.570.074	565.339	3.785	CODELCO
CHU-6(B)	Quebrada Cupo	7.562.783	572.583	3.876	CODELCO
CHU-9(O)	Quebrada Aguilucho	7.574.571	577.982	3.945	CODELCO
B-1(B)	Este Ojos San Pedro	7.568.283	574.147	3.812	CHI-535
B-2(B)	Pampa Lagunita	7.571.313	574.963	3.826	CODELCO
B-4(B)	Sureste Ojos San Pedro	7.568.265	571.365	3.804	CHI-535

Fuente: Elaboración propia a partir del Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa. CODELCO-Agua Ingenieros Consultores. 1987.

En la Figura 4.2-7 se muestra la ubicación espacial de estos pozos dentro de la hoya hidrográfica asociada al río San Pedro.

Del Proyecto CHI-535 (CORFO, 1977) se obtuvo un rango de gradientes hidráulicos entre 0,0004 y 0,0015 para la Vega de Ojos de San Pedro. La dirección del flujo subterráneo, según este mismo estudio, es de Este a Oeste a lo largo del valle y con aportes subterráneos provenientes desde sus paredes. Por otro lado, en la cuenca del río Salado, la DGA cuenta con 7 pozos de monitoreo de niveles subterráneos, de los cuales 2 se encuentran en el sector de Chiu-Chiu y los restantes se localizan en las inmediaciones de las localidades de Turi y Ayquina. Cada uno de estos pozos posee estadística histórica de niveles cuyo período de registro va desde los años 1987 a 2013 y gran parte de ellos fueron construidos para el Proyecto CHI-535. En el Cuadro 4.2-2, se muestra la información de todos los pozos ubicados en la hoya hidrográfica del Salado.

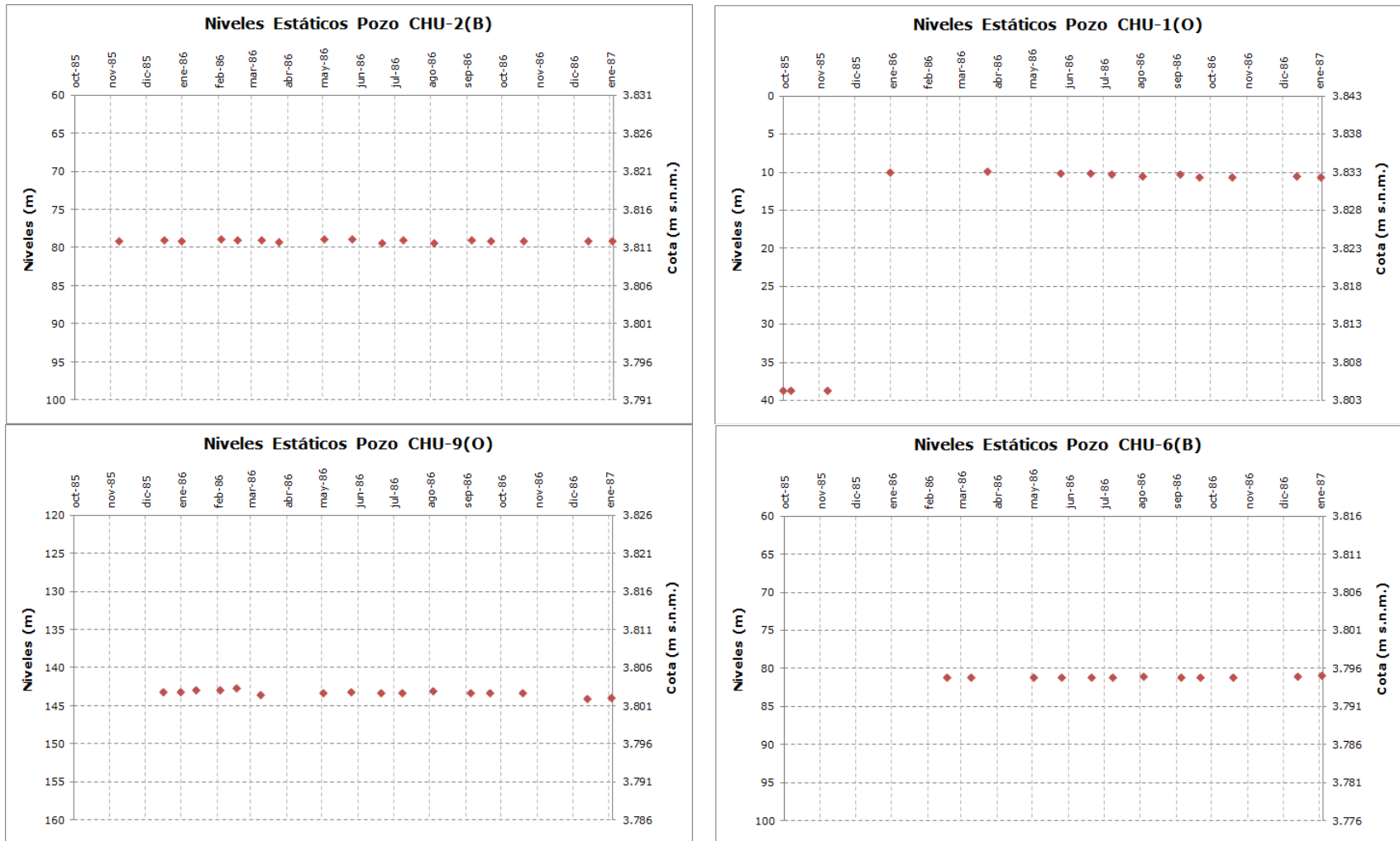
**CUADRO 4.2-2
POZOS DGA CON INFORMACIÓN HISTÓRICA DE NIVELES SUBTERRÁNEOS EN CUENCA DEL RÍO SALADO**

Pozo	Código BNA	Altitud (m s.n.m.)	Coordenadas UTM: WGS-84		Estado	Período Registro	
			Este (m)	Norte (m)		Inicio	Término
Turi 2	02105030-K	3.055	571.645	7.540.074	Vigente	14-05-1987	12-09-2013
Turi 7	02105028-8	3.091	574.796	7.540.459	Vigente	14-05-1987	12-09-2013
Chiu Chiu	02105023-7	2.568	541.477	7.529.945	Vigente	14-05-1987	12-09-2013
Turi 10	02105032-6	3.041	569.850	7.541.866	Vigente	14-05-1987	12-09-2013
Cupo 1	02105024-5	2.925	562.663	7.534.486	Vigente	14-05-1987	12-09-2013
Isla Grande 3	02110019-6	2.512	537.664	7.526.542	Vigente	14-05-1987	12-09-2013
Turi 1	02105025-3	3.007	568.263	7.538.983	Vigente	14-05-1987	12-09-2013

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

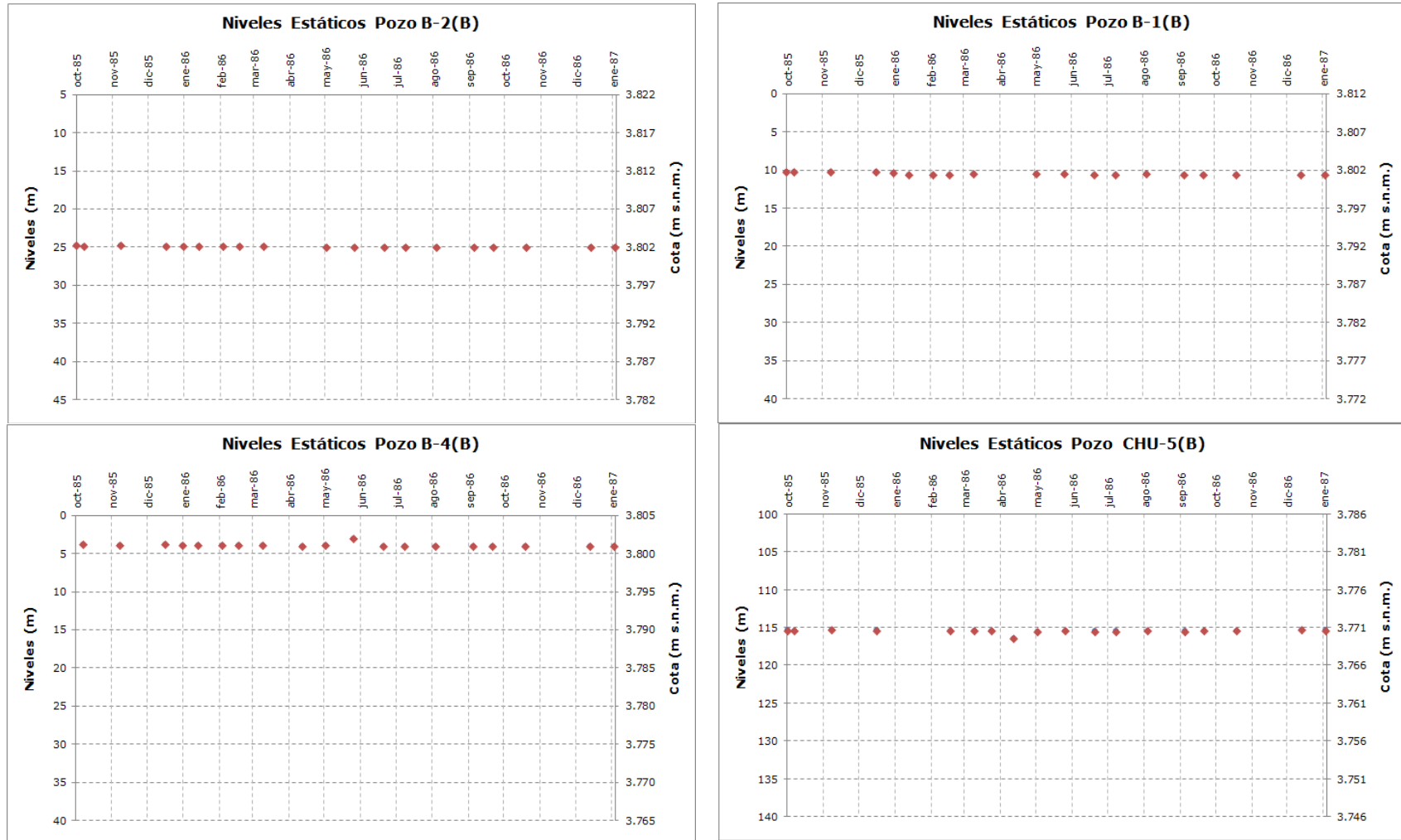
La Figura 4.2-8 muestra la disposición espacial de los 7 pozos con medición de niveles estáticos por parte de la DGA y considerados en el Cuadro anterior. En las Figuras 4.2-9 a 4.2-12 se grafican los niveles estáticos registrados en cada uno de los pozos de la DGA emplazados en el sector.

FIGURA 4.2-5
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN POZOS DE SAN PEDRO INACALIRI. CHU-2(B), CHU-1(O), CHU-9(O) Y CHU-6(B)



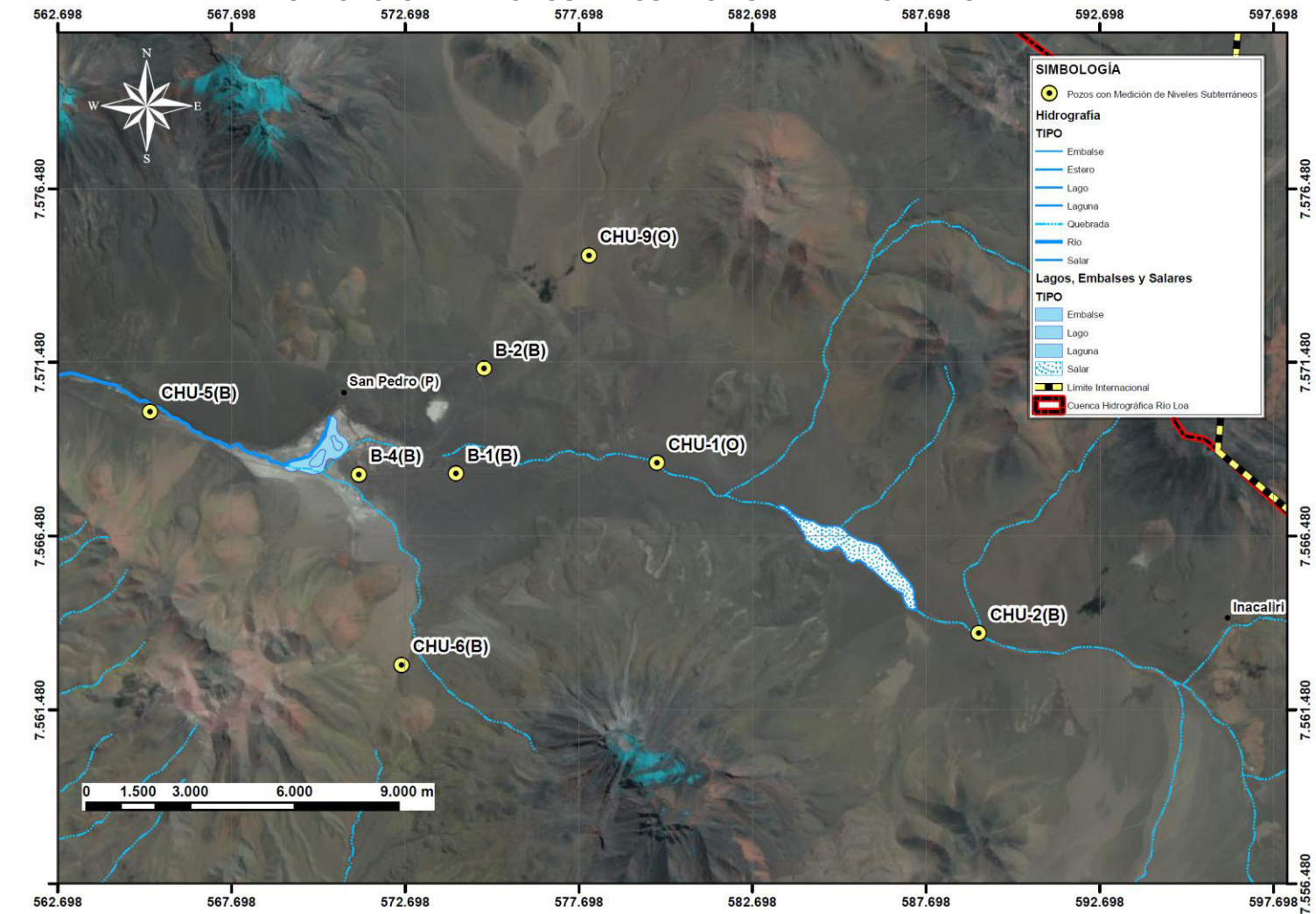
Fuente: Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa

FIGURA 4.2-6
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN POZOS DE SAN PEDRO INACALIRI. B-2(B), B-1(B), B-4(B) Y
CHU-5(B)



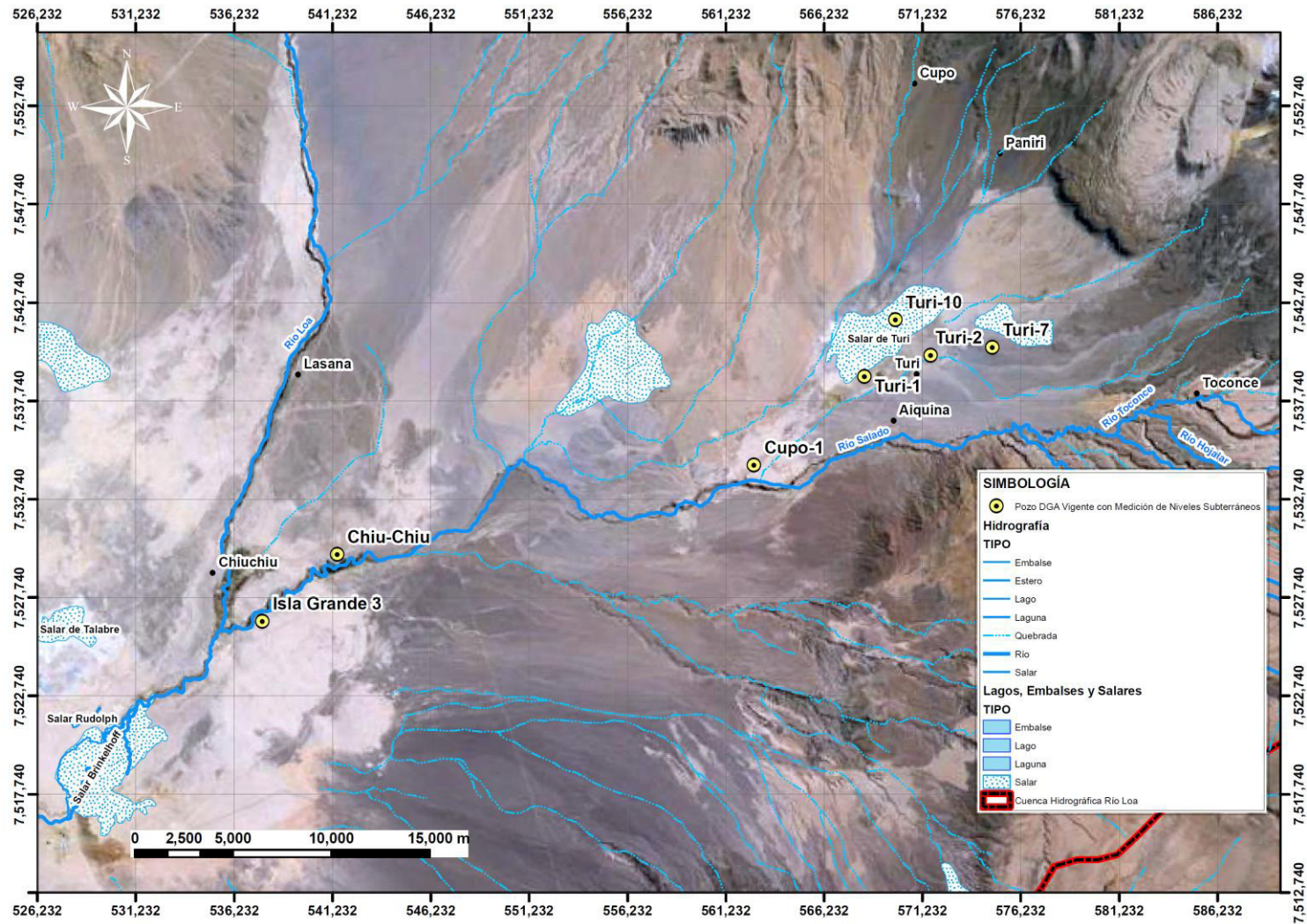
Fuente: Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa

FIGURA 4.2-7
UBICACIÓN DE POZOS EN CUENCA SAN PEDRO-INACALIRI



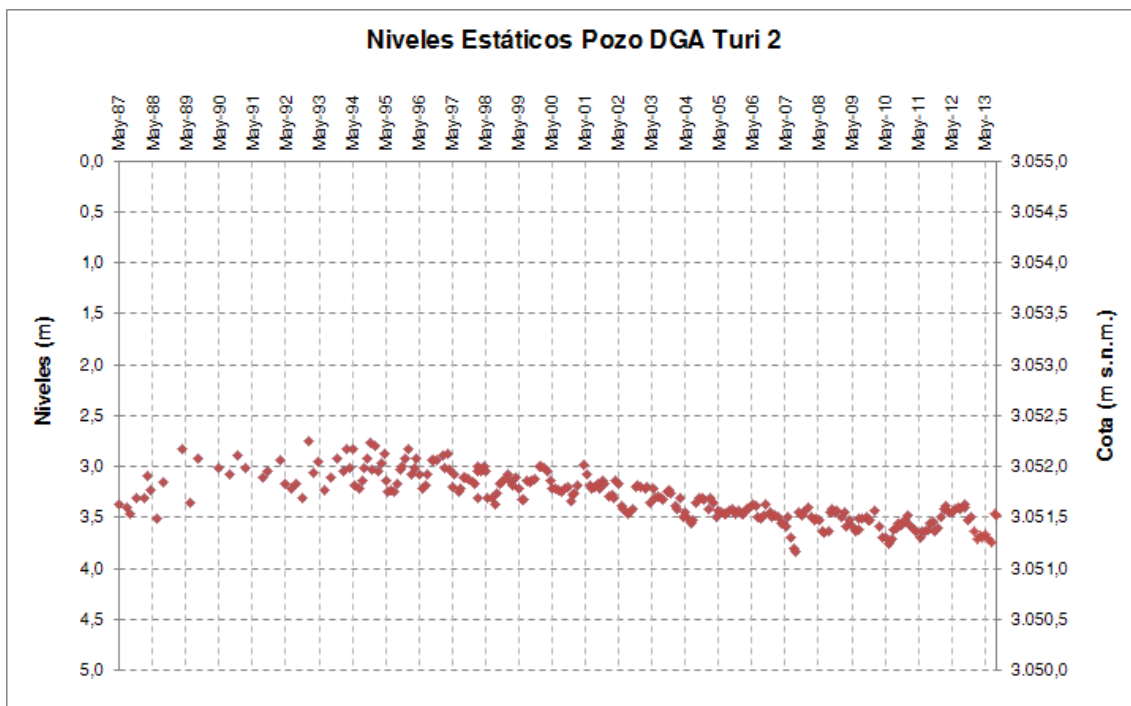
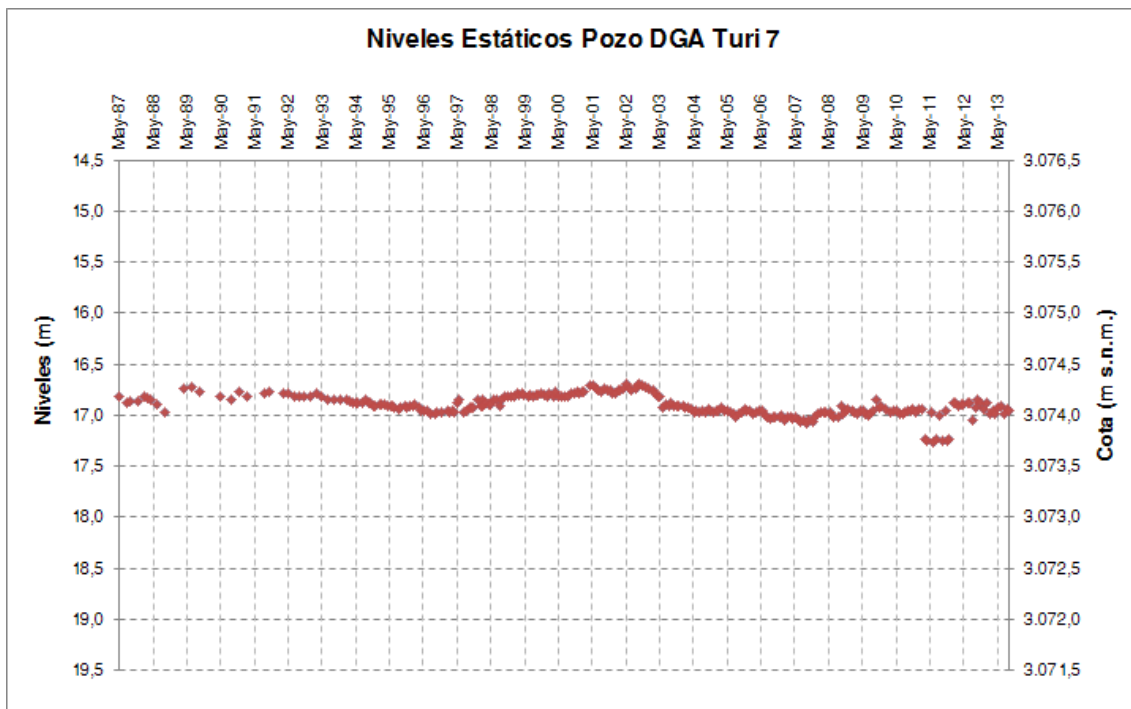
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4.2-8
POZOS DGA VIGENTES CON MEDICIÓN DE NIVELES SUBTERRÁNEOS EN CUENCA RÍO SALADO



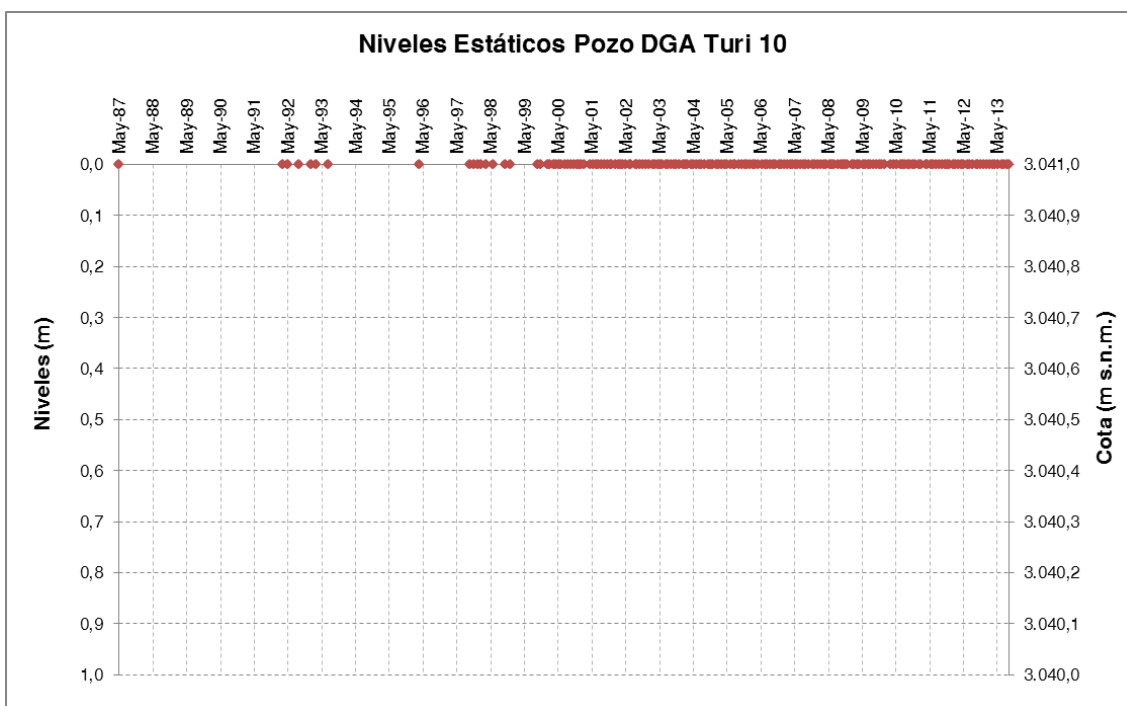
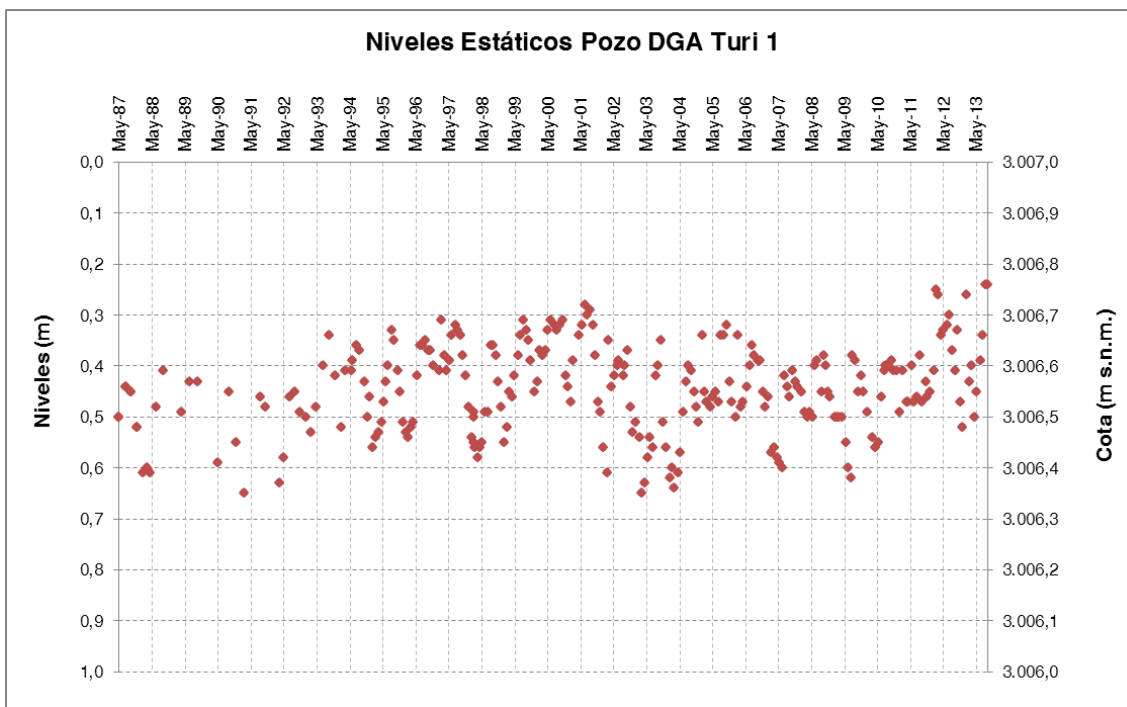
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4.2-9
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN POZOS DGA TURI 7 Y TURI 2



Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA

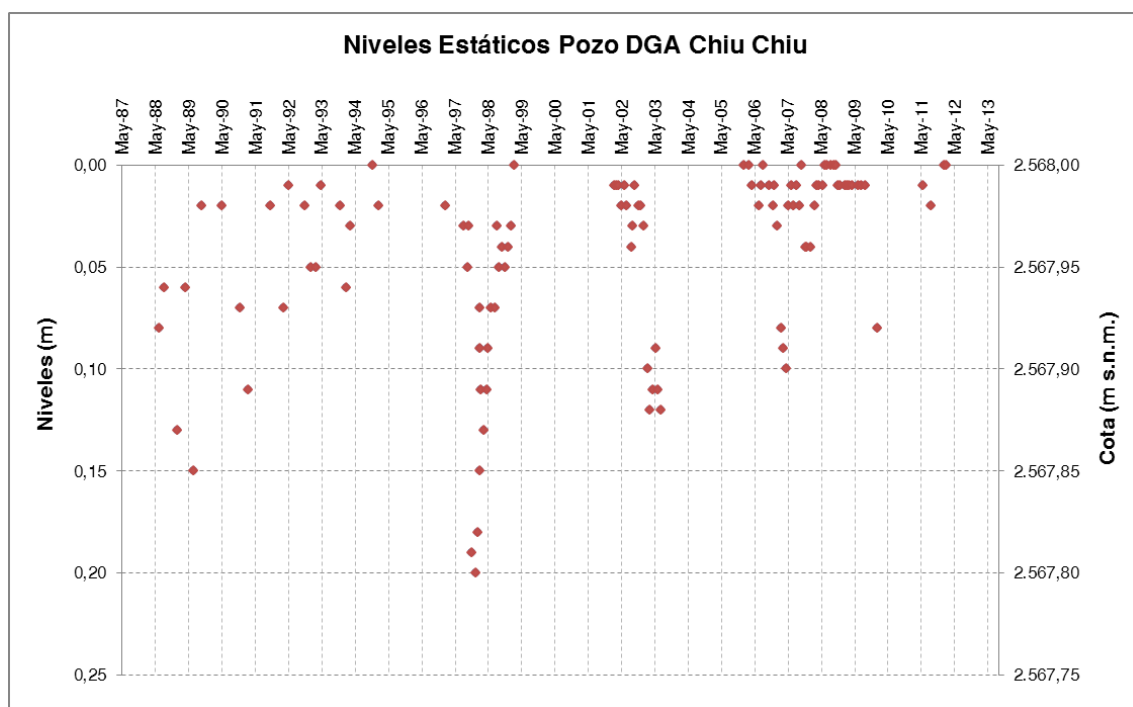
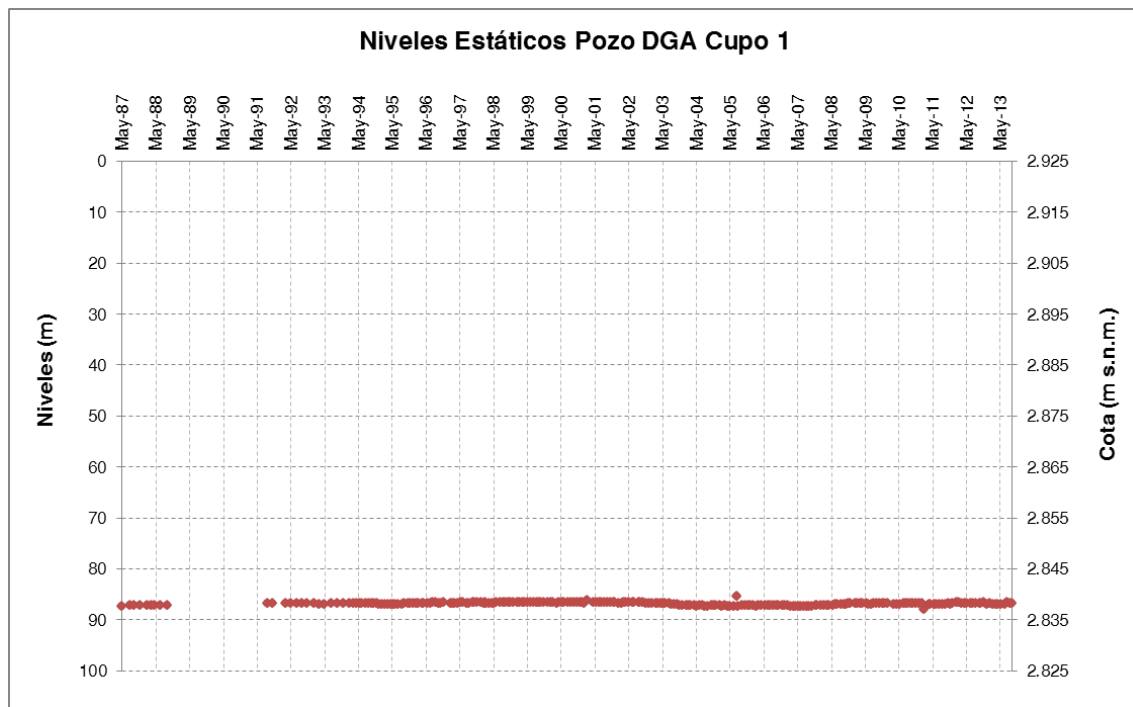
FIGURA 4.2-10
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN POZOS DGA TURI 1 Y TURI 10



Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA

Nota: La estadística histórica de niveles del pozo Turi 10, presenta en todo su registro valores iguales a cero, por lo que es posible identificar un fenómeno de surgencia.

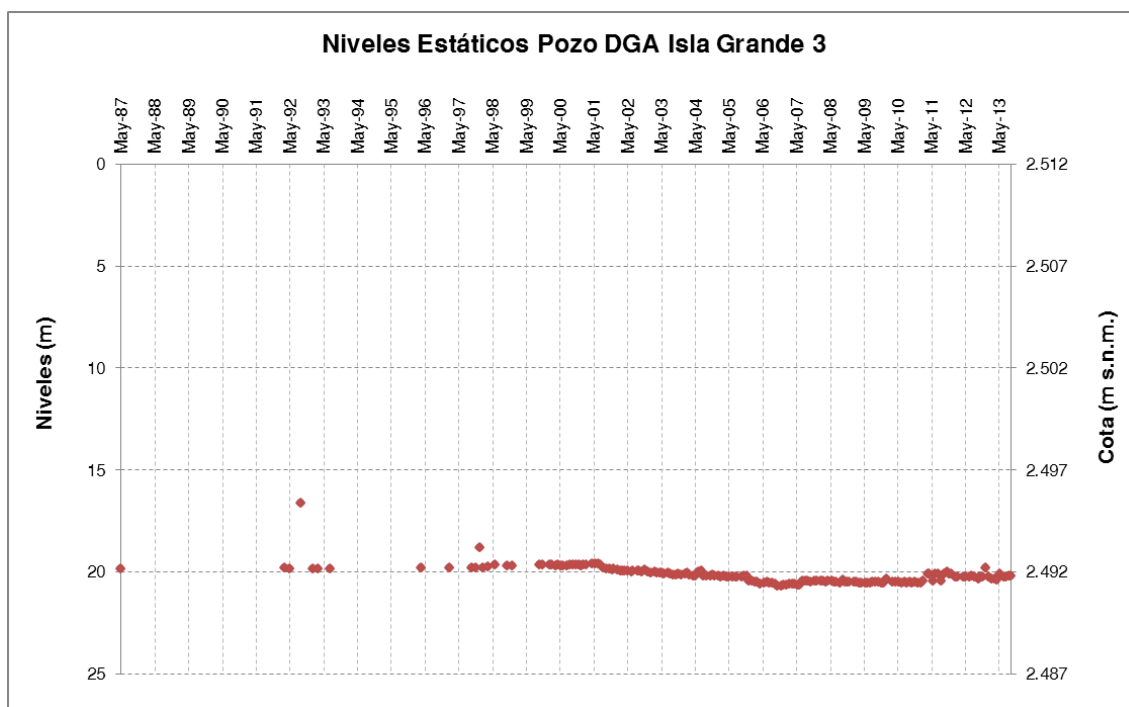
FIGURA 4.2-11
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN POZOS DGA CUPO 1 Y CHI CHIU



Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA

Nota: Se omitieron aquellos registros negativos de niveles estáticos en el pozo Chiu Chiu, ya que dichos valores dan cuenta del fenómeno de surgencia.

FIGURA 4.2-12
GRÁFICO TEMPORAL DE NIVELES ESTÁTICOS EN POZO ISLA GRANDE 3



Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA

De los gráficos temporales de niveles estáticos anteriores es posible advertir que para el pozo Turi 7 ubicado en la parte alta al Noreste de la localidad de Turi, sus niveles no muestran variaciones importantes a lo largo del tiempo, manteniéndose en promedio dentro de los 17 m de profundidad aproximadamente. Caso contrario ocurre con el pozo Turi 1, cuyos niveles se encuentran bastante someros presentando variaciones atribuibles probablemente a un fenómeno del tipo estacional y/o producto del efecto de la evapotranspiración de la zona. Los niveles subterráneos de este pozo, se mueven entre los 0,25 y 0,65 m, aproximadamente.

Hacia el Este de Turi, específicamente en el pozo Turi 2, los niveles se hallan en general a escasos metros de profundidad, sin embargo a partir del año 2003 se aprecia una disminución en los niveles subterráneos hasta mediados del año 2005. Posterior a eso, la tendencia de los niveles a sido en términos promedios relativamente constantes. No obstante, las variaciones en torno al nivel medio del último tiempo podrían obedecer a un efecto estacional. Al comparar la situación antes y después del año 2003, el descenso estimado sería de alrededor de 0,5 m. Distinto es el caso del pozo Turi 10, el cual presenta surgencia en toda la estadística.

En dirección al Suroeste de Ayquina, los niveles se registran a mayor profundidad a diferencia de los sondajes ubicados en el sector de Turi. En particular el pozo Cupo 1, muestra una escasa variación en sus niveles subterráneos, los que permanecen casi estables en torno a los 87 m en casi la totalidad del período de medición.

Por su parte, en el sector próximo a Chiu-Chiu, el pozo DGA de mismo nombre exhibe niveles subterráneos cercanos a la superficie y presenta además surgencia en gran parte

de la estadística (valores de niveles negativos), condición que no fue graficada en la Figura 4-X correspondiente ya que no tiene sentido incorporarla en el análisis. Por el contrario hacia el Sur de Chiu-Chiu (ribera Sur del río Salado), el pozo Isla Grande 3 presenta en términos globales niveles que experimentan muy escasas variaciones, salvo casos puntuales como el período entre los años 2005 - 2011, donde se registra una profundización de los niveles estáticos.

Según el estudio del Proyecto CHI-535, existirían tres vías de entrada del flujo subterráneo en el sector de Turi. La primera vía provendría desde la parte Norte-Noreste a través de los sedimentos aluviales. La segunda ruta sería desde el Noreste, por medio de un flujo de lava andesítica y la última desde el Este a través de sedimentos aluviales.

Finalmente, en cuanto a los sectores de Pampa Puno y Polapi, sólo se dispone del nivel freático puntual en una serie de pozos en ambos sectores, los cuales se muestran en los Cuadros 4.2-3 y 4.2-4.

**CUADRO 4.2-3
NIVELES EN PAMPA PUNO**

POZOS	NIVEL (m)	COTA (m s.n.m.)
PUNO 1E	96,87	4.044
PUNO 2B	74,12	4.043
PUNO 2E	74,89	4.044
PUNO 3E	50,08	4.040
PUNO 4B	67,68	4.030
PUNO 4E	68,20	4.033
PUNO 5E	87,81	4.056
PUNO 6B	54,17	4.044
PUNO 7B	58,68	4.043
PUNO 8B	47,67	4.031
PUNO 9B	109,83	4.032
PUNO 314B	54,96	4.146
YOC-8	85,00	3.986
YOC-9	97,50	3.962
YOC-10	110,00	3.940

Fuente: Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013

**CUADRO 4.2-4
NIVELES EN POLAPI**

POZOS	NIVEL (m)	COTA (m s.n.m.)
PPE-2	171,00	3.668
PPE-3	142,00	3.320
PPE-4	149,00	3.642
SEP-01	141,17	3.320
PLE-1	123,95	3.749
PLE-2	135,55	3.750

Fuente: Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013

Se observa que en el sector de Pampa Puno la profundidad de la napa posee una variación de alrededor de 62 m, oscilando entre 47,67 m y 110,00 m. En cuanto a los pozos de Polapi, éstos presentan profundidades mayores, llegando hasta 171,00 m en el caso del pozo PPE-2.

4.2.2.2. Sector Loa Medio

Para este sector, la DGA cuenta con un pozo de monitoreo de niveles al Sureste del Aeropuerto de Calama, el cual cuenta con estadística que abarca desde el año 1987 hasta la actualidad. En el Cuadro 4.2-5 se presenta la información de este pozo, representativo del acuífero en el sector de Calama.

**CUADRO 4.2-5
POZO DGA CON INFORMACIÓN HISTÓRICA DE NIVELES SUBTERRÁNEOS EN
ACUÍFERO DE CALAMA. SECTOR LOA MEDIO**

Pozo	Código BNA	Altitud (m s.n.m.)	Coordenadas UTM: WGS-84		Estado	Período Registro	
			Este (m)	Norte (m)		Inicio	Término
Aeropuerto	02110017-K	2.389	514.250	7.510.760	Vigente	14-05-1987	12-12-2007

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

Asimismo, se tiene información de niveles estáticos en pozos de observación de propiedad de CODELCO distribuidos en todo este sector. Sin embargo, dada la cantidad de pozos y piezómetros en el área de Calama, se consideraron para el análisis sólo 6 pozos que fueron escogidos para representar distintas zonas de este sector acuífero. Por otra parte, para caracterizar los niveles subterráneos aguas abajo de Calama, se emplearon pozos de observación de Minera El Tesoro (MET), que al igual que en el caso de anterior, por simplicidad sólo se consideraron 2 pozos para caracterizar la zona oeste de Calama no cubierta por los pozos de CODELCO. En el Cuadro 4.2-6, se presentan los pozos tanto de CODELCO como de MET utilizados para la caracterización de niveles subterráneos en este sector acuífero.

CUADRO 4.2-6
POZOS CODELCO Y MET CON INFORMACIÓN DE NIVELES SUBTERRÁNEOS EN
ACUÍFERO DE CALAMA. SECTOR LOA MEDIO

Pozos	Coordenadas UTM: WGS-84		Altitud (m s.n.m.)	Ubicación
	Este (m)	Norte (m)		
SI-10C	523.599	7.533.239	2.540(*)	Aguas arriba Tranque Talabre
CHU-48	509.484	7.526.712	2.453(*)	Noroeste Tranque Talabre
SI-11E	515.254	7.527.219	2.437(*)	Aguas abajo Tranque Talabre
SI-33E	519.768	7.519.660	2.470(*)	Entre Yalquincha y Angostura
TL-36C	528.009	7.515.843	2.480(*)	Angostura
CHUCA-7B	508.020	7.515.684	2.271(*)	Calama
LE-2	503.121	7.516.805	2.216	Aguas abajo Calama
PPR-4	503.867	7.514.707	2.214	Aguas abajo Calama

Nota: (*) Altitud de pozos obtenido a partir del Modelo Numérico Talabre (CODELCO, 2010)

Fuente: Elaboración propia a partir de información de CODELCO y MET.

En la Figura 4.2-13, se muestra la ubicación espacial de los pozos considerados dentro del sector de Calama, mientras que en la Figura 4.2-14, se presenta el gráfico temporal de los niveles estáticos registrados en el pozo DGA denominado Aeropuerto.

Cabe mencionar que en el gráfico temporal de niveles estáticos del pozo DGA Aeropuerto (Figura 4.2-14), se excluyeron los datos de niveles registrados desde el 2008 hasta el 2013 dado que dicha información presenta en su mayoría valores nulos o negativos. Por lo tanto, para dicho período de tiempo se infiere que no es posible desarrollar fenómenos de surgencia ya que no es concordante con la condición actual de explotación del acuífero y los niveles históricos medidos en este pozo que son del orden de los 25 m.

Del mismo gráfico anterior, se aprecia que entre los años 1987 a 1991, los niveles se situaron a más menos en los 28 m de profundidad. Posteriormente, se registraron alzas en los niveles llegando a los 25 m aproximadamente, condición que se mantuvo hasta Septiembre de 1999. En los meses siguientes, los niveles subterráneos experimentaron fluctuaciones las que en promedio se mantuvieron hasta gran parte del año 2006, en torno a los 26 m. A fines del 2006 y principios del 2007, se observa una disminución de los niveles, los que alcanzaron los 27,5 m. Desde Abril de 2007 hasta Diciembre de ese mismo año, los niveles registraron un aumento hasta llegar a los 24 m aproximadamente.

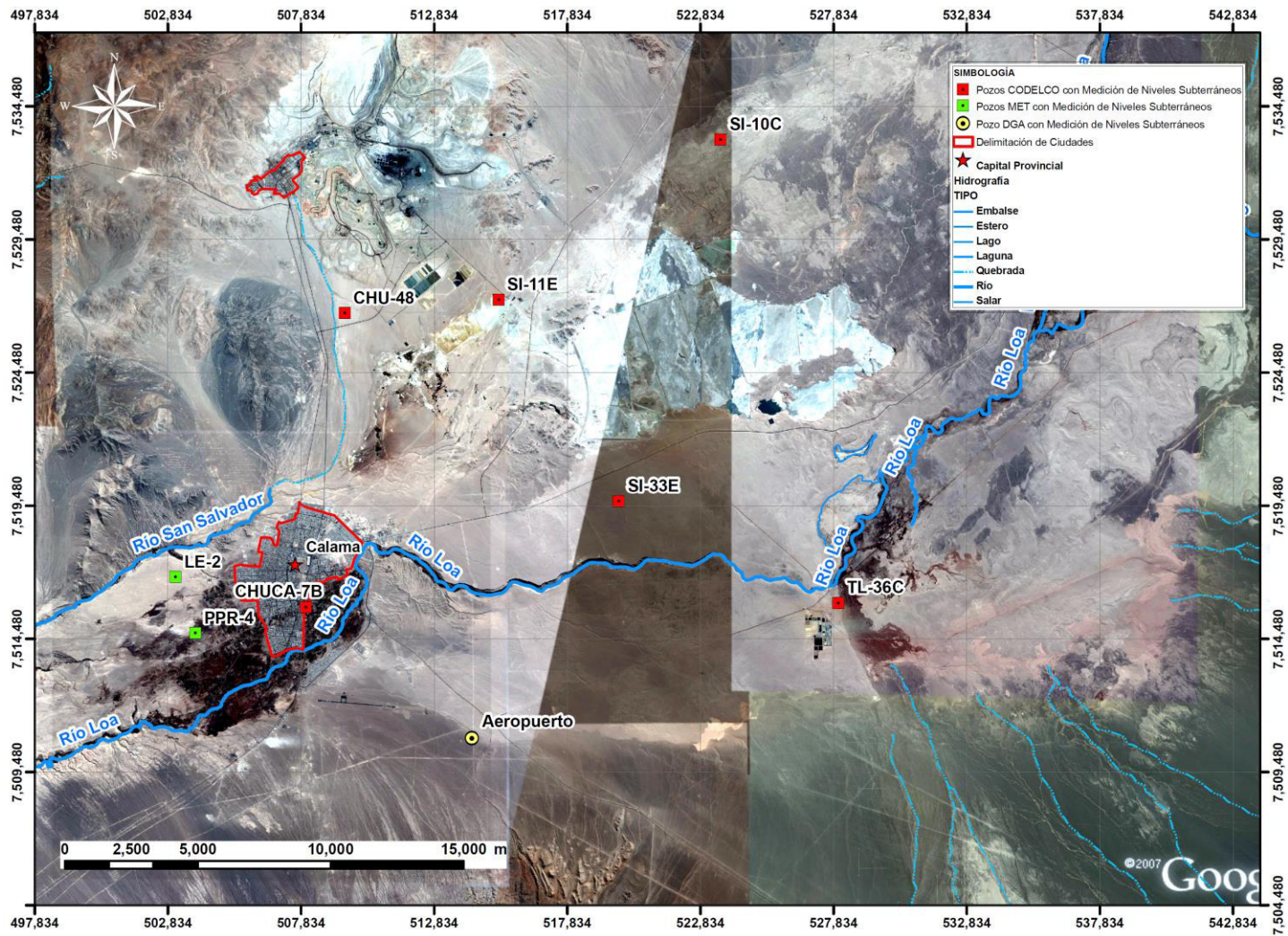
Por otra parte en la Figura 4.2-15, los niveles subterráneos del pozo SI-10C de CODELCO ubicado al noreste (aguas arriba) del Tranque Talabre, muestran una escasa variación de estos manteniendo en casi todo su registro niveles del orden de los 23 m bajo la superficie del terreno. Sin embargo, en los pozos SI-11E y CHU-48 comienza a observarse en el caso del sondaje SI-11E, un leve descenso en los niveles a partir de fines de 2006 hacia el final del registro, desde los 14.7 hasta los 15.3 m aproximadamente. Análogamente, en el caso del pozo CHU-48 se aprecia un descenso sostenido de sus niveles en la totalidad de su estadística desde el año 2003 al 2009. Dentro de dicho período se registra un descenso del orden de los 5.5 m, situación que puede explicarse por los bombeos de pozos vecinos en ese sector.

En la misma Figura 4.2-15, el pozo CHUCA-7B, ubicado en Calama, registra niveles subterráneos promedios en torno a los 20 m bajo la superficie del terreno. Además, es posible advertir que estos niveles siguen una tendencia cíclica desde el año 2006 en

adelante. Una explicación del fenómeno anterior, podría deberse al efecto de la estacionalidad de la recarga que proviene desde las zonas de riego situadas en la periferia de Calama.

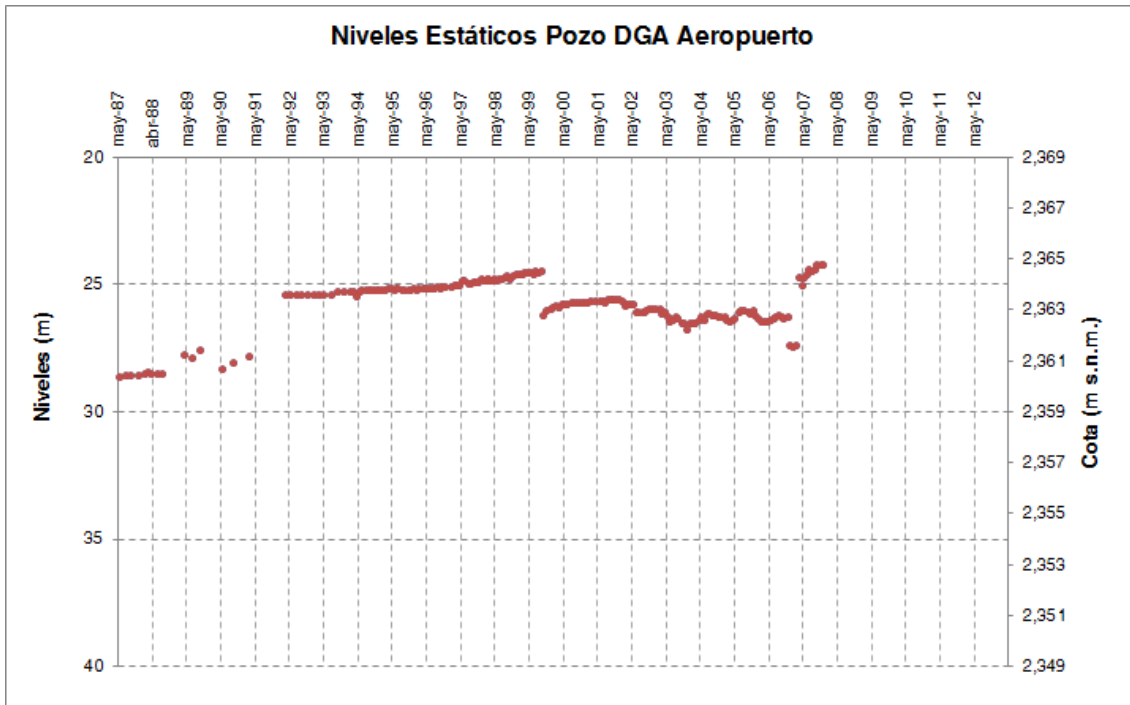
En la Figura 4.2-16, se observan que los niveles subterráneos en la zona comprendida entre Angostura y Yalquincha se muestran relativamente estables tal como se aprecian en los pozos TL-36C y SI-33E. Para el pozo TL-36C los niveles se encuentran en torno a los 10 m bajo la superficie del terreno mientras que en el sondaje SI-33E, se sitúan aproximadamente a los 61 m.

FIGURA 4.2-13
POZOS CON MEDICIÓN DE NIVELES SUBTERRÁNEOS EN SECTOR DE CALAMA



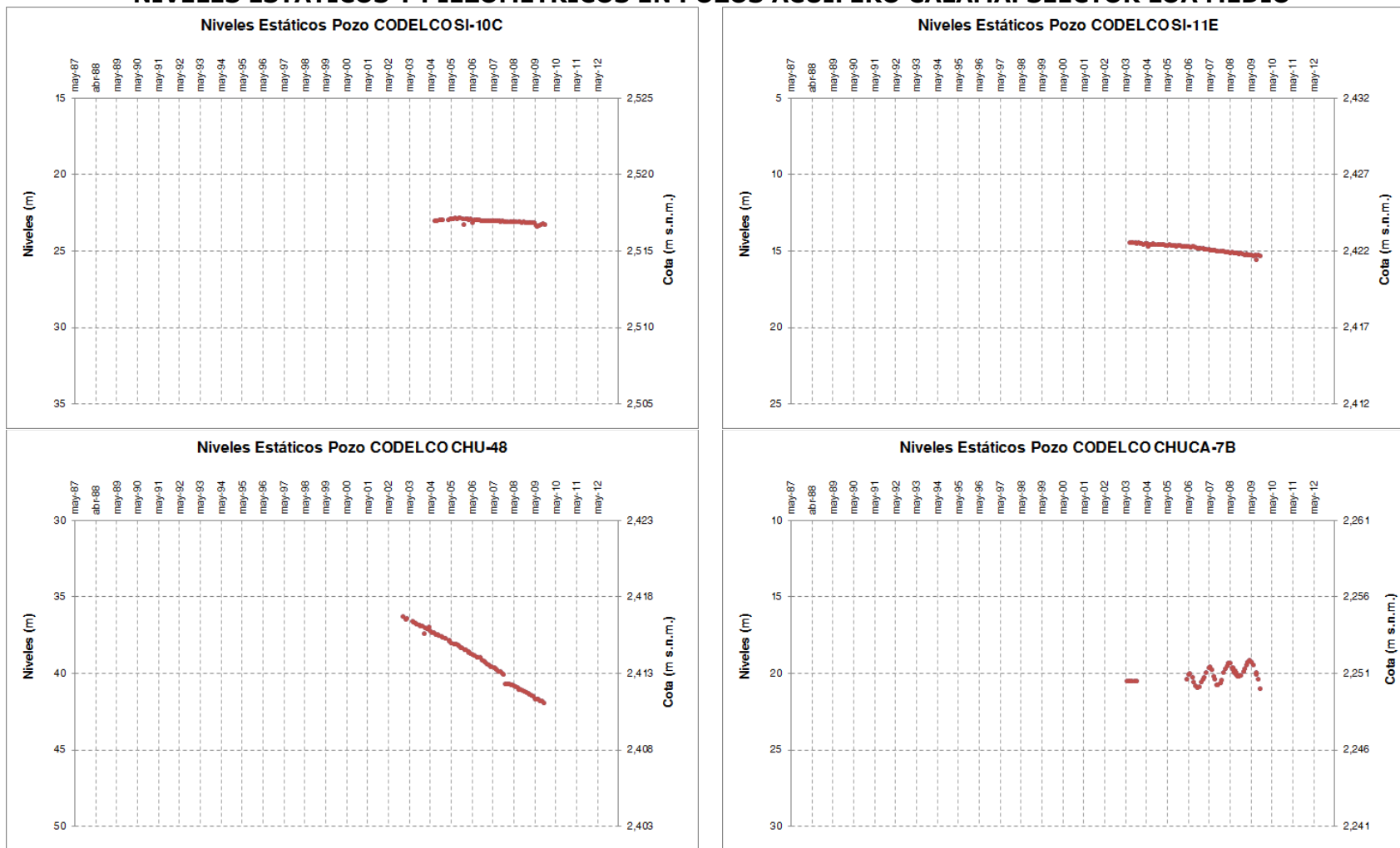
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4.2-14
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN POZO DGA AEROPUERTO



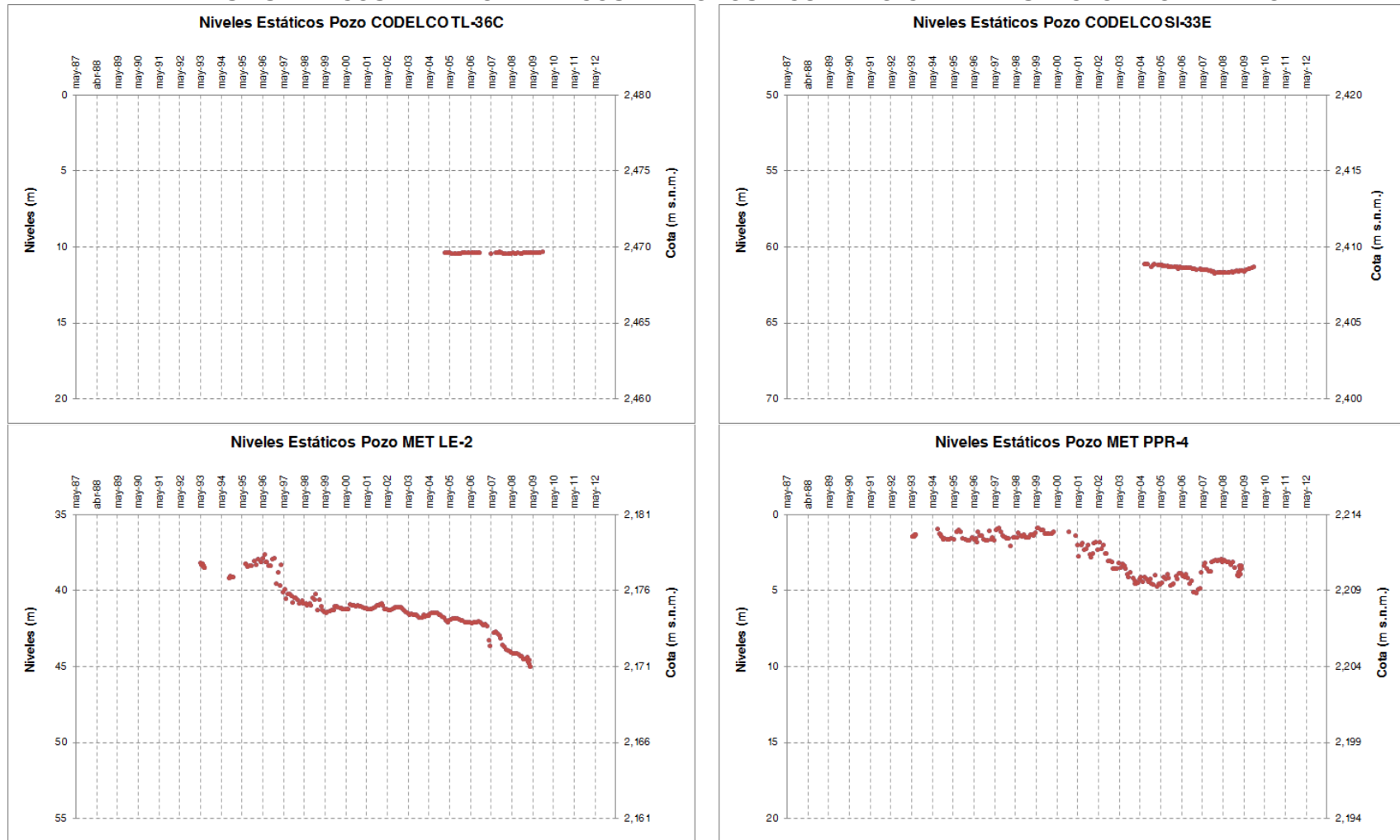
Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA

FIGURA 4.2-15
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN POZOS ACUÍFERO CALAMA. SECTOR LOA MEDIO



Nota: Se ajustaron las escalas verticales de todos los pozos, de forma congruente a los demás para así observar la variación de sus niveles respectivos.
 Fuente: Elaboración Propia en base a información de CODELCO.

FIGURA 4.2-16
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN POZOS ACUÍFERO CALAMA. SECTOR LOA MEDIO



Nota: Se ajustaron las escalas verticales de todos los pozos, de forma congruente a los demás para así observar la variación de sus niveles respectivos.
 Fuente: Elaboración Propia en base a información de CODELCO y MET.

En tanto, para los pozos de propiedad de MET ubicados en la parte poniente de Calama (Ver Figura 4.2-16), se puede advertir que en el caso particular del pozo LE-2, a mediados de 1997 se registró una variación de casi 2 m en los niveles subterráneos, para luego continuar con descensos moderados hasta mediados del 2007. A partir de esa fecha se exhibe un importante descenso de casi 3 m en los últimos dos años de estadística. Situación anterior, que se explicaría por el bombeo en pozos vecinos de esta zona.

En tanto el pozo PPR-4 de MET, muestra en la misma Figura 4.2-16, niveles subterráneos a escasos metros de la superficie que se mantienen estables desde el comienzo de la estadística hasta mediados del 2001. A partir de esta última fecha, los niveles experimentan un descenso del orden de 3 m hasta principios de 2004, los que se mantienen relativamente sin grandes variaciones hasta el 2007. Posterior a eso, se advierte que los niveles subterráneos muestran cierta recuperación, situándose en torno a los 3,3 m.

4.2.2.3. Sector Loa Bajo

A partir de la información entregada en el Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto Pampa Hermosa (SQM-GeoHidrología, 2012) se tienen registros de niveles subterráneos desde el año 2005 hasta 2011 en pozos de observación ubicados en el Salar de Llamara y cercanos a los puntos de bombeo, (concentrados principalmente en la parte Norte y Noroeste del acuífero). La localización de los pozos tanto de observación como de bombeo dentro del sector del Salar de Llamara se muestra en la Figura 4.2-17, en tanto que en el Cuadro 4.2-7 se adjunta la información relativa de estos pozos y el período de información con que cuenta cada uno de ellos.

Análogamente, en las Figuras 4.2-18 y 4.2-19 se muestran los niveles subterráneos registrados en cada uno de los pozos de observación ubicados en el acuífero del Salar de Llamara y precisados en el Cuadro 4.2-7.

De las Figuras 4.2-18 a 4.2-19 se aprecia una tendencia general a la baja de los niveles subterráneos, la cual vienen experimentando los pozos PO-2 a PO-8 desde Noviembre de 2005 en adelante, debido en parte a la proximidad de éstos con los puntos de bombeo en la parte norte del sector. Sin embargo, en pozos suficientemente alejados del área de bombeo, como por ejemplo en el pozo REC-1, el efecto de la extracción de aguas subterráneas es prácticamente imperceptible en los registros de niveles, tal como se muestra en el gráfico temporal asociado al pozo REC-1.

**CUADRO 4.2-7
POZOS DE OBSERVACIÓN Y BOMBEO EMPLAZADOS EN EL SECTOR DE SALAR DE
LLAMARA**

Pozo	Tipo	Coordenadas UTM: PSAD-56		Cota Terreno (m s.n.m.)	Período Registro	
		Norte (m)	Este (m)		Inicio	Término
PO-2	Observación	7.660.232	434.381	755	10-11-2005	28-12-2011
PO-3	Observación	7.658.908	434.764	752	10-11-2005	28-12-2011
PO-4	Observación	7.658.329	434.811	752	10-11-2005	28-12-2011
PO-5	Observación	7.659.090	734.722	752	10-11-2005	28-12-2011
PO-6	Observación	7.659.124	434.585	752	10-11-2005	28-12-2011
PO-7	Observación	7.659.242	434.596	752	10-11-2005	28-12-2011
PO-8	Observación	7.657.603	434.614	750	10-11-2005	28-12-2011
REC-1	Observación	7.635.796	442.686	778	10-11-2005	28-12-2011
3X-16A	Bombeo	7.659.094	434.564	752	10-11-2005	31-12-2011

Fuente: Elaboración propia a partir de Informe Semestral N°2 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto Pampa Hermosa. SQM-GeoHidrología. 2012.

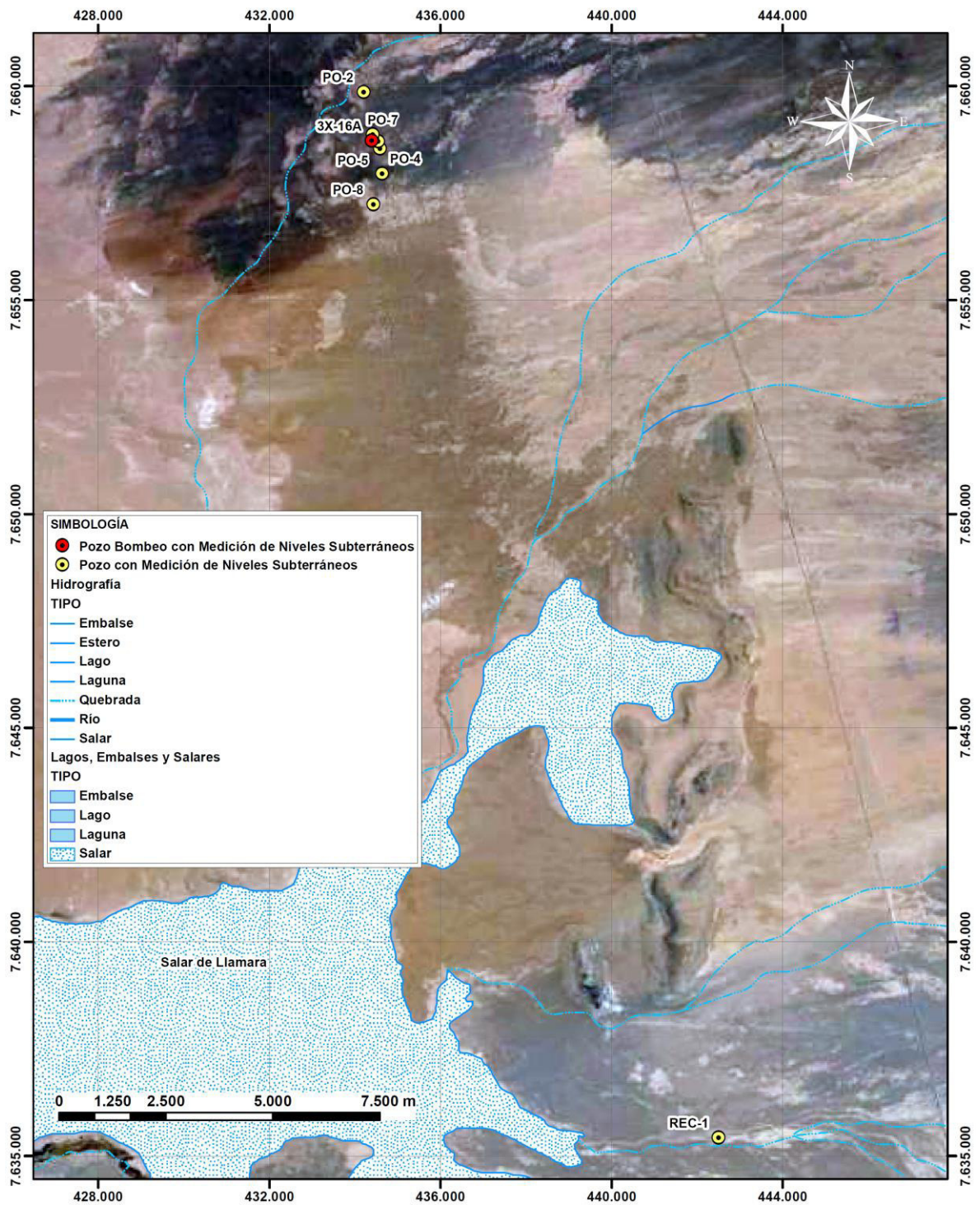
En los pozos PO, se advierten descensos máximos del orden de los 9 m, siendo éste último registrado en el pozo PO-6. Pese a que los niveles subterráneos en los pozos PO han experimentado una disminución, se exhibe en algunos de ellos cierta estabilidad en sus niveles durante el último período de registro (Noviembre 2010 a Diciembre 2011). Dentro de éstos, se encuentran los pozos: PO-2, PO-3, PO-6 y PO-7.

En el pozo REC-1, el más lejano de todos los analizados y ubicado en la parte sur del sector de, se observan descensos en torno a los 20 cm aproximadamente.

De acuerdo al modelo hidrogeológico del DICTUC (2007) para el acuífero del Salar de Llamara, la dirección del flujo subterráneo proviene del sector Noreste y Sureste, para posteriormente confluir hacia quebrada Amarga. En esta quebrada, se registran los menores niveles ya que es en esta zona, donde se producen los afloramientos de agua subterránea. Esta misma situación se replica también en la zona central del salar (Puquíos).

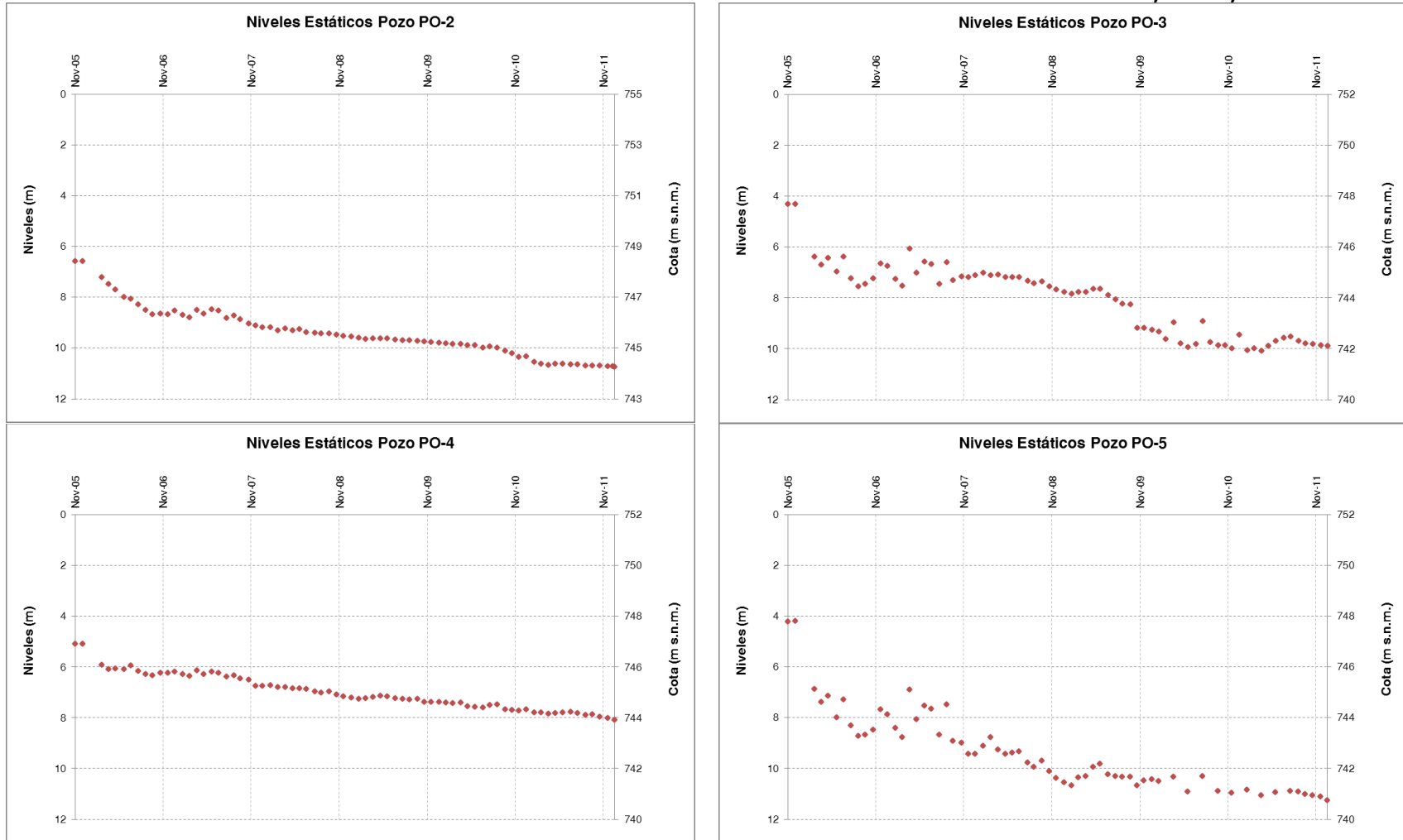
En términos globales, se puede decir que los niveles subterráneos se encuentran relativamente cercanos a la superficie del suelo, tal como lo muestran los gráficos temporales de variación de niveles estáticos.

FIGURA 4.2-17
UBICACIÓN DE POZOS DE OBSERVACIÓN Y BOMBEO CON MEDICIÓN DE NIVELES SUBTERRÁNEOS EN SECTOR DE SALAR DE LLAMARA



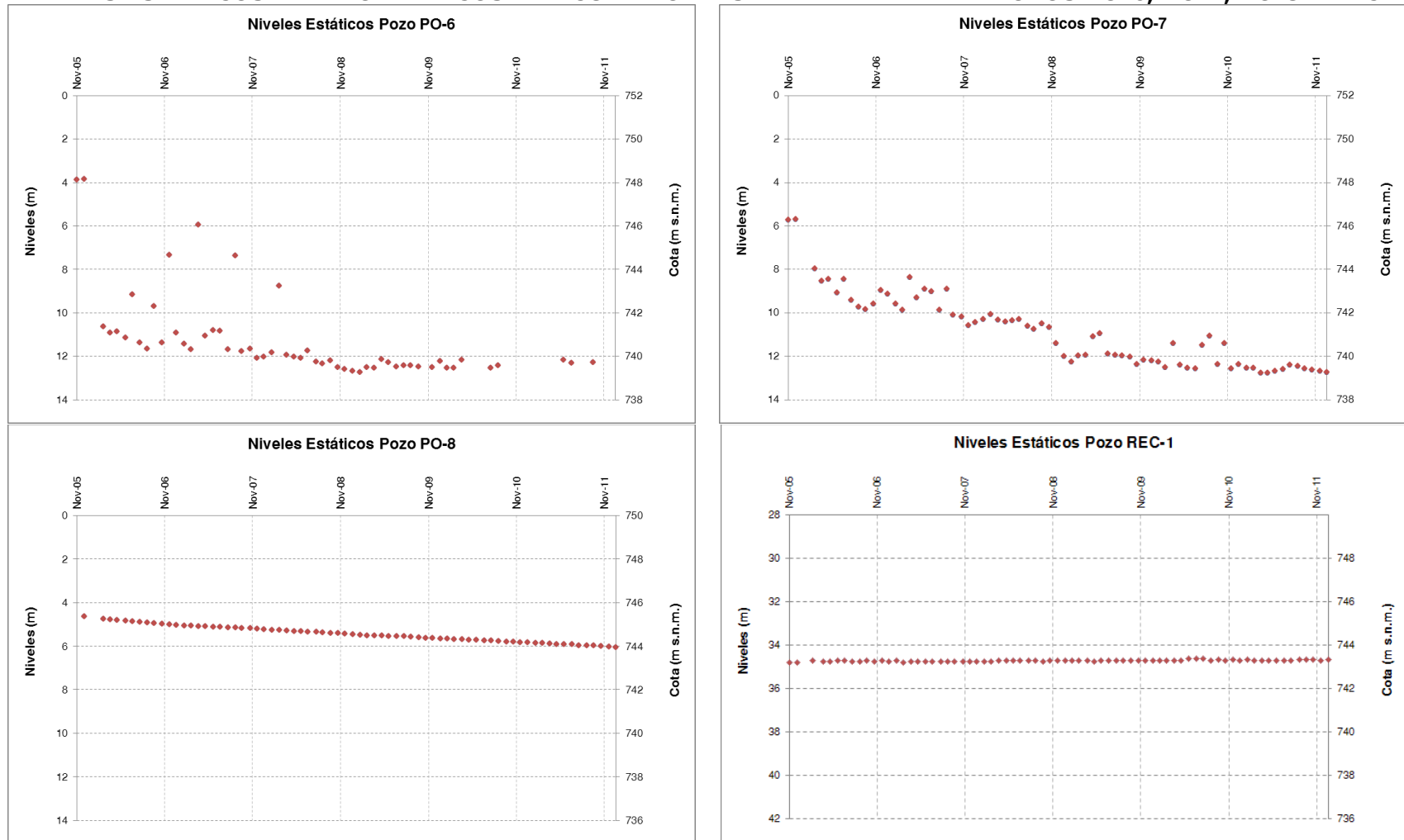
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4.2-18
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICO EN ACUÍFERO DEL SALAR DE LLAMARA. POZOS PO-2, PO-3, PO-4 Y PO-5



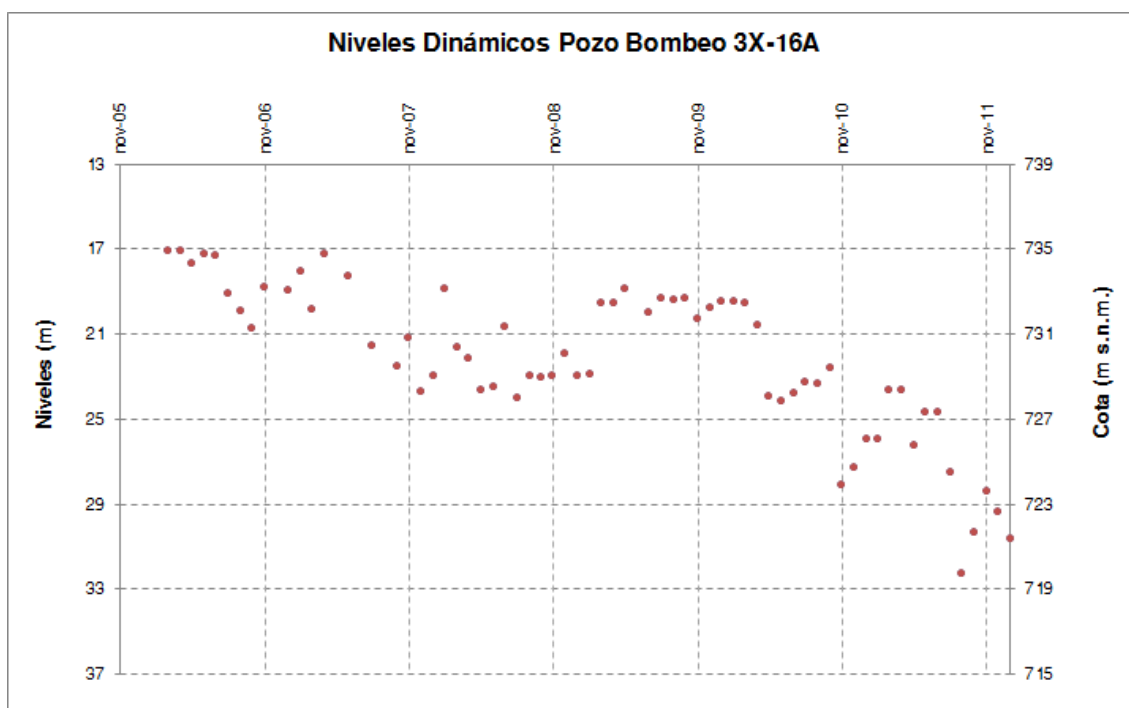
Fuente: Elaboración propia a partir de Informe Semestral N°2 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto Pampa Hermosa. SQM-GeoHidrología, 2012.

FIGURA 4.2-19
NIVELES ESTÁTICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN ACUÍFERO DE SALAR DE LLAMARA. POZOS PO-6, PO-7, PO-8 Y REC-1



Nota: Se ajustó la escala vertical del pozo REC-1, de forma congruente a los demás pozos para así observar la variación de sus niveles respectivos.
 Fuente: Elaboración propia a partir de Informe Semestral N°2 del PSAH del Proyecto Pampa Hermosa. SQM-GeoHidrología. 2012

FIGURA 4.2-20
NIVELES DINÁMICOS Y PIEZOMÉTRICOS EN ACUÍFERO DE SALAR DE LLAMARA.
POZO BOMBEO 3X-16A



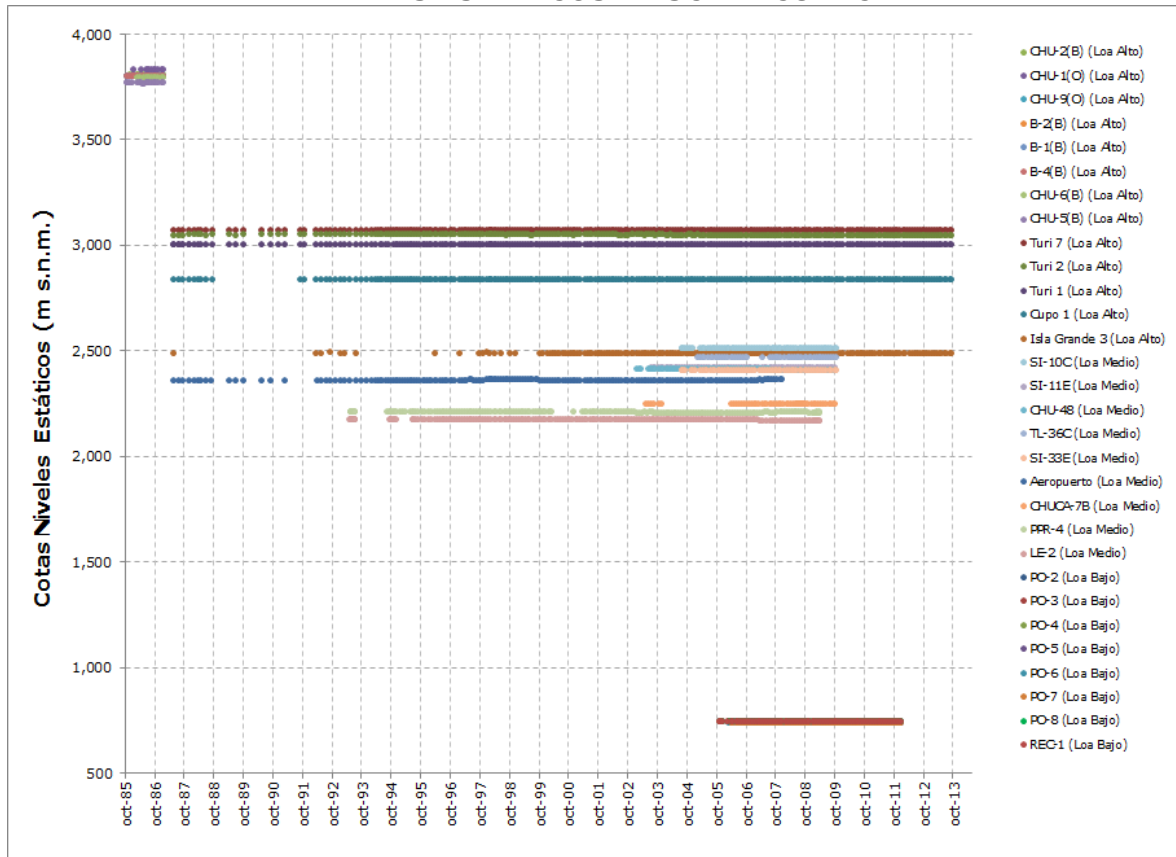
Fuente: Elaboración propia a partir de Informe Semestral N°2 del PSAH del Proyecto Pampa Hermosa. SQM-GeoHidrología. 2012

Tal como se observa en la Figura 4.2-20, los niveles dinámicos registrados en el pozo de bombeo 3X-16A muestran importantes variaciones que han ido dando paso a una tendencia marcadamente al descenso sobre todo en el último tiempo (2010-2011). El efecto de este bombeo en los pozos de observación vecinos (PO-3, PO-5, PO-6 y PO-7) explicarían los descensos registrados en dichos sondajes.

4.2.2.4. Niveles Subterráneos a Escala Cuenca

En la Figura 4.2-21 se graficaron los niveles estáticos de todos los pozos con información, recopilados en cada uno de los tres sectores: Loa Alto, Medio y Bajo. No fueron considerados para dicho gráfico, aquellos pozos que presentaban surgencia como por ejemplo, los pozos Turi 10 y Chiu Chiu.

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



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico anterior, se aprecian claramente que los niveles más altos se registran en la zona alta de la cuenca (Loa Alto) los que corresponden al sector de río San Pedro de Inacaliri (del orden de los 3.800 m s.n.m.), los que posteriormente disminuyen a medida que los flujos subterráneos recorren sectores de menor altitud geográfica. A la altura de Calama (Loa Medio), los niveles subterráneos se encuentran a una cota aproximada de 2.250 m s.n.m., para luego terminar de alcanzar los 740 m s.n.m. aproximadamente en el sector del Salar de Llamara (Loa Bajo).

4.2.3. Parámetros Hidráulicos de los Acuíferos

En algunas fuentes consultadas para la elaboración del presente estudio, se determinaron parámetros hidráulicos en base a interpretaciones de diversas pruebas de bombeos realizadas. A continuación se presenta un resumen con los parámetros hidráulicos obtenidos en cada uno de los estudios revisados y subsiguientemente asociados a cada uno de los tres sectores acuíferos que se dividió la cuenca del río Loa.

4.2.3.1. Estudio CORFO (1977)

Este estudio determinó valores de transmisividad, conductividad hidráulica y coeficientes de almacenamiento, en base a pruebas de bombeo realizadas en los sondajes construidos tanto en el sector de Ojos de San Pedro como en Turi. Los valores de los parámetros

hidráulicos obtenidos para ambos sectores, se presentan a continuación en los siguientes Cuadros:

**CUADRO 4.2-8
VALORES DE TRANSMISIVIDAD, CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y COEFECIENTE DE ALMACENAMIENTO EN SECTOR OJOS DE SAN PEDRO**

Pozo Bombeo	Transmisividad (m ² /día)	Cond. Hidráulica (m/día)	Cofeciente Almacenamiento
B1	37.565	380	0,32
B1	1.409	18	0,14
	2.690	34	0,22
	4.530	57	0,12
B2	51.610	1.000	8,3 x 10 ⁻²
	85.436	1.700	7,6 x 10 ⁻⁴
B3	4.595	65	0,14
	3.272	46	0,34
	1.775	25	6 x 10 ⁻³
B4	4.000	69	0,136
	3.456	76	-
	3.431	76	-
	2.021	45	-

Fuente: Hidrogeología de la Región de Ojos de San Pedro. Proyecto CHI-535. CORFO. 1977.

**CUADRO 4.2-9
VALORES DE TRANSMISIVIDAD, CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y COEFECIENTE DE ALMACENAMIENTO EN SECTOR DE TURI**

Pozo	Transmisividad (m ² /día)	Cond. Hidráulica (m/día)	Cofeciente Almacenamiento
Turi N° 1 II	565	12	1,7 x 10 ⁻²
Turi N° 2	973	6	1,8 x 10 ⁻²
Turi N° 5 III	1.780	18	6,1 x 10 ⁻⁴
Turi N° 7 I	2.710	31	5,8 x 10 ⁻³
Chiu Chiu N° 1	744	-	-
Cupo N° 1	2.213	14	4,6 x 10 ⁻³

Fuente: Hidrogeología de la Región de Turi. Proyecto CHI-535. CORFO. 1977.

4.2.3.2. Estudio CODELCO-Agua Ingenieros Consultores (1987)

Para este estudio, se determinaron valores de parámetros hidrogeológicos a partir de pruebas de bombeo realizadas en pozos existentes y en sondajes que se fueron construyendo a medida que avanzaba dicho estudio dentro del sector de San Pedro de Inacaliri. La interpretación de dichas pruebas de bombeo tuvo como resultado, los siguientes valores de transmisibilidades y coeficientes de almacenamiento:

**CUADRO 4.2-10
VALORES DE TRANSMISIVIDAD Y COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO EN
CUENCA DE SAN PEDRO DE INACALIRI**

Sondaje	Ubicación	Transmisibilidad (m²/día)	Coef. Almacenamiento
CHU-1(B)	Colana-Inacaliri	40.000	-
CHU-6(B)	Quebrada Cupo	3.000	0,0029
CHU-10(B)	Ojos San Pedro	10.000	0,0014
CHU-10B(N)	Ojos San Pedro	3.000	-
CHU-17(B)	Al Oeste CHU-14	85.000	0,0031
CHU-18(B)	NW CHU-19	100.000	0,0022
B-2(B)	Pampa Lagunita	105.000	-

Fuente: Elaboración propia a partir del Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa. CODELCO-Agua Ingenieros Consultores. 1987.

No obstante a los valores de coeficientes de almacenamiento calculados de las pruebas de bombeo en los pozos anteriores, este estudio estimó valores de almacenamientos de largo plazo para cada una de las unidades hidrogeológicas que conforman el sistema acuífero de San Pedro. De esta forma, se estimaron almacenamientos dentro los rangos 0,10 a 0,15 y 0,01 a 0,05 para los estratos compuestos por sedimentos y roca, respectivamente.

4.2.3.3. Estudio DICTUC (2007)

Este documento de referencia, utilizó información proveniente de pruebas de bombeo para estimar valores de conductividad hidráulica y transmisibilidad. Los resultados de estas pruebas, en términos de los valores de conductividad hidráulica y transmisibilidad que entrega su posterior interpretación, se presentan en el Cuadro 4.2-11.

Dadas las características de las pruebas de bombeo anteriores, no fue posible estimar la magnitud de los coeficientes de almacenamientos ya que dichas pruebas no contaban con pozos de observación. Por tal motivo sólo se determinaron los parámetros hidráulicos de conductividad hidráulica y transmisibilidad.

Posteriormente pruebas de bombeo de gasto constante, que si contaban con pozos de observación, se obtuvieron rangos de transmisibilidad entre 1.200 y 1.500 m²/día y coeficientes de almacenamiento entre 0,12 y 0,3%.

La discrepancia entre los valores de transmisibilidad calculados en el Cuadro 4.2-11 y los determinados posteriormente en las siguientes pruebas de bombeo, radica básicamente en que las primeras pruebas de bombeo se llevaron a cabo sólo en el pozo donde se realizaba la extracción y por tanto las pérdidas de carga generadas tienden a subestimar los valores de este parámetro.

CUADRO 4.2-11
VALORES DE TRANSMISIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA PARA
ACUÍFERO DE SALAR DE LLAMARA

Pozo	Coordenadas UTM		K (m/día)	T (m ² /día)
	Este (m)	Norte (m)		
TC-10	440.297	7.663.037	0,5 - 4	28,8 - 250,6
2PL-2	433.145	7.658.924	2,1 - 4,3	131,8 - 263,5
3X-14A	433.595	7.661.977	0,3 - 2,7	20,2 - 165,6
2 HENOC	433.787	7.660.012	6,1 - 10	367,2 - 606,2
X-17A	439.902	7.663.593	2,1 - 4,1	103,1 - 204,5
2PL-3	433.844	7.657.992	5,1 - 7,5	276,5 - 410,4
3X-S7	431.762	7.660.337	0,1 - 0,6	3,5 - 35,7
3X-16A	434.560	7.659.096	7,4 - 11,6	337 - 527
RL-13	438.300	7.637.600	0,2 - 0,7	6 - 22
XT-3	435.765	7.660.749	4,2 - 4,4	291 - 310
XT-6	437.165	7.657.981	0,3 - 2,9	6 - 70
XT-7	433.044	7.657.230	1,3 - 1,7	33 - 41
XT-2	435.246	7.661.552	2,1	77

Fuente: Modificado de Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. DICTUC. 2007.

4.2.3.4. Estudio CODELCO-KNIGHT PIÉSOLD (2010)

En este estudio se implementó un modelo hidrogeológico numérico para simular el comportamiento combinado entre el acuífero de Calama y el Tranque Talabre de propiedad de CODELCO tanto en régimen permanente como transiente. Como resultado del proceso de calibración del modelo numérico en ambos regímenes y con el fin de lograr un buen ajuste entre los niveles subterráneos calculados con los medidos, se logró la estimación de los parámetros hidráulicos óptimos que reproducen adecuadamente la condición hidrogeológica del sistema. Además, se determinó la distribución espacial de estos parámetros dentro del acuífero de Calama.

Los parámetros hidrogeológicos considerados para la etapa de calibración del modelo numérico anterior fueron los coeficientes de almacenamiento, conductividades hidráulicas y rendimientos específicos. El rango de valores de dichos parámetros calibrados se muestra a continuación en los siguientes Cuadros.

CUADRO 4.2-12
RANGO DE COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO ESPECÍFICO CALIBRADOS
PARA ACUÍFERO CALAMA

Unidades Hidrogeológicas	Coef. Almac. Específico (1/m)
Acuífero Superior	1×10^{-5}
Acuífero Inferior	$3 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-5}$

Fuente: Elaboración propia en base a estudio "Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-KP. 2010

CUADRO 4.2-13
RANGO DE RENDIMIENTOS ESPECÍFICOS CALIBRADOS PARA ACUÍFERO CALAMA

Unidades Hidrogeológicas	Rendimiento Específico
Acuífero Superior	0,0021 - 0,101
Acuífero Inferior	0,1

Fuente: Elaboración propia en base a estudio "Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-KP. 2010

CUADRO 4.2-14
RANGO DE PERMEABILIDADES CALIBRADAS PARA ACUÍFERO CALAMA

Unidades Hidrogeológicas	Permeabilidad (m/día)
Acuífero Superior	0,01 - 3,9
Acuífero Inferior	0,1 - 6

Fuente: Elaboración propia en base a estudio "Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-KP. 2010

4.2.3.5. Estudio DGA-MATRAZ (2012)

Este estudio, determinó rangos de valores de permeabilidades y coeficientes de almacenamientos para el acuífero de Calama (Sector Loa Medio, según sectorización KP), empleando mayormente tanto datos de campañas de perforaciones y ensayos de bombeo como los trabajos de otros estudios. Como resultado del procesamiento de toda la información anterior, dicho estudio obtuvo los siguientes rangos de valores para los parámetros hidráulicos permeabilidad y coeficiente de almacenamiento, sintetizados en los siguientes dos Cuadros:

CUADRO 4.2-15
RANGO DE PERMEABILIDADES PARA ACUÍFERO DE CALAMA. SECTOR LOA MEDIO

Unidades Hidrogeológicas	Permeabilidad (m/día)
Acuífero Superior	$1 \times 10^{-3} - 3 \times 10^2$
Acuitardo	$1 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-3}$
Acuífero Inferior	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^2$
Basamento	$1 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-5}$

Fuente: Modificado del estudio "Modelación del Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Río Loa. DGA-MATRAZ. 2012.

CUADRO 4.2-16
RANGO DE COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO PARA ACUÍFERO DE CALAMA. SECTOR LOA MEDIO

Unidades Hidrogeológicas	Coef. de Almacenamiento
Acuífero Superior	$1,2 \times 10^{-4} - 1,6 \times 10^{-2}$
Acuífero Inferior	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-1}$

Fuente: Modificado del estudio "Modelación del Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Río Loa. DGA-MATRAZ. 2012.

4.2.3.6. Estudio Mayco Consultores (2013)

Este estudio presenta los resultados de pruebas de bombeo y recuperación para una serie de pozos. En particular, para los sectores de Pampa Puno y Polapi se proporcionan los valores de transmisividad obtenidos de pruebas realizadas en diferentes fechas. A continuación se muestran los valores medios obtenidos para cada pozo en ambos sectores de interés (Cuadros 4.2-17 y 4.2-18).

**CUADRO 4.2-17
TRANSMISIVIDAD PAMPA PUNO**

POZO	TRANSMISIVIDAD (m²/d)
PUNO 2B	262
PUNO 4B	290*
PUNO 6B	233*
PUNO 7B	497
PUNO 8B	12
PUNO 9B	140
PUNO 10B	85
PUNO 11B	27
PUNO 314B	4

(*) Promedio calculado sin considerar un valor que se escapaba de la tendencia

Fuente: Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013

**CUADRO 4.2-18
TRANSMISIVIDAD SECTOR POLAPI**

POZO	TRANSMISIVIDAD (m²/d)
SEP-01	245
PPE-3	222

Fuente: Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013

En relación al coeficiente de almacenamiento, no se dispone de información para el sector de Pampa Puno, mientras que para el sector de Polapi, el estudio presenta un valor de $2,4 \times 10^{-4}$, obtenido de los análisis de una prueba de bombeo con pozo de observación.

4.2.3.7. Parámetros Hidráulicos Considerados para el Presente Estudio

De las cuatro fuentes anteriormente consultadas y que entregan información de las magnitudes de los parámetros hidráulicos que se registran en los distintos sectores de la cuenca del río Loa, se tiene que sólo para el Sector Loa Medio existen suficientes datos como para disponer de una adecuada representatividad del acuífero. Caso opuesto, ocurre con el Sector Loa Bajo donde la información de estos parámetros sólo se reduce a un área acotada del acuífero del Salar de Llamara y que no incluye la extensa zona ubicada entre María Elena y Quillagua.

Por otro lado, el Sector Loa Alto sólo se dispone de datos de permeabilidades y coeficientes de almacenamiento en las cuencas de los ríos San Pedro de Inacaliri y

Salado, excluyendo la zona alta del río Loa que va desde aguas arriba de su confluencia con el río San Pedro hasta su nacimiento respectiva.

Teniendo presente todo lo anterior, se considerarán los rangos de permeabilidades presentados en el Cuadro 4.2-19, para cada uno de los tres sectores de la cuenca del río Loa. Estos valores serán considerados para la segunda etapa del estudio que guarda relación con la modelación del modelo integrado en MAGIC.

Cabe precisar además, que los valores de permeabilidad utilizados en dicha modelación serán susceptibles de ser modificados en virtud de los ajustes numéricos que se requieran para representar las condiciones hidrogeológicas observadas en la cuenca.

Del mismo modo, para el caso de los coeficientes de almacenamiento se considerarán los rangos estimados en el Cuadro 4.2-20, cuyos valores serán ajustados en función de los ajustes numéricos a realizar en el modelo integrado.

**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	3×10^{-5} - 3×10^{-1}
Loa Bajo	Salar de Llamara	0,0012 - 0,003

Fuente: Elaboración propia.

5. SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE DERECHOS

Las principales fuentes de información corresponden a los expedientes disponibles en las oficinas de la DGA central y regional, y regularizaciones de los derechos disponibles en el Conservador de Bienes Raíces respectivo.

5.1. Información de Derechos en DGA

En primera instancia, se realizó la revisión de la información de derechos de aguas otorgados disponible en el sitio web de la Dirección General de Aguas (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 otorgados.

La información disponible para cada derecho otorgado consiste en datos asociados al expediente (código, fecha de resolución, solicitante, unidad de resolución, etc.), ubicación del derecho (comuna, provincia, cuenca, fuente, coordenadas, etc.), caudales (mensuales y anuales), tipo de derecho (naturaleza, tipo y ejercicio) y descripción. Sin embargo, no toda la información se encuentra disponible para cada derecho.

Como ejemplo de información no disponible para todos los derechos y que se considera relevante para el desarrollo del presente estudio se encuentran las coordenadas geográficas (necesarias para implementar la extracción de agua en el modelo MAGIC) y el uso del agua.

En cuanto al ejercicio de los derechos, éste se clasifica en 5 categorías: Permanente y Continuo, Permanente y Discontinuo, Eventual y Continuo, Eventual y Discontinuo, y Permanente y Alternado. En los Cuadros 5.1-1 al 5.1-5 se presenta el caudal de derechos otorgados en las diferentes comunas asociadas a los derechos de la cuenca del río Loa de acuerdo al ejercicio de cada uno de ellos.

En los Anexos 5-1 y 5-2 se presenta la información de derechos constituidos para aguas superficiales y subterráneas respectivamente.

**CUADRO 5.1-1
DERECHOS OTORGADOS DE EJERCICIO PERMANENTE Y CONTINUO**

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	8.238,6	3.099,5	259,8	97,7
Maria Elena	308,8	48,8	9,7	1,5
Ollague	9,0	0,0	0,3	0,0
San Pedro de Atacama	0,0	265,4	0,0	8,4
Tocopilla	70,1	0,0	2,2	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	0,0	0,0	0,0
TOTAL	17.304,7	3.793,7	545,7	119,6

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

**CUADRO 5.1-2
DERECHOS OTORGADOS DE EJERCICIO PERMANENTE Y DISCONTINUO**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente Anual (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Antofagasta	0,0	0,0	0,0	0,0
Calama	0,0	0,0	0,0	0,0
Maria Elena	74,2	0,0	2,3	0,0
Ollague	0,0	0,0	0,0	0,0
San Pedro de Atacama	0,0	0,0	0,0	0,0
Tocopilla	0,0	0,0	0,0	0,0
Sierra Gorda	0,0	0,0	0,0	0,0
Taltal	0,0	0,0	0,0	0,0
Pica	0,0	0,0	0,0	0,0
Pozo Almonte	0,0	0,0	0,0	0,0
Iquique	0,0	5,0	0,0	0,2
TOTAL	74,2	5,0	2,3	0,2

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

**CUADRO 5.1-3
DERECHOS OTORGADOS DE EJERCICIO EVENTUAL Y CONTINUO**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente Anual (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Antofagasta	0,0	0,0	0,0	0,0
Calama	500,0	0,0	15,8	0,0
Maria Elena	92,8	0,0	2,9	0,0
Ollague	0,0	0,0	0,0	0,0
San Pedro de Atacama	0,0	0,0	0,0	0,0
Tocopilla	0,0	0,0	0,0	0,0
Sierra Gorda	0,0	0,0	0,0	0,0
Taltal	0,0	0,0	0,0	0,0
Pica	0,0	0,0	0,0	0,0
Pozo Almonte	0,0	0,0	0,0	0,0
Iquique	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	592,8	0,0	18,7	0,0

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

**CUADRO 5.1-4
DERECHOS OTORGADOS DE EJERCICIO EVENTUAL Y DISCONTINUO**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente Anual (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Antofagasta	0,0	0,0	0,0	0,0
Calama	0,0	0,0	0,0	0,0
Maria Elena	52,0	0,0	1,6	0,0
Ollague	0,0	0,0	0,0	0,0
San Pedro de Atacama	0,0	0,0	0,0	0,0
Tocopilla	37,5	0,0	1,2	0,0
Sierra Gorda	0,0	0,0	0,0	0,0
Taltal	0,0	0,0	0,0	0,0
Pica	0,0	0,0	0,0	0,0
Pozo Almonte	0,0	0,0	0,0	0,0
Iquique	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	89,5	0,0	2,8	0,0

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

**CUADRO 5.1-5
DERECHOS OTORGADOS DE EJERCICIO PERMANENTE Y ALTERNADO**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente Anual (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Antofagasta	0,0	0,0	0,0	0,0
Calama	2,5	0,0	0,1	0,0
Maria Elena	0,0	0,0	0,0	0,0
Ollague	0,0	0,0	0,0	0,0
San Pedro de Atacama	18,0	0,0	0,6	0,0
Tocopilla	0,0	0,0	0,0	0,0
Sierra Gorda	0,0	0,0	0,0	0,0
Taltal	0,0	0,0	0,0	0,0
Pica	0,0	0,0	0,0	0,0
Pozo Almonte	0,0	0,0	0,0	0,0
Iquique	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	20,5	0,0	0,7	0,0

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

De los derechos mostrados anteriormente, una parte importante corresponde a derechos de agua de tipo No Consuntivo, los cuales son en su totalidad de ejercicio Permanente y Continuo. Estos derechos se presentan en el Cuadro 5.1-6.

Finalmente, El Cuadro 5.1-7 muestra un resumen de la información de derechos de aprovechamiento otorgados.

**CUADRO 5.1-6
DERECHOS OTORGADOS DE TIPO NO CONSUNTIVO**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente Anual (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Antofagasta	8.508,3	0,0	268,3	0,0
Calama	2.850,0	0,0	89,9	0,0
Maria Elena	151,7	0,0	4,8	0,0
Ollague	0,0	0,0	0,0	0,0
San Pedro de Atacama	0,0	0,0	0,0	0,0
Tocopilla	70,1	0,0	2,2	0,0
Sierra Gorda	0,0	0,0	0,0	0,0
Taltal	0,0	0,0	0,0	0,0
Pica	0,0	0,0	0,0	0,0
Pozo Almonte	0,0	0,0	0,0	0,0
Iquique	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	11,580.1	0,0	365,2	0,0

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

**CUADRO 5.1-7
RESUMEN DERECHOS OTORGADOS 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 cuanto a los derechos en trámite, de acuerdo 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 5.1-8.

**CUADRO 5.1-8
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.

En el Anexo 5-3 del presente estudio, se adjunta la información relativa a los derechos de aprovechamiento que se encuentran en trámite.

5.2. Información de Derechos en CBR

De acuerdo a lo mostrado en la página web de la DGA, la información de derechos de aguas se encuentra actualizada e incluye todos los derechos otorgados y en trámite existentes hasta el día de hoy en la cuenca. Entre los campos de información se incluye la entidad que llevó a cabo la resolución, entre los que destaca el Juzgado de Letras, la Dirección General de Aguas y el Conservador de Bienes Raíces.

Con el objeto de revisar que se dispone de toda la información de derechos otorgados, se realizó una visita al CBR de Calama, donde se solicitó la información de expedientes asociados a regularizaciones de derechos. Como resultado de esta solicitud, se obtuvieron una serie de expedientes que fueron contrastados con la información disponible en la base de datos de derechos otorgados dentro de la comuna (Ver expedientes en Anexo 5-4). De este modo, se pudo corroborar que todos los expedientes recibidos se encontraban debidamente actualizados en la base de datos de la DGA. Sin embargo, existen algunos expedientes que aparecen en la base de datos de la DGA que no fueron proporcionados por el CBR de Calama. El Cuadro 5.1-9 muestra un resumen de los expedientes asociados al CBR de Calama disponibles en la base de datos de la DGA, indicándose en la última columna aquellos que fueron revisados de acuerdo a la información obtenida.

**CUADRO 5.1-9
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, Segunda Región de Antofagasta, se desarrolló una campaña de terreno para determinar el uso real del agua en la cuenca.

Esta campaña de levantamiento de demandas y consumos, donde se catastraron los derechos de agua superficiales y subterráneos de la cuenca considerados en el listado regional de usuarios, se realizó mediante encuestas a los propietarios, cuidadores o trabajadores del lugar.

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

6.1. Antecedentes Generales de la Campaña

La campaña de terreno tuvo por objeto adquirir información de las características de riego en la cuenca del Río Loa por medio de encuestas realizadas a los usuarios de las zonas aledañas a las riberas de los ríos considerados en el presente estudio.

La actividad se realizó dentro de la última semana de Noviembre y la primera quincena de Diciembre del año 2013, fue ejecutada por dos profesionales del área de Recursos Hídricos de Knight Piésold y se contó con el apoyo de la oficina de la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI) de la ciudad de Calama.

A continuación se listan los principales sectores y poblados visitados de acuerdo a las tres subcuencas del río Loa que se detallan:

- Loa Alto: Aguas arriba de la confluencia con el Río Salado.
 - Chiu Chiu.
 - Lasana.
 - Llalqui.
 - Ayquina.
 - Caspana.
 - Cupo.
 - Turi.
 - Paniri.
 - Toconce.
 - Ojos de San Pedro.
 - Inacaliri.

- Loa Medio: entre confluencia con el Río Salado y Quebrada de Barrera.
 - Calama.
 - María Elena.
 - Quillagua.
 - Salar de Llamara.

- Loa Bajo: entre Quebrada Amarga y Desembocadura.
 - Desembocadura río Loa.

6.2. Levantamiento de la Información

De acuerdo a los objetivos planteados para esta campaña de terreno, se generó el formulario de encuesta que se presenta en el Anexo 6-1 y que pretendió obtener información relevante como:

- Ubicación Geográfica: coordenadas UTM de la bocatoma que da inicio al canal.
- Características Físicas: dimensiones, largo y tipo de revestimiento del canal.
- Características de Riego: superficie de riego, tipo de cultivo, método y horas de riego.

De acuerdo a esto, la metodología utilizada para el levantamiento de la información en terreno se desarrolló de la siguiente forma:

- Se ubicó, geo-referenció y analizó el estado de la captación, desde la toma hasta la compuerta de entrega.
- Se generó un set fotográfico de la obra de arte (compuertas) que controla el flujo en el canal y de los alrededores, que permitan verificar el uso de suelo.
- Se inspeccionó un tramo representativo del canal para obtener sus dimensiones y verificar el estado y tipo de revestimiento.
- Se entrevistó a usuarios del canal para obtener información acerca:
 - Del Canal.
 - Largo del canal.
 - Área revestida.
 - Tipo de revestimiento.
 - Año en que fue revestido.
 - Del área considerada para cada canal.
 - Superficie potencial de riego.
 - Superficie bajo riego.
 - Tipos de cultivos.
 - Métodos de riego.
 - Meses y ciclos de riego.
 - Modalidad de entrega del caudal.

Finalmente, se registraron comentarios generales referentes al comportamiento y detalles de cada canal que pudieran complementar la información listada en la encuesta o de aquellos puntos que no lograron ser resueltos con seguridad por parte del usuario.

6.3. Captaciones Superficiales para Riego

Durante la actividad en terreno se visitaron las diferentes localidades donde existen derechos constituidos para canales de regadío. El Cuadro 6.3-1 muestra la información recabada que es de importancia para la modelación de cada uno de los canales catastrados.

**CUADRO 6.3-1
CANALES CATASTRADOS**

Localidad	Canal	Dimensiones (m)			Revestimiento
		Alto	Ancho Superior	Base	
Ayquina	Ayquina	0,35	0,40	0,40	Piedra
Calama	Yalquincha 2	0,23	0,60	0,60	Hormigón
	Yalquincha 1	0,60	0,60	0,60	Hormigón
	Tronco	1,04	1,10	1,10	Hormigón
	Unificado Banda Radic Topater	0,43	0,47	0,47	Hormigón
	Lay Lay	0,80	0,61	0,61	Hormigón
	Núñez	0,60	1,00	1,00	Hormigón
	Chunchuri Bajo	0,80	0,70	0,70	Hormigón
	La Prensa	0,56	0,50	0,50	Hormigón
Dupont	0,23	0,70	0,70	Hormigón	
Caspana	Caspana	0,30	0,40	0,40	Piedra
Chiu-Chiu	Grande	0,50	0,80	0,80	Hormigón
	La Banda	0,50	0,80	0,80	Hormigón
	El Pueblo	0,50	0,80	0,80	Hormigón
Cupo	Inga	0,30	0,40	0,40	Hormigón
	Mesón	0,30	0,40	0,40	Hormigón
Lasana	Buen Retiro	0,50	0,50	0,50	Hormigón
	San Antonio	0,50	0,50	0,50	Hormigón
	Los Ramírez	0,60	0,60	0,60	Hormigón
	Quilchire	0,52	0,53	0,53	Hormigón
	Los Perales	0,50	0,50	0,50	Hormigón
	Pona	0,50	0,50	0,50	Hormigón
Paniri	Paniri	0,30	0,35	0,35	Piedra
Quillagua	Canal 1	0,45	1,50	0,75	Hormigón
	Canal 2	0,40	0,60	0,60	Hormigón
Toconce	Toconce	0,55	0,53	0,53	Hormigón
Turi	El Trigal	0,48	0,42	0,42	Hormigón
	Puente	0,48	0,42	0,42	Hormigón

CUADRO 6.3-1

CANALES CATASTRADOS

Localidad	Canal	Dimensiones (m)			Revestimiento
		Alt o	Ancho Superior	Bas e	
Ayquina	Ayquina	0,3 5	0,4	0,4	Piedra
Calama	Yalquincha 2	0,2 3	0,6	0,6	Hormigón
	Yalquincha 1	0,6	0,6	0,6	Hormigón
	Tronco	1,0 4	1,1	1,1	Hormigón
	Unificado Banda Radic Topater	0,4 3	0,47	0,47	Hormigón
	Lay Lay	0,8	0,61	0,61	Hormigón
	Núñez	0,6	1	1	Hormigón
	Chunchuri Bajo	0,8	0,7	0,7	Hormigón
	La Prensa	0,5 6	0,5	0,5	Hormigón
	Dupont	0,2 3	0,7	0,7	Hormigón
Caspana	Caspana	0,3	0,4	0,4	Piedra
Chiu-Chiu	Grande	0,5	0,8	0,8	Hormigón
	La Banda	0,5	0,8	0,8	Hormigón
	El Pueblo	0,5	0,8	0,8	Hormigón
Cupo	Inga	0,3	0,4	0,4	Hormigón
	Mesón	0,3	0,4	0,4	Hormigón
Lasana	Buen Retiro	0,5	0,5	0,5	Hormigón
	San Antonio	0,5	0,5	0,5	Hormigón
	Los Ramírez	0,6	0,6	0,6	Hormigón
	Quilchire	0,5 2	0,53	0,53	Hormigón
	Los Perales	0,5	0,5	0,5	Hormigón
	Pona	0,5	0,5	0,5	Hormigón
Paniri	Paniri	0,3	0,35	0,35	Piedra
Quillagua	Canal 1	0,4 5	1,5	0,75	Hormigón
	Canal 2	0,4	0,6	0,6	Hormigón
Toconce	Toconce	0,5 5	0,53	0,53	Hormigón
Turi	El Trigal	0,4 8	0,42	0,42	Hormigón
	Puente	0,4 8	0,42	0,42	Hormigón

Fuente: Elaboración Propia

6.4. Captaciones Subterráneas

Las captaciones subterráneas dentro de la cuenca del río Loa corresponden casi en su totalidad a privados para uso sanitario, industrial y minero, por lo que la obtención de información referente a ellas dependía de la presencia de personal de las respectivas compañías en el sector y su disponibilidad a proporcionar los datos relevantes para el presente estudio. Durante el catastro de las captaciones subterráneas no fue posible encontrar personal que entregara información relevante y permitiera la medición de los pozos. De esta forma, la actividad en terreno se centró en conocer el estado actual de las captaciones, es decir verificar si se encontraban en condiciones de operar o bien estaban deshabilitados.

El Cuadro 6.4-1 presenta las captaciones visitadas y el tipo de uso asociado a cada una de ellas.

CUADRO 6.4-1
CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS

Localidad	Propietario	Coordenadas WGS84 19S			Uso
		UTM N (m)	UTM E (m)	Cota (m s.n.m)	
Calama		7.515.744	505.414	2.233	MI
Calama		7.514.674	504.040	2.217	MI
Calama		7.514.217	503.461	2.212	MI
Salar de Llamara	Soquimic	7.663.255	439.716		MI
Salar de Llamara	Soquimic	7.658.732	434.360		MI
Salar de Llamara	Soquimic	7.658.538	432.992		MI
Salar de Llamara	Soquimic	7.657.615	433.675		MI
Salar de Llamara	Soquimic	7.659.619	433.626		MI
Salar de Llamara	Soquimic	7.659.948	731.578		MI
Salar de Llamara	Soquimic	7.661.604	433.393		MI
María Elena		7.515.833	447.029		SU
María Elena		7.517.273	443.274		SU
María Elena		7.517.362	443.305		SU
María Elena		7.518.724	442.260		SU
María Elena		7.519.853	442.933		SU
María Elena		7.520.706	440.691		SU
Calama		7.510.346	507.085		SU
Calama	Codelco	7.520.981	507.791		SU
Llallqui	Minera Cerro Domador	7.512.255	530.111	2.482	SU
Llallqui	Minera Cerro Domador	7.525.146	543.456	2.556	SU
Llallqui	Minera Cerro Domador	7.522.676	535.046	2.510	MI
Llallqui	Minera Cerro Domador	7.515.743	537.454	2.516	SU

CUADRO 6.4-1
CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS

Localidad	Propietario	Coordenadas WGS84 19S			Uso
		UTM N (m)	UTM E (m)	Cota (m s.n.m)	
Llalqui	Minera Cerro Domador	7.513.825	535.199	2.498	SU
Llalqui	Minera Cerro Domador	7.514.998	532.456	2.492	SU
Llalqui	Minera Cerro Domador	7.518.741	537.393	2.514	SU
Llalqui	Minera Cerro Domador	7.520.477	539.480	2.528	SU
Llalqui	Minera Cerro Domador	7.522.718	542.030	2.540	SU
Llalqui	Minera Cerro Domador	7.517.918	544.878	2.562	SU
Ojos de San Pedro	Codelco	7.568.789	569.510	3.804	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.568.316	571.362	3.807	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.568.393	573.926	3.818	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.571.342	575.004	3.831	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.571.334	574.978	3.829	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.571.641	574.648	3.841	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.569.874	574.493	3.819	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.569.307	571.397	3.798	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.568.618	571.963	3.843	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.570.075	565.346	3.788	MI
Ojos de San Pedro	Codelco	7.563.697	589.202	3.893	MI
Calama	Xstrata	7.511.882	504.697	2.217	MI

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: El uso de estas captaciones se clasificó en Minero (MI) y Sin Uso (SU) de acuerdo a lo observado en terreno.

6.5. Resultados de la Actividad en Terreno

Durante la actividad en terreno se estimó la superficie cultivada para cada sector visitado de acuerdo a lo consultado a las personas encuestadas y/o en base a lo observado. Se presenta en el Cuadro 6.5-1 un resumen comparativo entre la superficie registrada para la comuna de Calama en el Censo Agropecuario del año 2007, frente a la estimada en la actividad en terreno.

La información completa y detallada de la actividad de levantamiento de demandas y consumos se puede consultar en el Anexo 6-2.

**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.

6.6. Conclusiones y Comentarios de la Actividad en Terreno

Durante la actividad de levantamiento de demandas y consumos se entrevistó a los regantes de los canales de riego de la cuenca del río Loa. Las encuestas realizadas se presentan en el Anexo 6-3, mientras que en el Anexo 6-4 se pueden revisar fotografías de canales visitados y tipos de cultivos.

De acuerdo a lo recabado y a lo observado durante la actividad, se destaca:

- Se logró identificar las superficies potenciales de cultivos y las superficies cultivadas actualmente, antecedente importante para definir la demanda de agua en el modelo.
- Se recabó información respecto al revestimiento de los canales, que permitirán modelar de mejor forma las posibles pérdidas de caudal a lo largo de estas obras de riego. En este sentido, se observó una importante inversión en revestimiento de canales principales e intraprediales.
- Se obtuvo información referente a los tipos de cultivos predominantes en cada superficie de riego cubierta por los canales catastrados. Además se entrevistó acerca de la forma de riego, lo que permitirá estimar el uso y eficiencia del recurso hídrico en la cuenca.
- Se verificó un importante abandono del suelo para actividades agrícolas, lo cual se debería principalmente por ventas de derechos de agua a otras actividades.
- Existió una muy buena predisposición por parte de las personas encuestadas, transmitiendo confianza en la información recibida.

7. MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE GLOBAL

El presente capítulo tiene como finalidad presentar la definición del modelo conceptual, la que considerará los distintos elementos componentes del sistema completo de la cuenca del río Loa y las interacciones de dichos elementos. Dentro de los principales elementos se encuentran las entradas y salidas del sistema, las cuales serán empleadas posteriormente para la estimación de un balance global previo que refleje la situación actual de la cuenca del Loa con magnitudes obtenidas a partir tanto de estudios anteriores como de los cálculos generados en el presente estudio.

A saber, para el análisis a nivel macro de la cuenca del Loa se contempla la subdivisión de ésta en tres sectores: Loa Alto, Loa Medio y Loa Bajo, donde el primero incorpora la subcuenca aportante correspondiente al río Loa hasta antes de la confluencia con el río Salado. El segundo sector, Loa Medio, abarca las subcuencas aportantes ubicadas desde el río Loa aguas abajo de la junta con el río Salado hasta antes de la confluencia con la quebrada Amarga, además de la cuenca del Salar de Llamara hasta antes de la junta de quebrada Amarga con el río Loa. Por último el sector Loa Bajo incorpora la subcuenca aportante localizada entre quebrada Amarga y la desembocadura del río Loa.

En la Figura 7.0-1, se presenta la sectorización antes señalada en el contexto de la cuenca del río Salado.

A continuación, en el siguiente acápite se describen a grandes rasgos los principales elementos que contempla el modelo conceptual bajo la óptica de cada uno de los tres sectores considerados.

7.1. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Loa

7.1.1. Entradas del Sistema

La entrada considerada al sistema de la cuenca del río Loa corresponde a la Precipitación, a través de la cual se genera la Recarga al acuífero y la Escorrentía Total. A continuación se analizan cada uno de estas componentes.

7.1.1.1. Precipitación

Para la caracterización de la componente asociada a la precipitación, se utilizó el gráfico de la Figura 3.3-8 que muestra la variación de las lluvias registradas en cada una de las estaciones con información pluviométrica de la cuenca del río Loa. Por su parte, las estaciones utilizadas en la elaboración del gráfico anterior, son las mismas que se muestran en el Cuadro 3.3-2 pertenecientes al Capítulo 3, el cual hace referencia a la Caracterización Hidrológica de toda la cuenca del Loa.

Tomando en consideración el gráfico de la Figura 3.3-8, el gradiente de precipitaciones representativo para la cuenca del Loa se obtuvo mediante un ajuste del tipo lineal y en él se puede apreciar que para cotas menores a 2.200 m no se registran precipitaciones bajo dicha cota en esta cuenca. Por consiguiente, para la estimación de la precipitación neta promedio, es decir por unidad de volumen y tiempo, fue necesario descontar las áreas correspondientes a cada una de las subcuencas asociadas principalmente a los sectores Loa Alto y Medio que se ubicaban bajo la cota 2.200. Por el contrario, la única subcuenca asociada al sector Loa Bajo posee una cota media que se encuentra muy por debajo del límite de los 2.200 m, por lo que su aporte en términos de precipitación sería

prácticamente nulo. La Figura 7.1-1, presenta las áreas activas individualizadas por sector, donde eventualmente podrían generarse precipitación en la cuenca del río Loa sobre la cota 2.200 m.

Considerando lo anteriormente señalado, se calculó un valor preliminar del aporte por precipitación neta que se generaría en cada una de las subcuencas componentes de los sectores Loa Alto, Medio y Bajo utilizando el gradiente de precipitaciones antes calculado, para luego adicionar dichos montos de lluvias a los respectivos sectores. En el siguiente Cuadro se presenta un resumen de la precipitación neta generada por sector de la cuenca del río Loa.

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

Sector	Precipitación Neta (m³/s)
Loa Alto	22,63
Loa Medio	9,49
Loa Bajo	0
TOTAL	32,12

Fuente: Elaboración propia.

Del Cuadro anterior, se observa que casi el 80% de la precipitación que cae en la cuenca del Loa se produce en la parte alta de ésta y en menor medida en su parte media. Muy por el contrario en el sector Loa Bajo, el aporte de la precipitación sería prácticamente nulo. Al comparar estos valores con un análisis similar realizado el año 2003 por la DGA¹ (Cuadro 7.1-2), se aprecia que la precipitación neta calculada por KP es menor al 50% de aquel cálculo. Se considera que el valor estimado en 2003 se encuentra sobreestimado, considerándose la aridez de la cuenca y el hecho de que el cálculo actualizado considera al menos 10 años más de información.

**CUADRO 7.1-2
COMPARACIÓN PRECIPITACIÓN NETA**

Sector	Precipitación Neta (m³/s)	
	DGA 2003	KP 2014
Loa Alto	41,00	22,63
Loa Medio	28,00	9,49
Loa Bajo	0,00	0,00
TOTAL	69,00	32,12

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar además que para efectos de la modelación en MAGIC, se distribuirán los valores de precipitación en cada uno de los nodos asociados a las subcuencas aportantes laterales o de cabeceras consideradas posteriormente para el modelo. Análogamente, para el caso de las zonas de cultivos definidas para la modelación se escogerán aquellas estaciones pluviométricas más cercanas, cuya precipitación será la más representativa.

¹ Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui Cuenca del Río Loa. DGA. 2003

7.1.1.2. Recarga y Escorrentía Total

La estimación de estas dos variables de entrada se tratarán simultáneamente en esta subsección, ya que están íntimamente relacionadas y sus estimaciones se realizaron a partir del método SCS o de la Curva Número, el cual permite estimar la parte de la precipitación total (P) que logra transformarse tanto en escorrentía directa (Q) como la parte que logra infiltrarse a través del suelo y llegar finalmente al acuífero (R).

La relación entre escorrentía directa y precipitación depende de la abstracción o capacidad de almacenamiento inicial (I_A) y la capacidad de retención máxima del suelo (S) tal como se expresa en la siguiente expresión:

$$Q = \frac{(P - I_A)^2}{(P - I_A) + S}$$

La abstracción inicial representa las pérdidas de agua en el subsuelo antes que la escorrentía comience. Incluye agua retenida por las características topográficas del suelo, agua interceptada por vegetación, y pérdidas por evaporación e infiltración. Empíricamente, la abstracción inicial se relaciona con la capacidad de retención máxima (S) mediante la siguiente expresión:

$$I_A = 0,2 \cdot S$$

La capacidad de retención máxima (S) depende, por otro lado, de las características del suelo y de las condiciones climáticas de la zona analizada. Los valores de curva número (CN) son asociables a cada tipo de cuenca y de acuerdo a ello, S (en mm) se obtiene desde la siguiente expresión:

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

La infiltración o recarga subterránea se determina, de acuerdo con este método, como la suma de la recarga desde 3 aportes: escorrentía superficial, almacenamiento inicial y retención de almacenamiento. Según las variables y las relaciones antes definidas la infiltración mediante esta metodología se calcula según el siguiente procedimiento:

- Definición de curva número asociada a la cuenca: CN
- Cálculo de capacidad de retención máxima (S, en mm) en función de la curva número (CN) seleccionada

Precipitación total correspondiente a un evento hidrológico (P, en mm, que corresponde en este caso a la precipitación mensual con 50% de probabilidad de excedencia).

- Escorrentía directa (Q, en mm)
- Capacidad de almacenamiento inicial máxima (I_A , en mm)
- Almacenamiento inicial efectivo (I_{Aef} , en mm): $I_{Aef} = \text{Min}(P, I_A)$

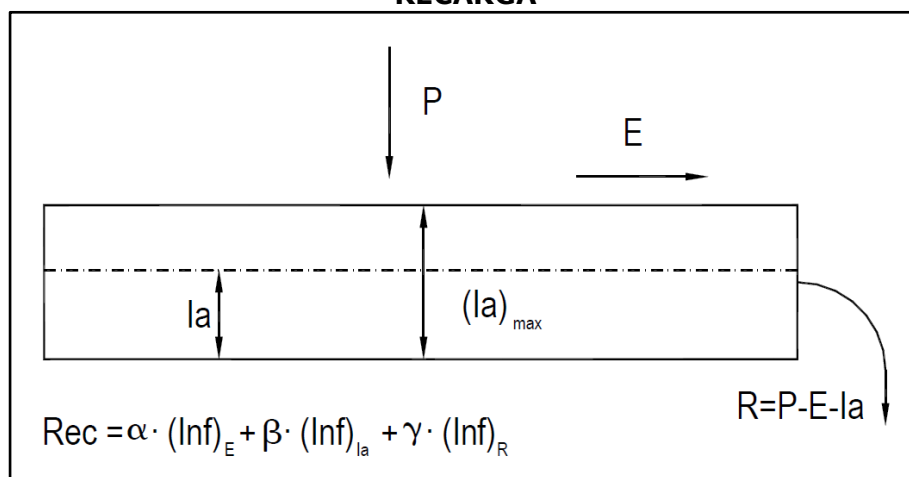
- Retención de almacenamiento (Ret , en mm): $Ret = P - Q - I_{Aef}$
- Infiltración de escorrentía (ϕ_Q , en mm. α es empírico): $\phi_Q = \alpha \cdot Q$
- Infiltración de almacenamiento inicial (ϕ_I , en mm. β es empírico): $\phi_I = \beta \cdot I_{Aef}$
- Infiltración de la retención de almacenamiento (ϕ_{Ret} , en mm. γ es empírico): $\phi_{Ret} = \gamma \cdot Ret$
- Infiltración o recarga total sobre el acuífero (mm): $\phi_{Ret} = \gamma \cdot Ret$

En la Figura 7.1-2 se muestra un esquema con la metodología definida anteriormente.

Aplicando la metodología del SCS expuesta anteriormente en cada una de las respectivas subcuencas conformantes de los sectores Loa Alto, Medio y Bajo, y tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Del raster de la cuenca del Loa (DEM satelital), se pudo establecer que la pendiente media de la cuenca del río Loa es de un 10,6%.

FIGURA 7.1-2
ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA SCS PARA CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA Y RECARGA



Fuente: Elaboración propia.

- Según Benítez et al. (1980), el coeficiente de escorrentía (C_E) representativo de la cuenca del Loa para una pendiente media del orden de un 10% y un tipo de suelo semipermeable, sería de 0,60. Luego, adoptando la siguiente relación empírica que determina el valor del parámetro α :

$$\alpha = 1 - C_E$$

Se obtiene un valor de α igual a 0,4.

- De acuerdo a la bibliografía consultada, los parámetros β y γ , equivalen a un 50% y un 25%, respectivamente, del valor del parámetro α . Por lo tanto, se tiene para β y γ , los valores de 0,2 y 0,1, respectivamente.

- Considerando un valor de curva número de 77 representativo para suelos con tasas moderadas de infiltración (Grupo B) y características climáticas áridas o semiáridas y condición antecedente de humedad normal, es necesario transformar dicha condición de antecedente de humedad normal a una seca dado el área de estudio. Para ello, se utilizó la siguiente expresión algebraica:

$$CN(I) = \frac{4,2 \cdot CN(II)}{10 - 0,058 \cdot CN(II)}$$

En donde,

$CN(I)$: Curva número para condición antecedente de humedad seca.

$CN(II)$: Curva número para condición antecedente de humedad normal.

Como resultado de la fórmula anterior, se llega a un valor de curva número representativo para una condición antecedente de humedad seca de 58,4.

- Dado que se pretende estimar la componente de recarga subterránea en la cuenca del Loa, el término asociado a la infiltración por escorrentía superficial del método de la SCS, corresponde exclusivamente a un proceso interno de interacción entre el río y el acuífero. Por lo tanto visto desde un punto de vista más macro, para la estimación de los caudales de entrada del sistema, el término de infiltración por escorrentía no contribuye al balance y por consiguiente no se considerará como una componente que aporte a la recarga subterránea. No obstante, los términos de infiltración por almacenamiento inicial y la retención de almacenamiento si serán considerados para la determinación de la componente de recarga subterránea.

Con todo lo anterior, se obtuvieron los siguientes valores de recarga subterránea por precipitación y de escorrentía directa:

CUADRO 7.1-3
APORTE RECARGA SUBTERRÁNEA POR PRECIPITACIÓN EN CUENCA DEL RÍO LOA

Sector	Recarga Subterránea por Pp (m³/s)
Loa Alto	1,48
Loa Medio	0,85
Loa Bajo	0
TOTAL	2,33

Fuente: Elaboración propia.

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

Sector	Escorrentía Directa (m³/s)
Loa Alto	3,02
Loa Medio	0,16
Loa Bajo	0
TOTAL	3,18

Fuente: Elaboración propia.

Por último, la escorrentía total cuya magnitud corresponde a la suma total entre la recarga subterránea y la escorrentía directa, se muestra de manera resumida en el Cuadro 7.1-5 por sectores.

**CUADRO 7.1-5
APORTE ESCORRENTÍA TOTAL EN CUENCA DEL RÍO LOA**

Sector	Escorrentía Total (m³/s)
Loa Alto	4,50
Loa Medio	1,01
Loa Bajo	0
TOTAL	5,51

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto la oferta hídrica para la cuenca del río Loa es de 5,51 m³/s, valor que da cuenta de la situación actual de disponibilidad de los recursos hídricos en la zona de estudio.

Al comparar los valores de escorrentía total con aquellas calculadas en estudios anteriores (Cuadro 7.1-6), se aprecia que la estimación para los sectores Loa Medio y Loa Bajo es similar, debido principalmente a que estas dos zonas poseen un nivel bajo de precipitación anual. En cuanto al sector Loa Alto, se aprecia que el cálculo actual se encuentra entre las dos estimaciones anteriores y cuyas diferencias radican principalmente en la metodología de cálculo de la precipitación.

**CUADRO 7.1-6
APORTE ESCORRENTÍA DIRECTA EN CUENCA DEL RÍO LOA**

Sector	Escorrentía Total (m³/s)		
	DGA 2003	ARRAU 2012²	KP 2014
Loa Alto	5,31	3,69	4,50
Loa Medio	1,11	1,11	1,01
Loa Bajo	0,00	0,00	0,00
TOTAL	6,42	4,80	5,51

Fuente: Elaboración propia.

² Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos Región de Antofagasta. Arrau Ingeniería E.I.R.L. 2012

En lo que respecta a la modelación en MAGIC, en el caso de las recargas, éstas serán calculadas internamente por el programa a través del módulo "Acuífero" ocupando las ecuaciones de continuidad y la ley de Darcy simultáneamente. Por otro lado, en cuanto a la componente de la escorrentía, ésta será asignada en cada uno de los respectivos nodos iniciales de la red topológica del modelo MAGIC asociados a las subcuencas aportantes laterales o de cabeceras.

7.1.2. Salidas del Sistema

Las salidas consideradas para el sistema de la cuenca del río Loa, son las siguientes:

- Demandas Superficiales
- Demandas Subterráneas
- Evaporación Embalse Conchi
- Evaporación desde Cauces Superficiales
- Río Loa en Desembocadura

7.1.2.1. Demandas Superficiales

Esta componente considerada como de salida del sistema, comprende tanto las diversas captaciones de aguas superficiales puntuales así como también las distintas zonas de cultivo que utilizan las aguas captadas para riego.

Según la información de derechos analizada en el Capítulo 5 "Sistematización de la Información de Derechos", se tiene que para la cuenca del río Loa existe un total derechos superficiales otorgados de carácter permanente y continuo cercano a los 5,72 m³/s, información que se desagrega en el Cuadro 7.1-7.

**CUADRO 7.1-7
DERECHOS SUPERFICIALES TOTALES OTORGADOS EN LA 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.

Sin embargo, como se desconocen los factores de usos asociados a los derechos constituidos que se entregan en el Cuadro 7.1-5, para la obtención de la demanda efectiva de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Loa, se empleó directamente el valor total de 5,72 m³/s presentado en dicho Cuadro.

En lo referente a la implementación del modelo integrado en MAGIC, todas las demandas superficiales que han sido identificadas serán incorporadas en este programa. En particular, aquellas que guardan relación con el uso agrícola, éstas serán representadas a través de las zonas de riego definidas y se distribuirán hacia los respectivos nodos más cercanos. En el caso de las captaciones superficiales existentes dentro de la cuenca, éstas serán representadas por medio de nodos respectivos de extracción.

7.1.2.2. Demandas Subterráneas

Tal como se mencionó en Capítulo 5: "Sistematización de la Información de Derechos", las captaciones subterráneas se encuentran mayoritariamente en manos de privados, cuyos usos se concentran principalmente para fines industriales, mineros y sanitarios. De acuerdo a la información suministrada por la DGA, existirían un total de 3,79 m³/s de derechos subterráneos otorgados de manera permanente y continua en toda la cuenca del río Loa. La información anterior se resume en el Cuadro 7.1-8, donde se presentan las extracciones totales de agua subterránea para los distintos usuarios de la cuenca del Loa.

No obstante, al igual que en el caso de la demandas superficiales, dado el desconocimiento de los factores de uso correspondientes a los derechos subterráneos estimados en el Cuadro 7.1-6, para la determinación de la demanda de recursos hídricos subterráneos en la cuenca del río Loa, se empleó el valor total de 3,79 m³/s informado en dicho Cuadro.

**CUADRO 7.1-8
CAUDAL TOTAL DE DERECHOS OTORGADOS DE EXTRACCIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN CUENCA DEL RÍO LOA**

Usuario	Caudal Otorgado (m³/s)
Particulares	0,002
Empresas Sanitarias	0,36
Empresas No Mineras	0,36
CODELCO	2,17
Otras Mineras	0,90
TOTAL	3,79

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

Con la información anterior, se determinará la totalidad de los pozos de bombeo que serán incorporados al modelo MAGIC, los cuales reproducirán la condición de explotación de los recursos hídricos subterráneos en los respectivos sectores acuíferos que se definieron en el Capítulo 4 "Caracterización Hidrogeológica". Éstas captaciones subterráneas serán representadas a través de nodos específicos.

7.1.2.3. Evaporación Embalse Conchi

En lo relativo a la componente evaporativa, se consideró su relevancia solamente para el caso del embalse Conchi ya que el volumen de agua almacenado en su cubeta es potencialmente susceptible de sufrir pérdidas por esta componente debido a la importancia de la superficie de espejo de agua que se produce.

Por otra parte, el método SCS o Curva Número que se usó para determinar tanto las componentes de recarga subterránea como de escorrentía directa, incorpora en su metodología el descuento de aquella fracción de la precipitación total que no generará escorrentía ni percolará a través del suelo. Esta fracción de la lluvia total se le denomina con el nombre de abstracciones y engloba tanto el almacenamiento inicial como la retención por almacenamiento del suelo que recibe la precipitación. Consecuentemente, estas abstracciones terminarán por perderse a través de los procesos de evaporación y/o evapotranspiración. Por consiguiente, dado todo lo anterior, no fue necesario estimar la tasa evaporativa para toda la cuenca en estudio.

De acuerdo a la estadística de evaporación total mensual de bandeja registrada en la estación meteorológica Conchi Embalse, se tiene un valor promedio anual de 3.564 mm/año. Aplicando al valor anterior un factor de proporcionalidad de 0,7, se determinó un valor promedio anual de evaporación total igual a 2.495 mm/año. En el Cuadro 7.1-9, se presentan los registros de evaporación de bandeja de dicha estación a nivel mensual abarcando un período que va desde los años 1976 a 2013.

**CUADRO 7.1-9
ESTADÍSTICA EVAPORACIÓN TOTAL MENSUAL Y PROMEDIO ANUAL DE
BANDEJA REGISTRADA EN ESTACIÓN CONCHI EMBALSE (mm)**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
1976	302	318	307	272	235	181	232	265	299	320	367	387	3.486
1977	362	280	318	294	253	208	169	165	229	380	396	390	3.446
1978	361	330	332	283	246	225	163	224	260	329	391	396	3.541
1979	291	355	268	287	235	218	222	261	320	349	381	387	3.573
1980	393	350	311	268	262	259	271	288	376	404	397	397	3.976
1981	345	295	299	285	164	191	209	245	306	376	404	396	3.514
1982	377	339	328	291	223	236	224	254	330	353	377	387	3.717
1983	384	341	303	278	263	299	297	254	341	337	366	370	3.832
1984	267	285	255	267	236	218	248	283	296	293	331	365	3.343
1985	327			244	235	199	201	236	304	347	348	351	-
1986	326	300	270	269	209	210	200	130	232	325	343	330	3.143
1987	296	327	287	295	290	215	219	263	318	341	393	403	3.648
1988	358	334	290	261	262	217	207	272	355	343	391	355	3.643
1989	370	287	267	274	263	185	228	259	289				-
1990	348	330	315	301	249	229	204	268	309	345	385	338	3.623
1991	338	350	287	275	243	253	251						-
1992	350	371	337	297	254	244	214	227	266	337	375	371	3.645
1993	306	346	292	284	251	228	242	263	316	361	373	375	3.636
1994	344	318	301	268	252	228	256	252	311	344	383	346	3.604
1995	348	351	303	278	240	218	249	284	332	363	376	390	3.732
1996	353	344	300	285	249	219	217			73		38	-
1997	196	200	154	268	284	232	268	291	285	383	379	400	3.338
1998	341	351	336	296	239	237	223	268	304	351	334	356	3.636
1999	332	260	226	277	228	209	233	246	295	350	366	359	3.379
2000	269	307	263	239	231	202	217	256	316	343	365	354	3.362
2001	289	246	208	287	253	216	181	237		339	379	392	-
2002	364	306	273	228	237	202	204		280	335	347	356	-
2003	374	338				193	217	244	319		382	388	-
2004	388	308	286	261	259	211	207	280	310	356	384	390	3.639
2005	298	328	321	327	254	219	242	252	329	311	334	377	3.591

CUADRO 7.1-9
ESTADÍSTICA EVAPORACIÓN TOTAL MENSUAL Y PROMEDIO ANUAL DE
BANDEJA REGISTRADA EN ESTACIÓN CONCHI EMBALSE (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
2006	309	309	289	265	220	204	246	266	300	330	375	386	3.498
2007	361	344	304	276	236	231	208	275	319	372			-
2008	294					222	171		295	323	384	368	-
2009	332	306	276	297	238	203	233	257	329	343	375	382	3.569
2010	364	321	337	319		235	229	229	320	354	342	340	-
2011	317	237	303	263		219	220	267	308	359	350	320	-
2012	314	221	269		245	204							-
2013	387	321	330										-
Promedio Anual Bandeja (mm/año)													3.564

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

A partir de las curvas características del embalse Conchi, es decir las curvas de superficie inundada/volumen en función de la cota de la laguna que se genera por acumulación, y mediante correlación simple entre el volumen y la superficie del espejo de agua, se determinó una relación funcional entre ambas variables. Posteriormente empleando la relación funcional anterior, se estimaron las superficies inundadas históricas a partir de la estadística de volúmenes embalsados de la DGA, cuyo registro incluye el período 2000-2001 y 2004-2013.

Con lo anterior, se obtuvo un valor promedio de superficie inundada para el embalse Conchi de 1.111.952 m².

Posteriormente, se llevó el valor promedio anual de evaporación de mm/año a m³/s incorporando el valor promedio de la superficie del espejo de agua estimada anteriormente, dando como resultado final, la pérdida de agua desde el embalse Conchi producto del proceso evaporativo. Este resultado, se muestra en el Cuadro 7.1-10.

CUADRO 7.1-10
PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN EN EMBALSE CONCHI

Embalse	Evaporación (m³/s)
Conchi	0,09

Fuente: Elaboración propia.

La modelación de la componente evaporativa en el modelo MAGIC, se realizará considerando un nodo específico que simulará la operación del embalse Conchi y que como resultado, tras aplicar un balance de caudales interno mediante ecuaciones de continuidad llevadas a cabo en el mismo nodo, entregará el caudal de evaporación desde el embalse.

7.1.2.4. Evaporación desde Cauces Superficiales

De igual forma como se define en el estudio Balance Hidrológico Nacional II Región (DGA, 1986), la evaporación desde los cauces se considera de mayor importancia para los

sectores del Loa Medio y Bajo, la cual se subdividió en tres tramos como se presenta a continuación:

- Tramo 1: comprende el cauce del río San Salvador en su totalidad junto al río Loa entre las estaciones fluviométricas Río Loa en Yalquincha hasta Río Loa después de junta con Río San Salvador.
- Tramo 2: comprende el tramo entre las estaciones fluviométricas Río Loa después de junta con Río San Salvador hasta Río Loa antes de Zona Agrícola de Quillagua.
- Tramo 3: corresponde al tramo entre las estaciones fluviométricas Río Loa antes de Zona Agrícola en Quillagua hasta Río Loa en Desembocadura.

La ecuación utilizada en el cálculo de la evaporación para cada tramo se presenta a continuación.

$$Ev = \frac{1}{86,4} * a * k_r * (k_e * x)$$

Donde:

Ev: Evaporación desde el cauce en el tramo analizado (l/s/Km).

x: Evaporación medida en tanque (mm/día).

k_e : Coeficiente de embalse.

k_r : Coeficiente de reducción.

a: Ancho medio del área que evapora (m).

El valor de la evaporación medida en tanque se obtuvo desde la estación meteorológica Aeródromo El Loa, utilizando un coeficiente de embalse de 0,6. De acuerdo al boletín N°56 de la FAO, el coeficiente de reducción se considera de valor 1 cuando la superficie sobre la que afecta la evaporación se encuentra húmeda, lo cual fue considerado en este caso. Para el ancho del cauce se utilizó un valor de 13 metros para el río Loa y de 7 metros para el río San Salvador. En el cálculo del ancho medio de cada tramo, se ponderó el ancho de cada sector por su largo sobre el total del tramo. El Cuadro 7.1-11 presenta el detalle con las características de cada tramo y el Cuadro 7.1-12 los resultados correspondientes del caudal de evaporación.

**CUADRO 7.1-11
CARACTERÍSTICAS TRAMOS DE EVAPORACIÓN EN CAUCES**

Tramo	Cauce	Largo (m)	Ancho (m)	Ancho Medio por Tramo (m)	Largo Tramo (Km)
T1	Río Loa	66.520	13	10,0	131,3
	Río San Salvador	64.790	7		
T2	Río Loa	74.555	13	13,0	74,6
T3	Río Loa	76.311	13	13,0	76,3

Fuente: Elaboración Propia.

**CUADRO 7.1-12
CAUDAL DE EVAPORACIÓN EN CAUCES 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.

7.1.2.5. Río Loa en Desembocadura

La componente superficial del caudal del río Loa que hace abandono de su cuenca respectiva, se cuantificó empleando lo ya desarrollado en el Capítulo 3 "Caracterización Hidrológica". En particular se estimó el caudal medio anual con los registros de la estación fluviométrica DGA Río Loa en Desembocadura, cuyo valor se presenta en el Cuadro 7.1-13.

**CUADRO 7.1-13
CAUDAL MEDIO ANUAL ESTACIÓN 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.

Para incorporar en el modelo MAGIC el caudal superficial asociado al río Loa que sale de la cuenca, se utilizará un nodo que representará la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura, lo que permitirá posteriormente la calibración de los caudales sintéticos generados en el modelo con los registrados en dicha estación de control fluviométrico.

7.1.3. Interacciones del Sistema

En lo relativo a las componentes que interactúan entre sí y de manera interna dentro del sistema, se consideraron los siguientes:

- Afloramientos
- Recuperaciones

7.1.3.1. Afloramientos y Recuperaciones

Las componentes de afloramientos y recuperaciones fueron cuantificadas en el Capítulo 3 "Caracterización Hidrológica" dentro del acápite 3.6 denominado "Pérdidas y Recuperaciones".

Para el presente análisis, se consideraron sólo los tramos donde se aprecia claramente el efecto mancomunado de los afloramientos subterráneos y de las recuperaciones en los cauces superficiales, ya que si hay un aumento de caudal en un tramo del cauce necesariamente existe una componente de flujo subterráneo que aporta al aumento de caudal en dicho tramo. En el Cuadro 7.1-14 se muestran los tramos de afloramiento/recuperación con sus respectivos valores. Estos valores fueron estimados como un promedio de las diferencias entre los caudales registrados tanto al inicio como al término del tramo, según la estadística de aforos disponible. En el caso de existir captaciones puntuales dentro del tramo de cauce analizado, fue necesario adicionar el o los caudales captados por dichas captaciones puntuales, de manera tal de obtener magnitudes netas en régimen natural.

CUADRO 7.1-14
Aportes Netos por Afloramientos y Recuperaciones

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.

Por otra parte y de acuerdo al reconocimiento en terreno que se llevó a cabo en la cuenca, se sabe que existen también otras zonas de afloramientos que contribuyen con aumentos de caudales en los cauces superficiales, pero que su aporte no puede cuantificarse ya que no hay estaciones fluviométricas cercanas ni se tienen registros de aforos efectuados en dichos puntos. Ejemplo de lo anterior son los afloramientos que se producen en las localidades de Turi, Cupo, Paniri o Caspana, los cuales son fundamentales para la agricultura de cada uno de esos sectores.

Las simulaciones de las componentes de afloramiento y recuperación en MAGIC, se realizarán de manera interna en los respectivos sectores acuíferos como resultado de la aplicación de las propias ecuaciones de balance que modelan un sistema acuífero como si fuese un embalse subterráneo. Esto significa que cuando se tiene un caudal subterráneo de entrada mayor a los caudales de salida del sector, entonces se producirá un afloramiento o vertimiento hacia el nodo respectivo del sistema superficial. Además en las zonas de la cuenca donde se sabe de la existencia de afloramientos, estos serán representados a través de nodos puntuales.

7.2. Balance Global de la Cuenca

La ecuación general de balance para la cuenca del río Loa que se emplea en el presente estudio es la siguiente:

$$\begin{aligned} \textit{Escorrentía Total} \\ = \textit{Evaporación Embalse Conchi} + \textit{Evaporación Cauces Superficiales} \\ + \textit{Demandas Superf.} + \textit{Demandas Subte.} + \textit{Q}_{\textit{Loa Desembocadura}} \end{aligned}$$

Donde, el término "Escorrentía Total" fue calculado en el acápite 7.1.1.2 del presente capítulo y representa la componente de entrada de la cuenca del Loa. Además este término integra las componentes de recarga subterránea por precipitación y la escorrentía directa.

Asimismo, los términos de la ecuación anterior "Demandas Superficiales", "Demandas Subterráneas", "Evaporación Embalse Conchi", "Evaporación Cauces Superficiales" y "Caudal Río Loa en Desembocadura", corresponden a los componentes de salida del sistema y fueron estimados en los acápite 7.1.2.1, 7.1.2.2, 7.1.2.3, 7.1.2.4 y 7.1.2.5, respectivamente.

Es importante mencionar que la ecuación utilizada para el cálculo del presente balance global, no incorporó las interacciones como por ejemplo afloramientos y recuperaciones, ya que son sólo procesos netamente internos del sistema.

A continuación en el Cuadro 7.2-1, se presenta el resultado final del balance entre los términos de oferta y demanda de recursos hídricos. Es importante recalcar que este balance fue realizado utilizando los derechos otorgados y no el uso real de los derechos en la cuenca, los cuales, de acuerdo a lo observado en la visita a terreno, deberían ser menores al valor nominal del derecho.

CUADRO 7.2-1
Aportes Netos por Afloramientos y Recuperaciones

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 resultado presentado en el Cuadro 7.2-1, muestra que la situación actual de los recursos hídricos para la cuenca del río Loa se encontrarían prácticamente comprometidos y daría cuenta de una condición de una fuerte explotación en esta cuenca. Sin embargo, hay que tener presente que dada 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

Por medio del modelo conceptual se analizaron los principales elementos y flujos que componen el sistema de la cuenca del río Loa, identificándose caudales de entrada y salida al modelo y las principales interacciones que ocurren dentro del sistema. Por medio de este primer análisis de la cuenca se comenzaron a definir las principales características del modelo MAGIC y los flujos que posteriormente debieron ser calibrados en busca de la correcta representación de la cuenca del río Loa.

Por lo tanto durante este capítulo, y en base a la información recopilada mediante la generación del modelo conceptual de la cuenca, se desarrollan los principales elementos que componen las tablas con las cuales se construyó la base de datos del modelo MAGIC.

8.1. Cauces Superficiales

Los ríos o cauces superficiales integrados en el modelo involucran la definición de nodos que representan hitos importantes de entrada, salida o medición de caudal, y conectores que unen estos nodos, los cuales absorben las propiedades físicas y geométricas de los cauces.

Los cauces más importantes en la cuenca del río Loa, y que fueron considerados en la modelación superficial, corresponden al Río Loa, Río San Pedro, Río Salado, Río San Salvador y Vertiente Ojos de Opache.

A continuación, se detallan los procesos específicos y los elementos que involucraron la representación de los cauces superficiales de la cuenca en el modelo MAGIC.

8.1.1. Nodos

Los nodos asociados a los cauces superficiales representan los hitos que definen entradas, salidas o mediciones de cauces. En particular, para esta modelación, los nodos se definieron para los siguientes elementos:

- Bocatomas.
- Estaciones fluviométricas.
- Confluencia de cauces.
- Aporte de cuencas de cabecera o laterales.
- Embalse Conchi.
- Descargas puntuales.
- Captaciones puntuales
- Afloramiento desde acuíferos.
- Derrames de riego.

El detalle de los nodos definidos y sus propiedades principales se presentan en el Cuadro 8.1-1, mientras su distribución en la Figura 8.1-1.

CUADRO 8.1-1
NODOS DEFINIDOS EN MODELACIÓN MAGIC

Nodo	Elemento	Coordenadas WGS84 19S		Río
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-001	EF	534.949	7.605.229	Loa
NO-002	CP	535.115	7.603.695	Loa
NO-003	CP	551.545	7.597.550	Loa
NO-004	CP	557.485	7.596.545	Loa
NO-005	CP	558.250	7.595.456	Loa
NO-006	Q - ZR	541.965	7.580.941	Loa
NO-007	AF	541.495	7.578.968	Loa
NO-008	CP	541.455	7.577.335	Loa
NO-009	Q	596.815	7.559.626	San Pedro
NO-010	EF	600.440	7.565.684	San Pedro
NO-011	CP	600.232	7.565.330	San Pedro
NO-012	CP	596.571	7.563.889	San Pedro
NO-013	C	595.081	7.562.215	San Pedro
NO-014	Q	587.339	7.575.618	San Pedro
NO-015	CP	586.697	7.575.396	San Pedro
NO-016	C	581.932	7.567.650	San Pedro
NO-017	AF - ZR	567.037	7.569.313	San Pedro
NO-018	EF	565.242	7.570.373	San Pedro
NO-019	EF	550.347	7.572.730	San Pedro
NO-020	CP	550.047	7.573.027	San Pedro
NO-021	CP	549.593	7.573.344	San Pedro
NO-022	EF	548.285	7.573.604	San Pedro
NO-023	C	540.342	7.570.467	Loa
NO-024	EF	540.243	7.569.856	Loa
NO-025	EF	540.331	7.569.426	Loa
NO-026	EF	540.485	7.568.732	Loa
NO-027	EM	539.203	7.564.272	Loa
NO-028	EF - CP	539.131	7.564.050	Loa
NO-029	Q - RE	540.920	7.544.792	Loa
NO-030	B	539.829	7.540.928	Loa
NO-031	B	539.792	7.540.855	Loa
NO-032	B	539.061	7.539.472	Loa
NO-033	B	539.010	7.539.423	Loa
NO-034	B	538.729	7.538.412	Loa
NO-035	B	538.443	7.537.894	Loa

CUADRO 8.1-1
NODOS DEFINIDOS EN MODELACIÓN MAGIC

Nodo	Elemento	Coordenadas WGS84 19S		Río
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-036	B - ZR	537.142	7.534.779	Loa
NO-037	B	535.890	7.530.855	Loa
NO-038	B	535.801	7.529.721	Loa
NO-039	Q - AF	601.278	7.542.041	Salado
NO-040	CP	601.040	7.541.946	Salado
NO-041	Q - ZR	601.825	7.544.526	Salado
NO-042	C	600.715	7.542.058	Salado
NO-043	CP	600.590	7.541.973	Salado
NO-044	RE	598.089	7.540.366	Salado
NO-045	Q	588.560	7.536.114	Salado
NO-046	EF	588.008	7.536.320	Salado
NO-047	CP	587.944	7.536.403	Salado
NO-048	B	587.915	7.536.435	Salado
NO-049	Q	586.235	7.538.011	Salado
NO-050	Q - AF	601.057	7.540.571	Salado
NO-051	CP	600.872	7.540.530	Salado
NO-052	Q	584.847	7.535.169	Salado
NO-053	CP	584.522	7.535.399	Salado
NO-054	C - ZR	582.640	7.537.191	Salado
NO-055	Q - AF	584.144	7.534.191	Salado
NO-056	RE	583.034	7.534.925	Salado
NO-057	CP	582.416	7.535.247	Salado
NO-058	C	581.046	7.535.985	Salado
NO-059	EF	578.009	7.536.077	Salado
NO-060	Q	585.176	7.526.543	Salado
NO-061	B	583.879	7.527.297	Salado
NO-062	Q	580.084	7.533.334	Salado
NO-063	C - ZR	578.961	7.533.950	Salado
NO-064	C	576.110	7.536.365	Salado
NO-065	B	570.224	7.536.124	Salado
NO-066	EF - AF - ZR	567.487	7.534.983	Salado
NO-067	B	573.918	7.541.524	Salado
NO-068	B	573.915	7.541.516	Salado
NO-069	B	575.579	7.551.110	Salado
NO-070	B	570.995	7.556.199	Salado

CUADRO 8.1-1
NODOS DEFINIDOS EN MODELACIÓN MAGIC

Nodo	Elemento	Coordenadas WGS84 19S		Río
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-071	B	570.930	7.555.861	Salado
NO-072	Q - ZR	545.228	7.529.902	Salado
NO-073	EF	536.670	7.526.151	Salado
NO-074	C - ZR	535.504	7.526.066	Loa
NO-075	AF	528.283	7.517.445	Loa
NO-076	Q	517.523	7.516.635	Loa
NO-077	B	516.349	7.516.661	Loa
NO-078	B	514.778	7.516.112	Loa
NO-079	EF	512.399	7.517.311	Loa
NO-080	EF - ZR	511.256	7.517.865	Loa
NO-081	B	510.154	7.517.946	Loa
NO-082	CP	510.030	7.517.611	Loa
NO-083	B	510.204	7.516.335	Loa
NO-084	B	510.121	7.516.156	Loa
NO-085	B - ZR	507.926	7.514.058	Loa
NO-086	B	507.298	7.513.684	Loa
NO-087	B	506.574	7.513.033	Loa
NO-088	B	504.385	7.511.831	Loa
NO-089	EF - ZR	502.227	7.511.174	Loa
NO-090	EF	500.936	7.510.768	Loa
NO-091	Q	457.190	7.515.325	Loa
NO-092	CP	454.320	7.517.567	Loa
NO-093	Q - AF	503.253	7.517.933	Loa
NO-094	B	503.200	7.517.924	Loa
NO-095	DP	504.276	7.516.828	Loa
NO-096	C - ZR	502.684	7.517.839	Loa
NO-097	EF - AF	499.822	7.513.595	Loa
NO-098	CP	499.773	7.513.601	Loa
NO-099	CH	498.108	7.513.249	Loa
NO-100	DP	496.353	7.513.225	Loa
NO-101	Q - AF	446.081	7.523.055	Loa
NO-102	CP	445.667	7.523.182	Loa
NO-103	C - AF	445.628	7.523.191	Loa
NO-104	EF	445.344	7.523.365	Loa
NO-105	CP	441.757	7.528.313	Loa

CUADRO 8.1-1
NODOS DEFINIDOS EN MODELACIÓN MAGIC

Nodo	Elemento	Coordenadas WGS84 19S		Río
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-106	EF	441.738	7.528.698	Loa
NO-107	Q - AF	448.524	7.595.365	Loa
NO-108	EF	446.354	7.598.565	Loa
NO-109	B	446.345	7.598.591	Loa
NO-110	B	445.334	7.602.523	Loa
NO-111	EF	444.473	7.604.611	Loa
NO-112	EF - ZR	444.430	7.605.359	Loa
NO-113	AF	435.583	7.617.312	Loa
NO-114	Q	420.943	7.630.700	Loa
NO-115	Q - AF	421.031	7.631.322	Loa
NO-116	CP	420.955	7.631.135	Loa
NO-117	C	420.749	7.631.106	Loa
NO-118	Q - AF	392.936	7.629.993	Loa
NO-119	EF	390.619	7.630.039	Loa

Fuente: Elaboración Propia

Nota: Nomenclatura utilizada: AF - Afloramiento; B - Bocatoma; CP - Captación Puntual; DP - Descarga Puntual; EF - Estación Fluviométrica; Q - Aporte Subcuenca; ZR - Derrame Zona de Riego.

8.1.2. Tramos de Río

Los tramos de río se definieron como conectores entre nodos. MAGIC les asocia propiedades físicas tales como ancho, largo, espesor y permeabilidad del lecho, coeficiente de Manning y pendiente. Tanto el espesor del lecho como su permeabilidad fueron utilizados para ajustar el modelo en función de los caudales de filtración.

En el Cuadro 8.1-2 se presenta un resumen de los parámetros de los tramos de río definidos. Los valores completos se aprecian en la base de datos que se adjunta digitalmente.

**CUADRO 8.1-2
PARÁMETROS TRAMOS DE RÍO MAGIC**

Nombre	Nodo Inicio	Nodo Final	Acuífero	Dimensiones		Parámetros Lecho		Coef. Manning	Pendiente Media
				Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	K (m/s)		
Río Loa	NO-001	NO-119	AC-01, AC-04, AC-05, AC-08	341.979	16	28	6×10^{-5}	0,04	0,02
Ojos San Pedro	NO-009	NO-013	AC-02	3.115	4	10	6×10^{-5}	0,04	0,03
Río San Pedro	NO-010	NO-023	AC-01, AC-02	65.150	4	10	1×10^{-4}	0,04	0,03
Quebrada Colana	NO-014	NO-016	AC-02	9.774	4	10	6×10^{-5}	0,04	0,08
Río Toconce	NO-039	NO-058	AC-03	30.632	8	4	6×10^{-5}	0,04	0,05
Río Hojalar	NO-050	NO-054	AC-03	20.084	10	3	4×10^{-5}	0,04	0,05
Río Salado	NO-055	NO-074	AC-03	87.770	12	9	6×10^{-5}	0,04	0,02
Río Caspana	NO-060	NO-064	AC-03	13.510	10	3	6×10^{-5}	0,04	0,04
Río Curti	NO-062	NO-063	AC-03	1.280	10	3	6×10^{-5}	0,04	0,01
Quebrada Turi Paniri	NO-067	NO-072	AC-03	30.957	7	17	6×10^{-5}	0,04	0,03
Quebrada de Cupo	NO-070	NO-072	AC-03	36.875	8	8	6×10^{-5}	0,04	0,04
Río San Salvador	NO-093	NO-103	AC-05, AC-08	70.234	8	10	7×10^{-5}	0,04	0,05

Fuente: Elaboración Propia

8.1.3. Caudal de Evaporación desde Cauces

De acuerdo al cálculo realizado en el punto 7.1.2.4, existen tres tramos de mayor importancia para la integración de la evaporación desde los cauces superficiales. Los tramos en cuestión corresponden a:

- Tramo 1: comprende el cauce del río San Salvador en su totalidad junto al río Loa entre las estaciones fluviométricas Río Loa en Yalquincha hasta Río Loa después de junta con Río San Salvador.
- Tramo 2: comprende el tramo entre las estaciones fluviométricas Río Loa después de junta con Río San Salvador hasta Río Loa antes de Zona Agrícola de Quillagua.
- Tramo 3: corresponde al tramo entre las estaciones fluviométricas Río Loa antes de Zona Agrícola en Quillagua hasta Río Loa en Desembocadura.

Los tramos descritos se representan por medio del modelo MAGIC a través de los nodos que se muestran en el Cuadro 8.1-3.

**CUADRO 8.1-3
REPRESENTACIÓN TRAMOS CAUDAL ECOLÓGICO**

Tramo	Nodo Inicio	Nodo Fin	Largo (m)	Ancho (m)	Ancho Medio por Tramo (m)	Largo Tramo (Km)
T1	NO-090	NO-091	45.695	13	10,0	131,3
	NO-091	NO-092	3.642	13		
	NO-092	NO-103	10.353	13		
	NO-094	NO-096	523	7		
	NO-096	NO-100	7.834	7		
	NO-100	NO-101	55.960	7		
	NO-101	NO-102	433	7		
	NO-102	NO-103	40	7		
	NO-103	NO-104	333	13		
	NO-104	NO-105	6.111	13		
	NO-105	NO-106	386	13		
T2	NO-106	NO-107	70.688	13	13,0	74,6
	NO-107	NO-108	3.867	13		
T3	NO-108	NO-109	28	13	13,0	76,3
	NO-109	NO-110	4.060	13		
	NO-110	NO-111	2.259	13		
	NO-111	NO-112	749	13		
	NO-112	NO-113	14.871	13		
	NO-113	NO-114	21.307	13		
	NO-114	NO-117	450	13		
	NO-117	NO-118	30.270	13		
NO-118	NO-119	2.317	13			

Fuente: Elaboración Propia.

La construcción del modelo en MAGIC no permite ingresar pérdidas del sistema a lo largo de una conducción de caudal, por lo tanto se decide representar la evaporación por medio

de captaciones puntuales. Si bien esta variable debiera afectar los resultados de cada uno de los nodos involucrados, a efectos de la modelación se decide generar 1 captación puntual en el último nodo de cada tramo. La demanda asociada corresponde a lo calculado y presentado por medio de la Tabla 7.1-12.

8.1.4. Distribución de las Aguas entre Nodos

MAGIC ofrece 2 opciones para distribuir las aguas que recibe un nodo a los elementos que demandan caudal, las cuales son por un factor de distribución sobre los caudales de entrada o mediante caudales de entrega impuestos desde los elementos demandantes.

Para el caso de esta modelación se utilizaron caudales impuestos a cada nodo que presentara una demanda de agua en la cuenca del río Loa, dentro de esta categoría se consideran las captaciones puntuales y canales de regadío. La demanda hídrica por parte de los canales corresponde a la necesidad de regadío para las zonas de riego a las cuales distribuyen, mientras que con las captaciones puntuales se buscó cumplir con sus caudales de derecho. En ambos casos, la entrega de caudal por parte del modelo considera como restricción la capacidad de conducción de cada elemento.

8.1.5. Estaciones Fluviométricas de Calibración

En la red hídrica modelada se incluyeron 24 estaciones fluviométricas de propiedad de la DGA. Una de ellas se utilizó como nodo de entrada al modelo, mientras que 8 se utilizaron para el proceso de calibración y ajuste del modelo. La razón de no utilizar las estaciones restantes corresponde al bajo periodo de información o bien a la desconfianza sobre la calidad de la información luego de visitarlas en la actividad en terreno de reconocimiento del sector.

Las estaciones fluviométricas incluidas en la red hídrica del modelo se presentan en el Cuadro 8.1-4 con su nodo representativo en el modelo MAGIC, mientras que su distribución espacial se observa en la Figura 8.1-2.

CUADRO 8.1-4
ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS CONSIDERADAS

Nodo	Nombre	Coordenadas WGS84 19S		Observación
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-001	Río Loa antes Represa Lequena	534.949	7.605.229	Cabecera
NO-010	Río Siloli antes B.T Fcab	600.440	7.565.684	No Utilizada
NO-018	Río San Pedro en Parshall N°1	565.242	7.570.373	No Utilizada
NO-019	Río San Pedro en Parshall N°2 (Codelco)	550.347	7.572.730	No Utilizada
NO-022	Río San Pedro en Camino Internacional	548.285	7.573.604	No Utilizada
NO-024	Río Loa en Vado Santa Barbara	540.243	7.569.856	Calibración
NO-025	Río Loa en Alcantarilla Conchi N2	540.331	7.569.426	No Utilizada
NO-026	Río Loa en Conchi	540.485	7.568.732	No Utilizada
NO-028	Río Loa en Salida Embalse Conchi	539.131	7.564.050	Calibración
NO-046	Río Toconce antes Represa SENDOS	588.008	7.536.320	Calibración
NO-059	Río Salado antes junta Curti	578.009	7.536.077	No Utilizada
NO-066	Río Salado en Sifón Ayquina	567.487	7.534.983	Calibración
NO-073	Río Salado antes junta Loa	536.670	7.526.151	No Utilizada
NO-079	Río Loa en Yalquincha	512.399	7.517.311	Calibración
NO-080	Río Loa en Escorial	511.256	7.517.865	Calibración
NO-089	Río Loa en Chintoraste	502.227	7.511.174	No Utilizada
NO-090	Río Loa en Finca	500.936	7.510.768	Calibración
NO-097	Vertiente Ojos de Opache	499.822	7.513.595	No Utilizada
NO-104	Río Loa d. j. San Salvador (Chacance)	445.344	7.523.365	No Utilizada
NO-106	Río Loa d. j. San Salvador (M. Elena)	441.738	7.528.698	No Utilizada
NO-108	Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua	446.354	7.598.565	Calibración
NO-111	Canal Quillagua en Quillagua	444.473	7.604.611	No Utilizada
NO-112	Río Loa en Quillagua	444.430	7.605.359	No Utilizada
NO-119	Río Loa en Desembocadura	390.619	7.630.039	Calibración

Fuente: Elaboración Propia

8.2. Aportes desde Cuencas No Controladas

MAGIC dispone de 2 tablas dentro de su base de datos para incorporar los caudales de entrada al modelo producto del aporte de las subcuencas involucradas a los cauces superficiales. Estos caudales fueron determinados mediante los modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía, cuya metodología de cálculo se presenta en el Capítulo 7. Además, se asignó como caudales de entrada la serie rellenada de la estación Río Loa antes Represa Lequena en el nodo asociado a esta estación.

Por otro lado, MAGIC diferencia conceptualmente estos aportes en Aportes Naturales y Cuencas 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). Desde el punto de vista de los cálculos dentro del modelo, esta diferenciación no implica mayor relevancia. La definición de las subcuencas 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 luego del cálculo de los primeros.

Por lo tanto, considerando todo lo anterior, el Cuadro 8.2-1 resume la definición de Aportes Naturales y Cuencas Laterales en la cuenca. La Figura 8.2-1, en tanto, muestra gráficamente los nodos que reciben estos aportes en el modelo.

**CUADRO 8.2-1
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 Cabor 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
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

8.3. Acuíferos

Debido a la falta de información oficial respecto a la distribución del sistema de acuíferos que presenta la cuenca del río Loa, éstos debieron ser representados y definidos por el consultor. La distribución espacial, propiedades intrínsecas y características geométricas de los acuíferos presentados, se generó a partir de un conjunto de información, entre estudios, modelos numéricos y necesidades del modelo para su correcto funcionamiento. Mayor información acerca de su representación se detalla en las secciones siguientes. En el Cuadro 8.3-1 se muestra la codificación dada a los acuíferos, mientras que la Figura 8.3-1 muestra su ubicación espacial.

**CUADRO 8.3-1
ACUÍFEROS MODELADOS**

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

La definición del acuífero de Calama corresponde al límite del modelo numérico realizado en Modflow, de donde se decidió separar Pampa Llalqui bajo un supuesto de delimitación administrativa. Se estimó que a efectos del orden en la generación y asignación de elementos en la construcción de la base de datos en MAGIC, correspondía realizar una designación independiente para este sector. De cualquier manera, a efectos de la modelación, no existe diferencia entre considerarlos consolidados o separados puesto que se modelaron con una interconexión total entre ellos.

8.3.1. Parámetros Geométricos y Elásticos

Respecto a la geometría y los parámetros elásticos de los acuíferos, MAGIC requiere definir tanto en la sección de entrada como de salida las siguientes variables: ancho, profundidad (cotas superior e inferior), permeabilidad, gradiente hidráulico, y caudal máximo de conducción.

Los parámetros geométricos de los acuíferos, a falta de una definición oficial de éstos, se delimitaron mediante inspección con el programa Google Earth, considerándose una interconexión de todo el sistema subterráneo. Esta definición proporcionó información referente a las cotas de las secciones de entrada y salida, largo y ancho de cada acuífero. Mediante la misma herramienta, asimilando la pendiente superficial en cada caso, se determinaron las pendientes de las secciones de entrada y salida de cada acuífero.

Los parámetros elásticos en tanto, se obtuvieron a partir de lo presentado en el Capítulo 4, respecto a la caracterización hidrogeológica. A partir de los valores anteriores se determinaron los caudales máximos admisibles de entrada y salida, que permitieron a su vez la definición de las profundidades de cada acuífero; además, se determinó el volumen máximo admisible para cada uno de ellos mediante las expresiones siguientes.

$$Vol\ Máximo = L_{EQ} \cdot \left(\frac{Ae + As}{2} \right)$$

$$L_{EQ} = \frac{\Omega_{Sup}}{\left(\frac{We + Ws}{2} \right)}$$

$$Ae = We \cdot H$$

$$As = Ws \cdot H$$

Donde:

- L_{EQ} : Largo equivalente del acuífero.
- Ae y As : Áreas de secciones de entrada y salida del acuífero, respectivamente.
- Ω_{Sup} : Área superficial del acuífero.
- We y Ws : Ancho de entrada y salida del acuífero, respectivamente.
- H : Altura del acuífero, determinadas por diferencia de cotas.

8.3.2. Condiciones Iniciales de Operación

MAGIC exige incluir el volumen inicial de operación del acuífero como condición de operación para el primer mes de modelación. En ausencia de información significativa para estimar este parámetro y a la necesidad de generar los afloramientos que corresponden al flujo base de la cuenca del río Loa, se supuso un volumen inicial equivalente al 100% del volumen máximo admisible determinado con las expresiones de cálculo presentadas anteriormente.

En el Cuadro 8.3-2 se presentan los resultados de los parámetros ingresados a la base de datos.

**CUADRO 8.3-2
PARÁMETROS DE ACUÍFEROS MODELADOS**

Acuífero	K (m/s)	S	Área Sup. (Km ²)	Geometría Sección Entrada			Geometría Sección Salida		
				We (m)	H (m)	i	Ws (m)	H (m)	i
AC-01	2×10^{-5}	2×10^{-4}	1.428	9.591	300	0,012	3.484	40	0,011
AC-02	9×10^{-4}	2×10^{-1}	275	7.655	142	0,001	1.850	120	0,004
AC-03	2×10^{-4}	5×10^{-4}	798	8.003	132	0,009	844	150	0,006
AC-04	2×10^{-5}	2×10^{-1}	576	17.412	121	0,002	15.167	113	0,002
AC-05	2×10^{-5}	1×10^{-2}	1.347	4.499	202	0,009	3.942	160	0,011
AC-06	2×10^{-5}	2×10^{-1}	366	7.081	80	0,002	7.524	80	0,002
AC-07	7×10^{-5}	2×10^{-3}	1.116	9.867	140	0,001	3.940	80	0,005
AC-08	2×10^{-5}	3×10^{-3}	1.401	4.442	153	0,006	2.031	100	0,010

Acuífero	Área Entrada (m ²)	Área Salida (m ²)	Largo Equiv. (m)	Q Max Entrada (m ³ /s)	Q Max Salida (m ³ /s)	Volumen Máx Alm. (m ³)
AC-01	2.877.300	139.360	218.447	0,83	0,04	51.071.073
AC-02	1.087.010	222.000	57.864	1,42	0,73	6.453.467.501
AC-03	1.056.396	126.527	180.410	2,10	0,16	53.352.800
AC-04	2.106.852	1.713.871	35.360	0,11	0,10	10.133.628.357
AC-05	908.798	630.720	319.156	0,20	0,16	2.702.409.455
AC-06	566.480	601.920	50.120	0,02	0,02	4.392.439.200
AC-07	1.381.380	315.200	161.686	0,13	0,12	288.029.076
AC-08	679.626	203.100	432.875	0,10	0,05	592.270.553

Fuente: Elaboración Propia

8.3.3. Conectividad de los Acuíferos

La definición de los acuíferos consideró una interconexión entre estos, de manera que se generan interacciones entre los flujos de entrada y salida de cada acuífero. En el Cuadro 8.3-3 se muestra el objeto final de cada caudal subterráneo de salida de los acuíferos considerados en la modelación por medio de MAGIC.

**CUADRO 8.3-3
CONECTIVIDAD DE ACUÍFEROS MODELADOS**

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

Fuente: Elaboración Propia

Considerar que el acuífero AC-08 corresponde a la desembocadura del río Loa, por lo que no existe un objeto final para su caudal de salida.

Además de la conexión subterránea entre los acuíferos, éstos también presentan interacción con la zona superficial del modelo por medio de afloramientos. Cada uno de estos sectores quedó definido por un nodo en la malla del modelo, el cual se determinó por intuición debido al angostamiento del cauce superficial o bien por conocimiento de su existencia. En la Figura 8.3-2 se observa la distribución de los nodos asociados a los afloramientos de los acuíferos.

Cabe mencionar que el programa MAGIC permite asociar un máximo de 4 puntos de afloramiento por acuífero, lo que en la cuenca del río Salado resultó ser insuficiente. Esta cuenca presenta una serie de vertientes de importancia asociadas a zonas de riego, por lo que se debió simular mediante pozos de bombeo los afloramientos en las zonas de Paniri, Cupo, Turi y Ayquina. El caudal de bombeo en estos casos corresponde a la demanda hídrica de cada zona de riego.

8.4. Canales de Regadío

MAGIC permite subdividir la red de canales en dos categorías: canal matriz y canal derivado, definición con la cual es posible representar los canales unificados de la cuenca que consisten en un tramo matriz y sus derivados. En este caso no se definieron canales derivados en la cuenca del río Loa, considerándose por lo tanto solo aquellos que presentan bocatomas en el cauce principal. Esta decisión se basa en la inexistencia de un registro de red de canales, lo que se buscó subsanar con la actividad en terreno donde se georreferenciaron las bocatomas existentes en el cauce del río Loa y sus afluentes. No integrar a la modelación los canales derivados implica considerar un largo de conducción de las aguas menor al finalmente estimado, lo que puede contribuir a considerar una menor infiltración hacia los respectivos acuíferos debido a las pérdidas en la conducción. En contrapartida, se observó en terreno que un alto porcentaje de los canales de la cuenca se encuentran revestidos en hormigón (incluso aquellos intraprediales), por lo que esta pérdida se minimiza. Los factores de pérdida de acuerdo a cada tipo de revestimiento utilizado se presentan en el Cuadro 8.4-1.

**CUADRO 8.4-1
PÉRDIDA EN CANALES**

Tipo	Pérdida
Revestido	5%
Sin Revestimiento	18%
De Tierra en Mal Estado	50%

Fuente: Elaboración Propia

Para los revestimientos realizados con hormigón y mampostería en piedra se consideró en ambos casos aquel correspondiente a canal revestido.

Como se mencionó, la actividad en terreno permitió ubicar las bocatomas de los canales principales de la cuenca del río Loa, los que finalmente fueron considerados en la modelación. Además entregó la posibilidad de recorrer los canales y asignar puntos de referencia que permitieron un seguimiento del canal por medio de Google Earth, con lo que finalmente se logró obtener un valor para la longitud de cada canal considerado en la modelación. El Cuadro 8.4-2 contiene la información que se integra en la base de datos para la representación de la red de canales, mientras que en la Figura 8.4-1 se presenta su distribución espacial.

CUADRO 8.4-2
CANALES INCORPORADOS AL MODELO

Código	Nombre	Nodo	Largo (m)
CA-001	Canal Buen Retiro	NO-030	1.826
CA-002	Canal San Antonio	NO-031	1.519
CA-003	Canal Los Ramírez	NO-032	1.127
CA-004	Canal Quilchire	NO-033	10.706
CA-005	Canal Los Perales	NO-034	591
CA-006	Canal Pona	NO-035	3.379
CA-007	Canal Grande	NO-036	6.312
CA-008	Canal La Banda	NO-037	2.705
CA-009	Canal El Pueblo	NO-038	4.080
CA-010	Canal Toconce	NO-048	5.070
CA-011	Canal Caspana	NO-061	8.112
CA-012	Canal Ayquina	NO-065	1.167
CA-013	Canal El Trigal	NO-067	485
CA-014	Canal Puente	NO-068	4.106
CA-015	Canal Paniri	NO-069	150
CA-016	Canal Inga	NO-070	3.110
CA-017	Canal Mesón	NO-071	2.530
CA-018	Canal Yalquincha 2	NO-077	5.674
CA-019	Canal Yalquincha 1	NO-078	4.809
CA-020	Canal Tronco	NO-081	5.135
CA-021	Canal Unificado Banda Radic Topater	NO-083	3.467
CA-022	Canal Lay Lay	NO-084	3.106
CA-023	Canal Núñez	NO-085	4.772
CA-024	Canal Chunchuri Bajo	NO-086	4.051
CA-025	Canal La Prensa	NO-087	2.584
CA-026	Canal Dupont	NO-088	2.337
CA-027	Canal río San Salvador	NO-094	795
CA-028	Canal 1	NO-109	10.227
CA-029	Canal 2	NO-110	4.888

Fuente: Elaboración Propia

Por último, la capacidad de conducción de los canales se calculó mediante las expresiones detalladas a continuación, donde los parámetros para cada una se obtuvo por medio de las mediciones realizadas en la actividad en terreno.

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad R = \frac{S}{P} \quad Q = v S$$

Donde:

- S = área (m²).
- v = velocidad (m/s).
- Q = caudal (m³/s).
- R = radio hidráulico (m).
- P = perímetro mojado (m).
- J = pendiente (°/1).
- n = coeficiente de rugosidad de Manning.

8.5. Zonas de Riego

Las zonas de riego son elementos mediante los cuales MAGIC representa los sectores cultivables de la cuenca. A cada una de ellas se le asignan características tales como superficies cultivadas y no cultivadas, acuíferos, canales de riego, pozos, tipos de cultivos y demandas o métodos de riego. Con la información recabada en la actividad en terreno e inspección mediante Google Earth se determinó la ubicación de los sectores productivos agrícolas. Éstos se asociaron de acuerdo a cercanía geográfica o tipo de cultivo, determinándose la existencia de 13 zonas de riego que se pueden observar en las Figuras 8.5-1, 8.5-2 y 8.5-3. A su vez se definió la superficie no cultivada como la diferencia entre la superficie de cada zona de riego y la superficie cultivada obtenida desde la actividad en terreno y el Censo Agropecuario.

A estas 13 zonas de riego definidas para las zonas agrícolas productivas, se les debió adicionar 3 con la intención de fidelizar la recarga por precipitación al sistema subterráneo. El programa MAGIC solo asocia la estadística de precipitación a las zonas de riego, es decir solo puede existir recarga al acuífero por medio de la definición de estas zonas. El error generado por esta omisión es importante en el sector del Loa Alto (aguas arriba de la confluencia entre los ríos Loa y Salado) debido a que las precipitaciones en la cuenca del río Loa se concentran principalmente en este sector y que las zonas de riego son inexistentes o bien son de una superficie no representativa respecto a la cuenca o acuífero respectivo. Por lo tanto, se generaron 3 zonas de riego sin cultivos asociados y de un área correspondiente a los acuíferos de cada subcuenca. El Cuadro 8.5-1 presenta las principales características de cada una de las zonas de riego asignadas al modelo, donde las últimas 3 (ZR-14, ZR-15 y ZR-16) corresponden a las asignadas para recarga a los acuíferos. Por otro lado, las Figuras 8.5-1 a 8.5-3 presentan su delimitación geográfica.

MAGIC no permite la definición de zonas de riego con superficie de cultivo nula, pero en el caso de las zonas de riego asignadas para recarga al acuífero no existen cultivos asociados, es decir independiente de la superficie asignada en este punto estas zonas no generan una demanda por riego. La Zona de Riego 13 en cambio, perteneciente al poblado de Quillagua, presenta una superficie de cultivo unitaria debido a que en la actividad en terreno no se verificó un componente agrícola en ese sector, sin embargo existen cultivos asociados debido a su productividad agrícola pasada.

CUADRO 8.5-1
SUPERFICIE ZONAS DE RIEGO

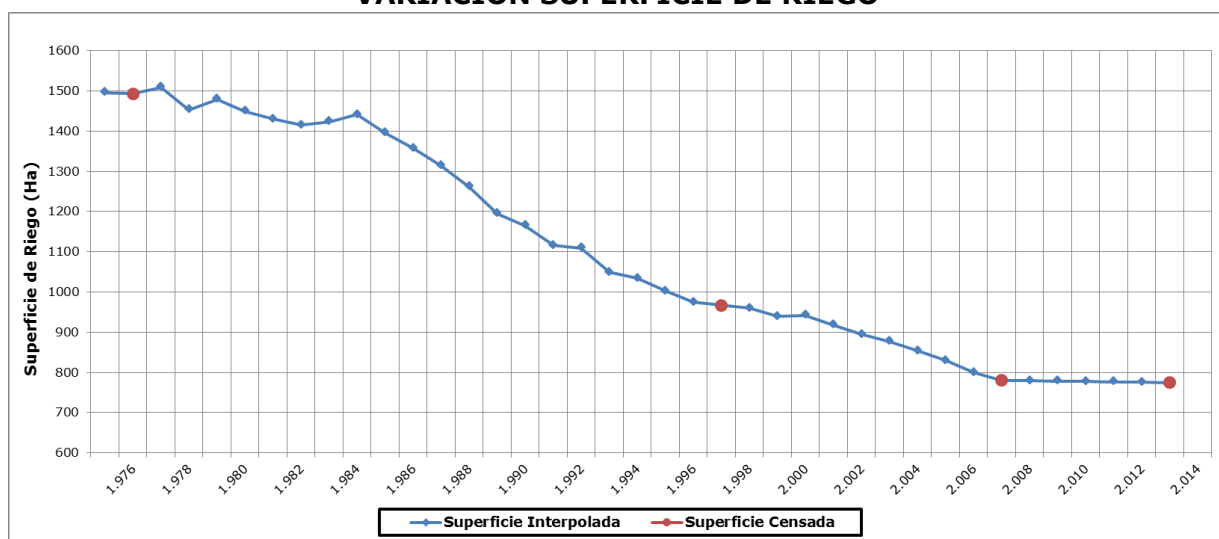
Código	Acuífero	Superficie (Ha)		
		Cultivada	No Cultivada	Total
ZR-01	AC-05	92	73	165
ZR-02	AC-05	115	99	214
ZR-03	AC-03	10	34	44
ZR-04	AC-03	22	59	81
ZR-05	AC-03	4	9	13
ZR-06	AC-03	51	142	193
ZR-07	AC-03	4	7	11
ZR-08	AC-03	13	44	57
ZR-09	AC-05	20	62	82
ZR-10	AC-05	256	262	518
ZR-11	AC-05	182	942	1.124
ZR-12	AC-05	6	2	8
ZR-13	AC-08	1	151	152
ZR-14	AC-01	1	142.809	142.810
ZR-15	AC-02	1	27.499	27.500
ZR-16	AC-03	1	79.799	79.800

Fuente: Elaboración Propia

8.5.1. Superficie de Riego

Para cada zona de riego definida se determinó la evolución de las superficies cultivadas y no cultivadas dentro del periodo de modelación (1975-2012). Se dispuso de información de superficies y tipos de cultivos de acuerdo a lo recabado durante la actividad en terreno y el Censo Agropecuario 2007 e información de superficies de riego total de acuerdo a los Censos Agropecuarios de los años 1997 y 1976. Con el fin de representar de mejor manera la situación agrícola de la cuenca entre los años hidrológicos 1975 y 2012 las superficies presentadas anteriormente en el Cuadro 8.5-1 fueron proyectadas retrospectivamente para abarcar todo el periodo de modelación. Con este objetivo se interpolaron las superficies en función de las variaciones históricas del Producto Interno Bruto Silvoagropecuario regional, considerando que existía una relación directa entre la solvencia económica de la actividad agrícola local con la superficie utilizada para la explotación de los predios. La evolución de la superficie de riego obtenida para la cuenca del río Loa y para el período de modelación considerado, se presenta en la Figura 8.5-4.

FIGURA 8.5-4
VARIACIÓN SUPERFICIE DE RIEGO



Fuente: Elaboración Propia

Se observa un fuerte decaimiento de la superficie cultivada en el periodo de modelación, pero con tendencia a la estabilización de acuerdo a los últimos registros. Esto se puede explicar remarcando la situación vivida por el poblado de Quillagua, donde existía una importante producción agrícola hasta la década de los años 80 y que fue decayendo hasta no poder verificarse esta actividad en la actualidad.

Por último, la superficie total de cada zona de riego se definió constante en el periodo 1975 - 2012, por lo que la variación de la superficie no cultivada es inversamente proporcional a la variación de la superficie cultivada.

8.5.2. Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial corresponde a una variable climática asociada a la pérdida de agua desde una superficie de suelo. Su valor se expresa en el Cuadro 8.5-2 para cada sector dentro de la cuenca del río Loa.

CUADRO 8.5-2
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL Eo (mm/mes)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Embalse Conchi	316	292	279	331	315	292	300	298	313	345	358	333
Turi	135	144	81	118	110	72	71	88	113	146	153	132
Caspana	262	285	258	281	280	278	293	322	321	345	346	302
Chiuchiu	327	344	322	352	357	331	336	359	368	397	386	359
Calama	294	287	285	308	317	309	300	323	329	352	354	341

Fuente: Elaboración Propia en base a CNR (1997).

8.5.3. Coeficiente de Cultivo

De acuerdo a la actividad en terreno y el Censo Agropecuario 2007 se determinaron los tipos de cultivo, y técnica de riego asociada, que corresponden a las diferentes zonas de riego consideradas en el modelo. Esta información se presenta en el Cuadro 8.5-3.

CUADRO 8.5-3
TIPOS DE CULTIVOS

Código	Nombre	Técnica Riego
TC-01	Alfalfa	Tendido
TC-02	Avena	Tendido
TC-03	Betarraga	Tendido
TC-04	Cebollas	Tendido
TC-05	Habas	Tendido
TC-06	Hortalizas	Tendido
TC-07	Lechugas	Tendido
TC-08	Maíz	Tendido
TC-09	Manzanas	Tendido
TC-10	Papas	Tendido
TC-11	Peras	Tendido
TC-12	Tunas	Tendido
TC-13	Zanahoria	Tendido

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a lo observado en la actividad en terreno se consideró solo riego por tendido debido a su extendido uso sobre otras técnicas. Este supuesto considera un escenario conservador de acuerdo a la menor eficiencia de riego que presenta este método de riego en comparación a técnicas de mayor tecnología como es el riego por goteo.

Cada tipo de cultivo posee un coeficiente único e independiente de su método de riego llamado coeficiente cultivo (K_c) que relaciona las necesidades diarias de agua con la evapotranspiración potencial. Los valores de este coeficiente utilizados para cada tipo de cultivo de manera mensual se presentan en el Cuadro 8.5-4.

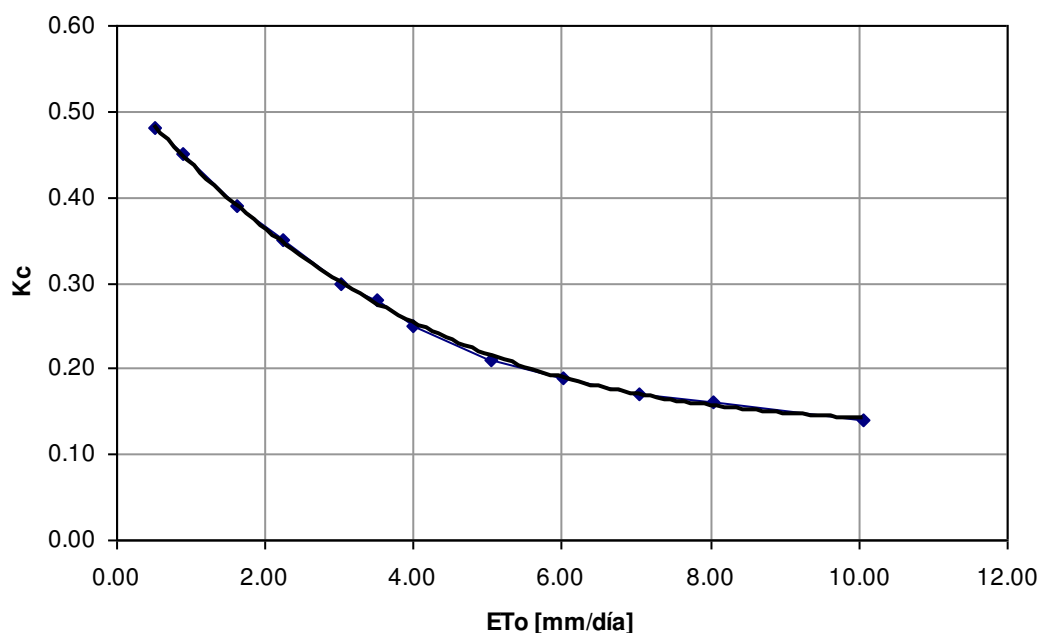
CUADRO 8.5-4
COEFICIENTES DE CULTIVO Kc

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Alfalfa	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Cereales	0	0	0	0	0	0,40	0,82	0,99	1,15	1,15	0,75	0,00
Frutales	0,70	0,70	0,70	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,70	0,70
Hortalizas	0	0	0	0	0	0	0	0,50	0,78	1,05	1,00	0,90
Maíz	0	0	0	0	0	0,45	0,83	1,20	1,20	0,84	0,48	0
Papas	0	0	0	0	0	0	0	0,30	0,73	1,15	0,75	0
Manzano	0,43	0,73	1,00	1,13	1,13	1,08	0,83	0	0	0	0	0,38
Peral	0,43	0,70	0,92	1,05	1,04	0,91	0,72	0	0	0	0	0,38
Avena	0,98	1,07	0,90	0,42	0	0	0	0	0	0	0	0,57
Zanahoria	0,77	1,02	0,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0,51

Fuente: Elaboración Propia en base a FAO N°56 (2006)

A la superficie no cultivada también se le debe definir una demanda hídrica, lo que en este caso se condice con un coeficiente de cultivo de zonas de poca demanda. De acuerdo al Estudio FAO N°56, este coeficiente se relaciona a la evapotranspiración potencial de acuerdo a la curva que se presenta en la Figura 8.5-5.

FIGURA 8.5-5
COEFICIENTE DE CULTIVO V/S EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL



Fuente: Elaboración Propia en base a FAO N°56 (2006)

8.5.4. Evapotranspiración Real

La evapotranspiración se obtiene de la multiplicación del coeficiente de cultivo Kc y la evapotranspiración potencial Eo. Debido a que cada zona de riego presenta más de un cultivo, es necesario generar un cultivo tipo de la zona. Esto se consiguió mediante la ponderación de los coeficientes de cultivo de acuerdo a la superficie que abarcan dentro del total en la respectiva zona de riego. Éste cálculo se realizó de acuerdo a las superficies de riego calculadas mediante la variación del PIB Silvoagropecuario, por lo tanto este valor varía para cada zona de riego durante el periodo de modelación. El valor promedio de la evapotranspiración real de los sectores cultivables dentro del periodo de modelación de cada zona de riego se presenta en el cuadro 8.5-5.

**CUADRO 8.5-5
EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL ZONA CULTIVADA (mm/mes)**

ZR	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ZR-01	298	286	232	222	224	208	211	235	265	334	367	358
ZR-02	226	206	151	133	135	125	127	184	237	321	367	357
ZR-03	149	133	32	34	31	20	20	25	32	82	124	134
ZR-04	50	54	46	42	0	0	0	80	212	267	254	220
ZR-05	103	89	34	34	31	20	20	38	59	117	140	136
ZR-06	147	136	41	45	42	27	27	34	43	99	133	140
ZR-07	147	124	42	45	42	27	27	34	43	85	124	132
ZR-08	135	133	67	90	84	54	54	67	86	125	141	132
ZR-09	232	195	152	131	161	183	188	220	229	303	310	306
ZR-10	232	195	152	131	161	183	188	220	229	303	310	306
ZR-11	232	195	152	131	161	183	188	220	229	303	310	306
ZR-12	56	55	54	58	60	59	57	190	268	362	350	310
ZR-13	279	273	271	292	301	294	285	307	313	334	336	324

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de la superficie no cultivada, su valor también fue variando a lo largo del periodo de modelación, por lo que en el cuadro 8.5-6 se observa el promedio de la evapotranspiración real dentro de los años 1975-2012 para estas superficies.

Considerar que las zonas de riego generadas para obtener la recarga por precipitación (ZR-14, ZR-15 y ZR-16) no poseen cultivos asociados, por lo que no existe una demanda hídrica que se pudiera ver representada en estos parámetros.

CUADRO 8.5-6
EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL ZONA NO CULTIVADA (mm/mes)

ZR	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ZR-01	50	56	55	60	68	66	67	72	70	68	66	61
ZR-02	50	56	55	60	68	66	67	72	70	68	66	61
ZR-03	21	23	14	20	21	14	14	18	22	25	26	22
ZR-04	40	47	44	48	53	56	59	64	61	59	59	51
ZR-05	21	23	14	20	21	14	14	18	22	25	26	22
ZR-06	21	23	14	20	21	14	14	18	22	25	26	22
ZR-07	21	23	14	20	21	14	14	18	22	25	26	22
ZR-08	21	23	14	20	21	14	14	18	22	25	26	22
ZR-09	45	47	48	52	60	62	60	65	63	60	60	58
ZR-10	45	47	48	52	60	62	60	65	63	60	60	58
ZR-11	45	47	48	52	60	62	60	65	63	60	60	58
ZR-12	45	47	48	52	60	62	60	65	63	60	60	58
ZR-13	45	47	48	52	60	62	60	65	63	60	60	58

Fuente: Elaboración Propia

8.5.5. Precipitación Efectiva

La precipitación efectiva corresponde a la lluvia que puede ser captada por las raíces de la planta y por lo tanto contribuir a su crecimiento. A cada zona de riego se le asoció la estadística de precipitación de las estaciones pluviométricas presentadas en el Cuadro 8.5-7, de acuerdo a su cercanía geográfica.

En la obtención de la precipitación efectiva se utilizó la metodología de Blanney y Criddle modificada por Horacio Merlet y Fernando Santibañez el año 1986. Ésta relaciona la precipitación efectiva (Pef) con la precipitación media mensual (Pmm) por medio de una curva representada mediante la expresión siguiente.

$$P_{ef} = -0,0015 * P_{mm}^2 + 0,9981 * P_{mm} - 4,4574$$

CUADRO 8.5-7
ZONAS DE RIEGO Y ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ASOCIADAS

Zona de Riego	Estación Pluviométrica
ZR-01	Chiuchiu
ZR-02	Chiuchiu
ZR-03	Toconce
ZR-04	Caspana
ZR-05	Ayquina
ZR-06	Turi
ZR-07	Cupo
ZR-08	Cupo
ZR-09	Calama
ZR-10	Calama
ZR-11	Calama
ZR-12	Calama
ZR-13	Quillagua
ZR-14	Lequena
ZR-15	Ojos de San Pedro
ZR-16	Turi

Fuente: Elaboración Propia

8.5.6. Cálculo de la Necesidad Neta Mensual

La Necesidad Neta Mensual (NNM) hace referencia a la demanda hídrica por parte de cada tipo de cultivo, la cual se subsana por medio de la precipitación, bombeo de pozos o principalmente canales de riego. La NNM depende de factores como la evapotranspiración potencial E_o , el coeficiente de cultivo K_c y la precipitación efectiva. La metodología de cálculo y la presentación de la información recabada de cada uno de estos parámetros se detallan en los puntos siguientes.

La NNM se define como la diferencia entre la evapotranspiración real (ET) y la precipitación efectiva. La ET se calculó por medio de la multiplicación del coeficiente de cultivo K_c y la evapotranspiración potencial E_o , mientras que la precipitación efectiva se obtuvo con la metodología descrita en el punto anterior. Una restricción aplicada es que en caso de que la precipitación efectiva sea mayor a la evapotranspiración real se asume que la NNM es nula. A continuación, en el Cuadro 8.5-8 y el Cuadro 8.5-9, se presentan los valores promedio, para el periodo de modelación entre los años 1975 y 2012, de la NNM tanto para la zona cultivable como no cultivable respectivamente.

CUADRO 8.5-8
NNM DE ZONAS CULTIVABLES POR ZONA DE RIEGO (mm/mes)

ZR	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ZR-01	321	325	301	306	341	384	483	531	519	431	414	336
ZR-02	193	195	181	184	266	343	464	531	517	327	298	218
ZR-03	49	45	29	29	36	46	118	179	192	194	163	35
ZR-04	61	0	0	0	116	306	387	368	318	58	61	57
ZR-05	49	45	29	29	55	85	169	203	197	141	119	44
ZR-06	65	60	39	39	48	62	143	192	202	203	185	52
ZR-07	65	60	39	39	48	62	122	180	191	191	158	52
ZR-08	130	121	78	78	97	125	181	205	190	174	171	87
ZR-09	190	233	264	272	319	332	438	449	443	335	282	220
ZR-10	190	233	264	272	319	332	438	449	443	335	282	220
ZR-11	190	233	264	272	319	332	438	449	443	335	282	220
ZR-12	85	87	85	82	276	388	525	507	449	81	79	78
ZR-13	423	436	425	413	444	453	484	487	469	405	395	392

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 8.5-9
NNM DE ZONAS NO CULTIVABLES POR ZONA DE RIEGO (mm/mes)

ZR	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ZR-01	60	68	66	67	72	70	68	66	61	50	56	55
ZR-02	60	68	66	67	72	70	68	66	61	50	56	55
ZR-03	20	21	14	14	18	22	25	26	22	21	23	14
ZR-04	48	53	56	59	64	61	59	59	51	40	47	44
ZR-05	20	21	14	14	18	22	25	26	22	21	23	14
ZR-06	20	21	14	14	18	22	25	26	22	21	23	14
ZR-07	20	21	14	14	18	22	25	26	22	21	23	14
ZR-08	20	21	14	14	18	22	25	26	22	21	23	14
ZR-09	52	60	62	60	65	63	60	60	58	45	47	48
ZR-10	52	60	62	60	65	63	60	60	58	45	47	48
ZR-11	52	60	62	60	65	63	60	60	58	45	47	48
ZR-12	52	60	62	60	65	63	60	60	58	45	47	48
ZR-13	52	60	62	60	65	63	60	60	58	45	47	48

Fuente: Elaboración Propia

Considerar que las zonas de riego generadas para obtener la recarga por precipitación (ZR-14, ZR-15 y ZR-16), no poseen cultivos asociados, por lo que no existe una demanda hídrica que se pudiera ver representada en estos parámetros.

8.5.7. Percolación desde las Zonas de Riego

La percolación hace referencia al caudal que ingresa al suelo de la zona de riego, pero que no es aprovechada por la planta en su crecimiento y por lo tanto se almacena en el acuífero.

MAGIC entrega la posibilidad de calcular este parámetro por medio de los modelos de Green Ampt o Lineal. Finalmente se decidió utilizar el modelo de infiltración lineal debido a un mayor conocimiento de sus parámetros, los que se obtuvieron de las propiedades de los acuíferos considerados en el modelo hidrogeológico de la cuenca.

8.5.8. Derrames o Retornos

Los derrames o retornos corresponden al agua excedente que alimentó a la zona de riego, pero que no fue utilizada por el proceso de regadío, ni percoló hacia el acuífero correspondiente. Dichas aguas se trasladan en forma superficial o subsuperficial hacia aguas abajo donde se incorporan a los cauces superficiales.

La determinación por medio de MAGIC del caudal de derrame es por medio de los coeficientes de percolación, derrame y eficiencia de riego de la forma:

$$d = 1 - E_f - p$$

Donde:

d: Coeficiente de derrame.

E_f: Eficiencia de riego.

p: Coeficiente de percolación.

El valor de la eficiencia de riego se obtiene mediante un promedio ponderado de acuerdo a la superficie de riego de cada método en cada una de las zonas de riego. En el caso de esta modelación solo se consideró un método de riego que correspondió al de tendido. El valor de los coeficientes asignados a cada zona de riego se presentan en el Cuadro 8.5-10.

**CUADRO 8.5-10
PARÁMETROS DE RIEGO**

Zona de Riego	Eficiencia Riego	Coefficiente de Derrame	Coefficiente de Percolación
ZR-01	0,60	0,34	0,06
ZR-02	0,60	0,34	0,06
ZR-03	0,60	0,33	0,07
ZR-04	0,60	0,33	0,07
ZR-05	0,60	0,33	0,07
ZR-06	0,60	0,33	0,07
ZR-07	0,60	0,33	0,07
ZR-08	0,60	0,33	0,07
ZR-09	0,60	0,35	0,05
ZR-10	0,60	0,35	0,05
ZR-11	0,60	0,35	0,05
ZR-12	0,60	0,35	0,05
ZR-13	0,60	0,35	0,05
ZR-14	0,60	0,35	0,05
ZR-15	0,60	0,30	0,10
ZR-16	0,60	0,30	0,10

Fuente: Elaboración Propia

8.6. Embalse Conchi

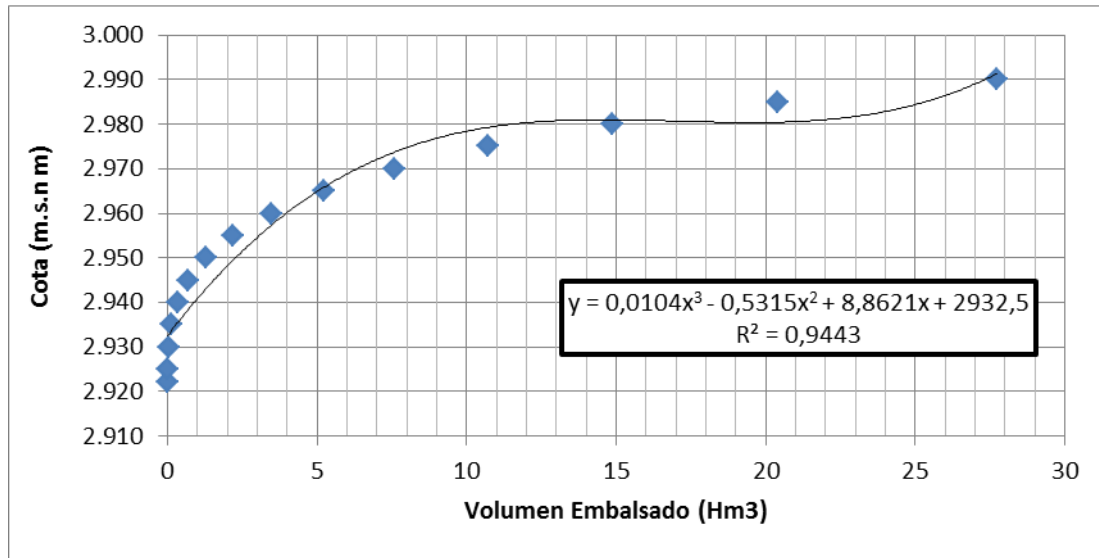
MAGIC representa los embalses de riego como nodos puntuales, a los que asocia mediante un conjunto de tablas de su base de datos, información respecto a sus propiedades físicas, y condiciones de operación.

Cabe señalar que MAGIC no dispone de una herramienta que permita incorporar la regla de operación del embalse. Incluso en el manual de MAGIC se sugiere que la inclusión de una regla de operación es posible modificando el código fuente, lo cual escapa de los alcances del estudio.

No obstante lo anterior, se incorporó importante información a la base de datos, como la siguiente:

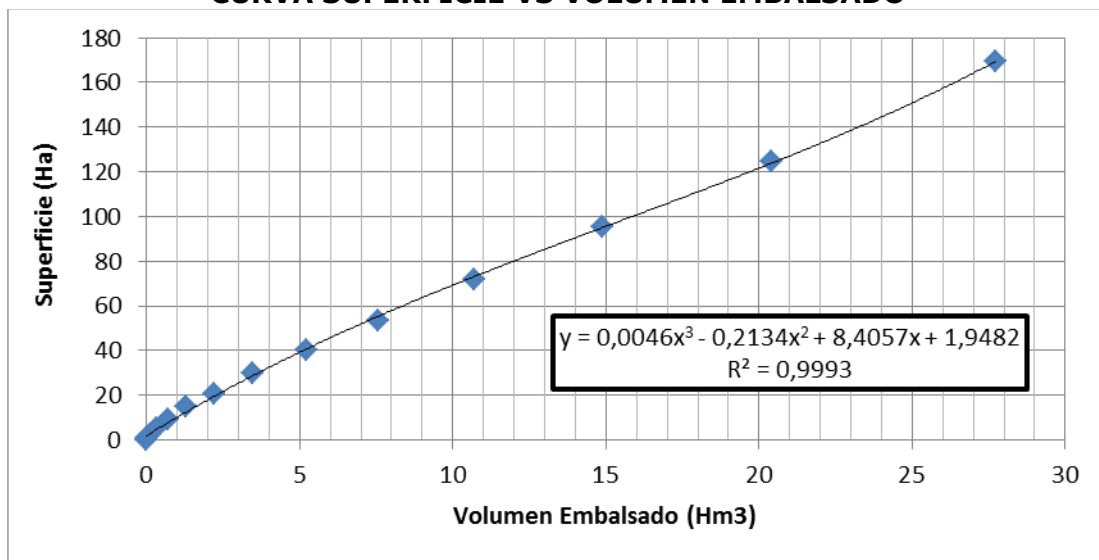
- Curvas de Superficie y Cota vs. Volumen embalsado, cuyas expresiones cúbicas presentan una excelente correlación como se observa en las Figuras 8.6-1 y 8.6-2.
- Volumen muerto y volumen máximo de embalsamiento.
- Tasas de evaporación a nivel mensual, obtenidas de la estación meteorológica Conchi Embalse.

FIGURA 8.6-1
CURVA COTA VS VOLUMEN EMBALSADO



Fuente: Elaboración Propia en base a Embalse Conchi, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. 1969

FIGURA 8.6-2
CURVA SUPERFICIE VS VOLUMEN EMBALSADO



Fuente: Elaboración Propia en base a Embalse Conchi, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. 1969

8.7. Pozos de Bombeo

Los pozos considerados 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 sus respectivos derechos. Su distribución espacial se puede consultar en la Figura 8.7-1 y en el Cuadro 8.7-1 se observan las principales características de cada uno.

CUADRO 8.7-1
POZOS INCORPORADOS AL MODELO

Código	Q Derecho (l/s)	Fecha Der Otorgado	Uso	Acuífero	Coord WGS84, 19S	
					UTM N (m)	UTM E (m)
PO-01	60	13-01-1993	MI	AC-02	7.568.759	574.098
PO-02	135	30-12-1992	MI	AC-02	7.571.703	575.185
PO-03	200	12-01-1990	MI	AC-02	7.571.692	575.157
PO-04	100	30-12-1992	MI	AC-02	7.570.239	574.665
PO-05	40	15-02-1993	MI	AC-02	7.568.679	571.553
PO-06	90	12-01-1990	MI	AC-02	7.569.175	569.693
PO-07	200	12-01-1990	MI	AC-02	7.569.187	569.683
PO-08	220	12-01-1990	MI	AC-02	7.571.998	574.819
PO-09	220	12-01-1990	MI	AC-02	7.569.216	577.122
PO-10	233	12-01-1990	MI	AC-02	7.568.937	580.164
PO-11	150	13-01-1994	MI	AC-02	7.569.678	571.544
PO-12	58	12-01-1990	MI	AC-02	7.564.078	589.391
PO-13	7	12-01-1990	MI	AC-02	7.570.448	565.523
PO-14	30	12-01-1990	MI	AC-02	7.563.157	572.767
PO-15	31	30-07-1996	MI	AC-04	7.522.986	535.302
PO-16	66	26-01-2001	MI	AC-05	7.515.039	504.218
PO-17	8	15-09-1992	MI	AC-06	7.517.760	443.470
PO-18	3	15-09-1992	MI	AC-06	7.517.660	443.480
PO-19	7	14-07-2000	MI	AC-06	7.516.204	447.212
PO-20	16	14-07-2000	MI	AC-06	7.520.223	443.105
PO-21	45	13-02-1998	MI	AC-05	7.516.370	503.227
PO-22	1	11-07-1995	MI	AC-05	7.515.083	504.057
PO-23	47	11-07-1995	MI	AC-05	7.516.070	505.550
PO-24	50	11-07-1995	MI	AC-05	7.515.864	502.771
PO-25	1	11-07-1995	MI	AC-05	7.515.513	504.530
PO-26	17	09-01-2008	MI	AC-05	7.515.041	503.053
PO-27	5	08-10-2003	MI	AC-06	7.519.103	442.436
PO-28	10	08-09-2003	MI	AC-06	7.521.081	440.879
PO-29	47	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.962	504.277
PO-30	73	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.581	503.644
PO-31	65	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.881	503.891
PO-32	70	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.520	503.895
PO-33	65	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.329	504.023
PO-34	30	12-05-2008	AP	AC-04	7.512.629	530.295
PO-35	40	12-05-2008	AP	AC-04	7.523.061	542.237

CUADRO 8.7-1
POZOS INCORPORADOS AL MODELO

Código	Q Derecho (l/s)	Fecha Der Otorgado	Uso	Acuífero	Coord WGS84, 19S	
					UTM N (m)	UTM E (m)
PO-36	35	12-05-2008	AP	AC-04	7.514.189	535.387
PO-37	50	12-05-2008	AP	AC-04	7.515.374	532.641
PO-38	20	12-05-2008	AP	AC-04	7.519.133	537.591
PO-39	20	12-05-2008	AP	AC-04	7.516.119	537.638
PO-40	50	12-05-2008	AP	AC-04	7.518.293	545.064
PO-41	40	12-05-2008	AP	AC-04	7.525.516	543.655
PO-42	34	12-05-2008	AP	AC-04	7.520.852	539.663
PO-43	30	09-05-2008	OT	AC-05	7.510.700	507.300
PO-44	30	19-06-2003	MI	AC-05	7.521.343	508.002
PO-45	2	18-04-2008	MI	AC-05	7.525.654	509.045
PO-46	19	24-06-1999	MI	AC-07	7.657.992	433.844
PO-47	65	24-06-1999	MI	AC-07	7.659.096	434.560
PO-48	35	24-06-1999	MI	AC-07	7.661.977	433.595
PO-49	30	24-06-1999	MI	AC-07	7.663.593	439.902
PO-50	60	24-06-1999	MI	AC-07	7.660.012	433.787
PO-51	31	24-06-1999	MI	AC-07	7.658.924	433.145
PO-52	5	23-06-1999	MI	AC-07	7.660.337	431.762
PO-53	6	18-05-2012	MI	AC-07	7.682.350	482.590

Fuente: Elaboración Propia

Nota: Nomenclatura Uso: AP: Agua Potable; MI: Minero; OT:Otro.

A efectos de la modelación se debió incluir 6 nuevos pozos con el objetivo de representar elementos que el modelo no permitió incluir. En el Cuadro 8.7-2 se presentan estas incorporaciones.

CUADRO 8.7-2
POZOS REPRESENTATIVOS INCORPORADOS AL MODELO

Código	Acuífero	Qb max (m ³ /s)	Observación
PO-54	AC-02	0,75	Drenes
PO-55	AC-03	0,02	Afloramiento
PO-56	AC-03	0,08	Afloramiento
PO-57	AC-03	0,25	Afloramiento
PO-58	AC-03	0,05	Afloramiento
PO-59	AC-03	0,03	Afloramiento

Fuente: Elaboración Propia

El motivo de incluir un pozo que represente los drenes ubicados en la cuenca de Ojos de San Pedro, operativos hasta el año 1990, es que MAGIC no cuenta con una tabla que defina específicamente este elemento. Por otro lado se debió incluir pozos como afloramientos debido a la restricción del programa que solo permite un máximo de 4 puntos por acuífero, situación que en la cuenca del río Salado se excede de acuerdo a las zonas de riego que cubren su demanda hídrica por medio de afloramientos, tales como Caspana, Paniri, Cupo, Turi y Ayquina.

8.8. Captaciones Puntuales

Las captaciones puntuales corresponden a aquellas extracciones de agua de los cauces superficiales que son extraídas del sistema. En el caso de la cuenca del río Loa, se consideran como captaciones puntuales 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 incluidas en el modelo se presentan en el Cuadro 8.8-1.

**CUADRO 8.8-1
CAPTACIONES PUNTUALES INCORPORADAS AL MODELO**

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

Las captaciones listadas en el cuadro anterior poseen una capacidad acorde a su caudal de derecho a excepción de CP-10 y CP-22. Los supuestos de modelación utilizados en cada caso se detallan a continuación.

CP-10, Inacaliri I y II ADASA: Su capacidad corresponde al derecho de 90 l/s existente sumado a la captación del flujo de explotación desde los pozos ubicados en el sector Ojos de San Pedro, propiedad de Codelco, que entregan el caudal bombeado directamente al cauce del río. La captación de los derechos en éste punto corresponde a un supuesto de modelación en base a que la estación fluviométrica río San Pedro en Camino Internacional, ubicada a una distancia aproximada de 1.500 metros aguas abajo, presenta un caudal nulo.

CP-22, Demanda Embalse: Se modeló ésta captación con el fin de representar de mejor manera la operación del embalse Conchi. Su función es generar una demanda correspondiente a la sumatoria de las demandas por riego en los nodos aguas abajo. Se ubica en el nodo siguiente al definido por el embalse y presenta una devolución total al cauce en el posterior. Su capacidad corresponde a un valor superior al máximo de la sumatoria de demandas por riego existentes aguas abajo que es de 3,6 m³/s. La diferencia entre su capacidad y el caudal de demanda no afecta los resultados del modelo, solo se utilizó un amplio margen que permitiera maniobrar entre las diferentes calibraciones y posibles escenarios de simulación.

A su vez, algunas de las captaciones corresponden solo a conducción de flujos, es decir presentan devolución de caudal en algún otro punto del modelo, y son las que se muestran en el Cuadro 8.8-2.

**CUADRO 8.8-2
RETORNOS DE CAPTACIONES PUNTUALES**

Código CP	Código Retorno	Nodo Inicial	Nodo Final	Retorno de la CP
CP-14	RE-01	NO-051	NO-044	100%
CP-21	RE-02	NO-053	NO-056	100%
CP-22	RE-03	NO-028	NO-029	100%

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado también se definen aquellas captaciones utilizadas en la representación de las pérdidas por evaporación desde los cauces superficiales en los sectores de Loa Medio y Bajo, tal como se describió en el punto 8.1.3. El Cuadro 8.8-3 presenta las 3 captaciones que se utilizan con ese objetivo y su capacidad máxima de conducción.

**CUADRO 8.8-3
CAPTACIONES PUNTUALES DE EVAPORACIÓN CAUCES**

Código	Nombre	Capacidad (m³/s)
CP-23	Evaporación Tramo 1	0,2
CP-24	Evaporación Tramo 2	0,2
CP-25	Evaporación Tramo 3	0,2

Fuente: Elaboración Propia

8.9. Descargas Puntuales

Se consideró como única descarga puntual al modelo el caudal efluente desde la planta de tratamiento de aguas servidas de la ciudad de Calama. Esta comienza a operar el año 2002, de la cual se conoce los caudales de diseño de acuerdo a la proyección de población de la comuna de Calama como muestra el Cuadro 8.9-1.

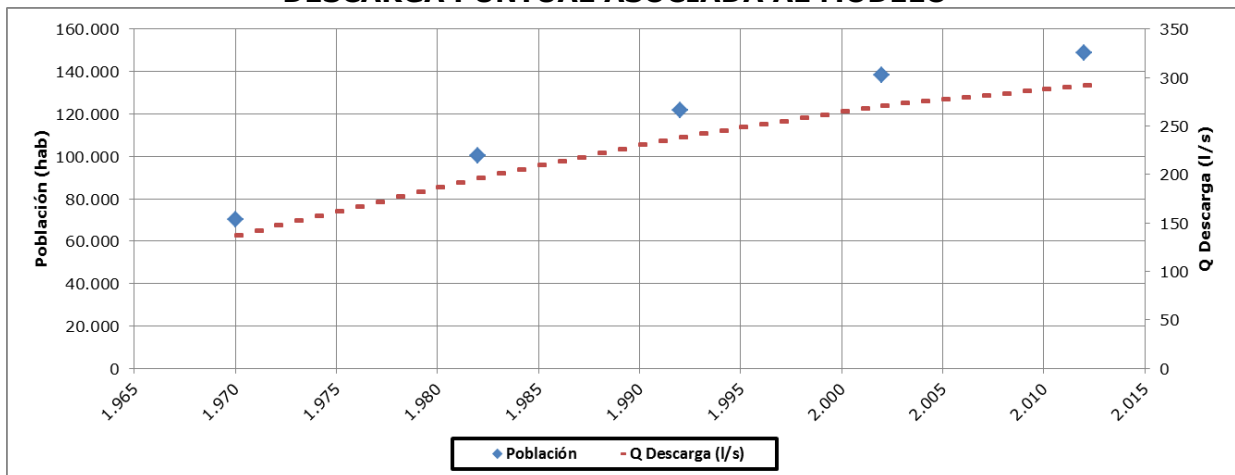
**CUADRO 8.9-1
CAUDAL DE DISEÑO PTAS CALAMA**

Año	Población (hab)	Q Descarga (l/s)	Dot (l/s/h)	Promedio (l/s/h)
2.007	146.700	287	0,002	0,002
2.017	161.635	317	0,002	
2.021	169.300	333	0,002	
2.033	189.740	372	0,002	

Fuente: Declaración Impacto Ambiental PTAS Calama (2007)

Esta información permite conocer la dotación promedio de la comuna de Calama, es decir relacionar la cantidad de habitantes a la descarga de aguas debido al tratamiento de las aguas servidas. Luego, para determinar la descarga de aguas durante el periodo de modelación entre los años 1975 y 2012, se proyectó la población de la comuna. De acuerdo a datos disponibles en el sitio web del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) de los censos realizados en los años 1970, 1982, 1992, 2002 y 2012, e interpolando los resultados entre estos intervalos, se obtuvo la población de manera anual para el periodo completo de modelación. Por último, se asignó el valor de la dotación por habitante calculada anteriormente para obtener el valor de la descarga promedio anual para la comuna de Calama que se presenta gráficamente en la Figura 8.9-1.

**FIGURA 8.9-1
DESCARGA PUNTUAL ASOCIADA AL MODELO**

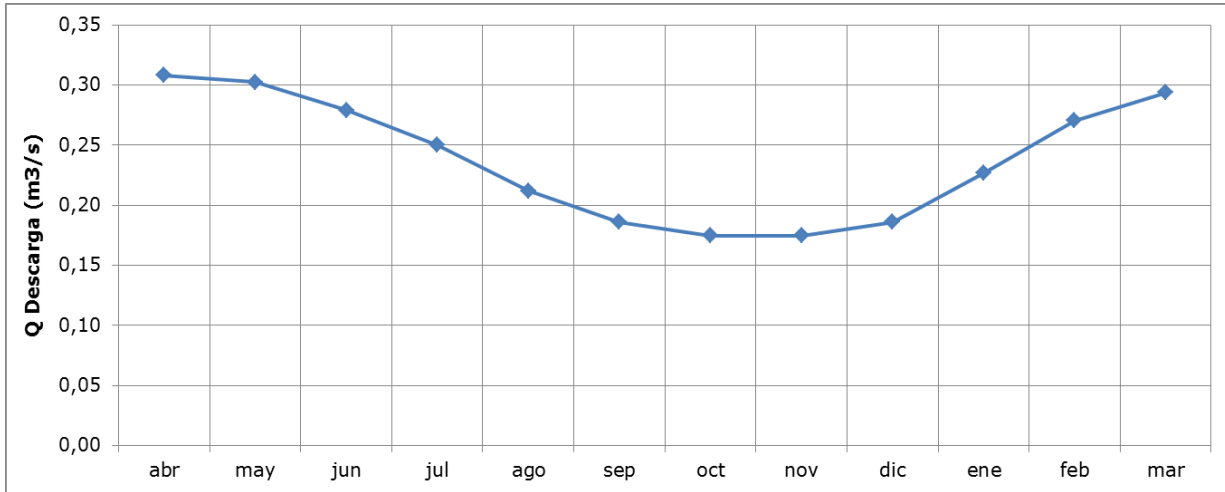


Fuente: Elaboración Propia en base a datos INE.

Finalmente este valor fue distribuido de manera mensual de acuerdo a la variación de la descarga de aguas servidas a nivel nacional de acuerdo a la estadística de los años 2007 y 2008 presentada en el sitio web de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).

En la Figura 8.9-2 se observa la variación de la descarga adoptada en el modelo MAGIC por medio del valor mensual promedio adoptado.

FIGURA 8.9-2
VARIACIÓN MENSUAL DESCARGA PUNTUAL ASOCIADA AL MODELO



Fuente: Elaboración Propia en base a datos SISS.

9. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO INTEGRADO

Con la información mencionada en los puntos anteriores, se desarrolló la base de datos que incorpora los antecedentes recopilados y generados, además de la red de conectividad topológica de la cuenca. Posterior a esta implementación, se realizaron las modelaciones de la cuenca del río Loa mediante la plataforma MAGIC, realizando los ajustes necesarios para optimizar la calibración del modelo. Las condiciones implementadas en la modelación fueron:

- Información en zonas de riego: Mediante necesidades netas mensuales.
- Distribución Q en nodos: Por caudales impuestos.
- Caudal de entrega de embalses: Función cúbica respecto a volumen embalsado.
- Superficie vs Volumen embalsado: Función cúbica respecto a volumen embalsado.
- Cota vs Volumen embalsado: Función cúbica respecto a volumen embalsado.
- Restricción entrega de agua a nodos a capacidad de los objetos.
- Bombeo para riego: Sólo el déficit.
- Restricción a acuíferos: Si $Q_{zs} < 0$, $Q_{zs} = 0$.
- Modelo de infiltración: Lineal.

El proceso de calibración consistió en una minuciosa revisión de los resultados entregados por MAGIC, los cuales deben ajustarse a la realidad observada en la cuenca. Los ajustes realizados consistieron en modificar y sensibilizar diversos parámetros que poseen mayor incerteza en su determinación. El resultado que presenta mayor influencia en las condiciones de la cuenca es el afloramiento desde los acuíferos, para lo cual se debió poner especial atención en la geometría y recarga superficial de cada uno de los que forman el modelo. En ese sentido, parámetros como el almacenamiento específico y el coeficiente de percolación desde las zonas de riego debieron ser calibradas en función de un mejor ajuste a los resultados.

Otras variables consideradas en el proceso de ajuste fueron el espesor y la permeabilidad del lecho de los cauces superficiales, espesor de los acuíferos y derrames de zonas de riego, entre otros.

La información utilizada en la modelación abarca el período conformado por los años 1974 a 2013 (años hidrológicos 1975 a 2012). No obstante se dio relevancia a la realidad actual de la cuenca, buscando un mejor ajuste de los resultados en el último tercio del periodo. Esta decisión se basa en la mayor confianza en los datos recientes como es el caso de las zonas de riego, cuya distribución espacial y la de sus cultivos, son representativas de la realidad actual, siendo proyectados en el tiempo en función de variables económicas y agropecuarias históricas observadas en la cuenca.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los nodos representativos de las estaciones fluviométricas escogidas para la calibración.

9.1. Resultados Caudales Estimados en Estaciones Fluviométricas

En las páginas siguientes se presentan los resultados gráficos y estadísticos obtenidos para cada estación fluviométrica considerada. Específicamente, se presentan las series observadas y calculadas en el tiempo, series de volúmenes acumulados observados y calculados, gráficos de caudales calculados y caudales observados, y un resumen de los estadígrafos determinados para evaluar la calidad del ajuste.

En particular, los estadígrafos calculados son los siguientes:

- Coeficiente R^2 : Cuadrado del coeficiente de correlación del momento de producto Pearson, entre las series de caudales observado y simulado.
- Coeficiente RMS (root mean square): Parámetro definido por la expresión siguiente (donde n es el número de datos).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{CAL} - Q_{OBS})^2}$$

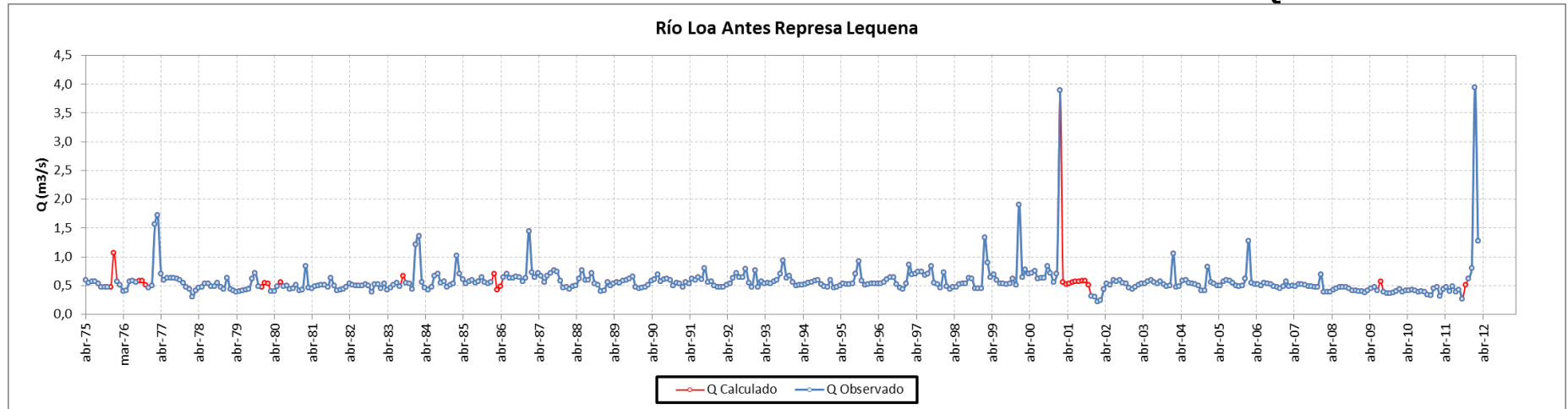
- Coeficiente RMS Normalizado: Estadígrafo anterior normalizado por la máxima diferencia entre los caudales observados.

$$RMSN = \frac{RMS}{Q_{Obs}^{Máx} - Q_{Obs}^{Mín}}$$

- Error Medio: Promedio entre las diferencias entre caudales calculados y observados. $\Sigma(Q_{Cal}-Q_{Obs})$.
- Error Absoluto Medio: Promedio entre los valores absolutos de las diferencias entre caudales calculados y observados $\Sigma|Q_{Cal}-Q_{Obs}|$.
- Error típico entre ambas variables de análisis.
- Desviación estándar.
- Coeficiente RMS Normalizado para Caudales Bajos: Este estadístico se agregó para evaluar la calibración obtenida en aquellos meses en que los flujos corresponden a valores no representativos de las crecidas que se presentan en el sistema. Para esto, se evaluaron las series calculada y observada en aquellos meses en que el caudal observado rellenado fue menor que el caudal medio anual rellenado. Por lo tanto, esta variable fue calculada según las expresiones anteriores, pero considerando los valores de las series representativos de esta condición.

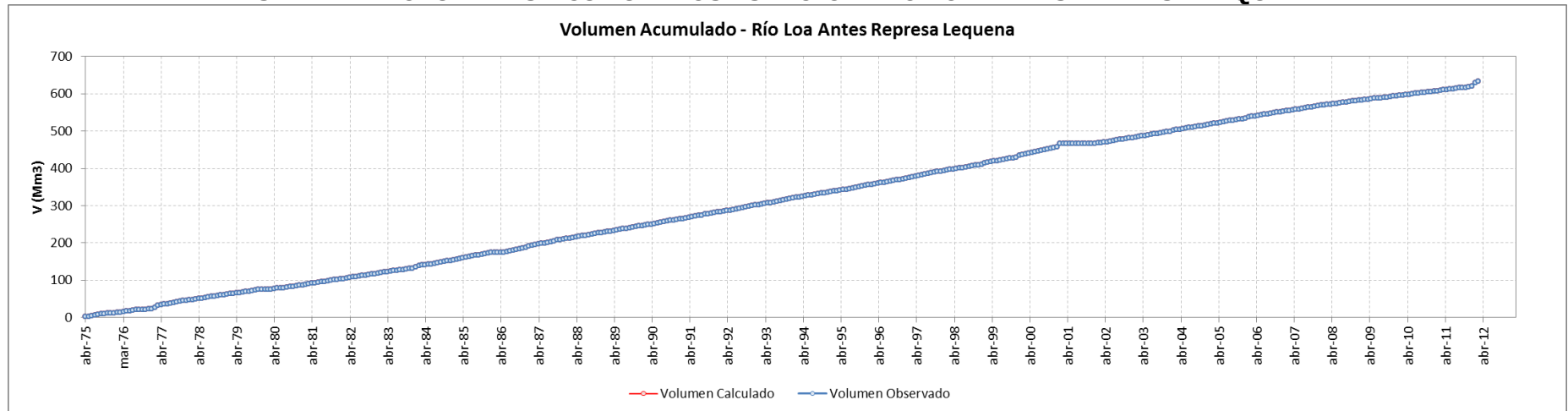
Dentro de los resultados se presenta la estación Río Loa antes Represa Lequena que actúa como cabecera del modelo, es decir la estadística observada se impuso en el nodo. De esta forma la estación no entró en el proceso de calibración, pero es importante para conocer la tendencia de los resultados aguas abajo de ésta.

FIGURA 9.1-1
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO LOA ANTES REPRESA LEQUENA



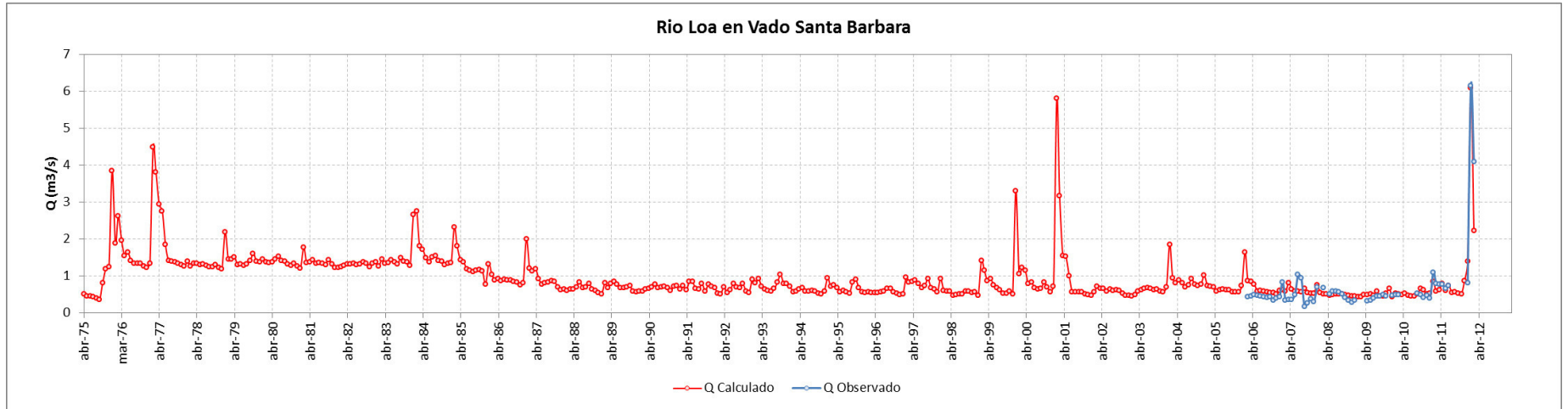
Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 9.1-2
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO LOA ANTES REPRESA LEQUENA



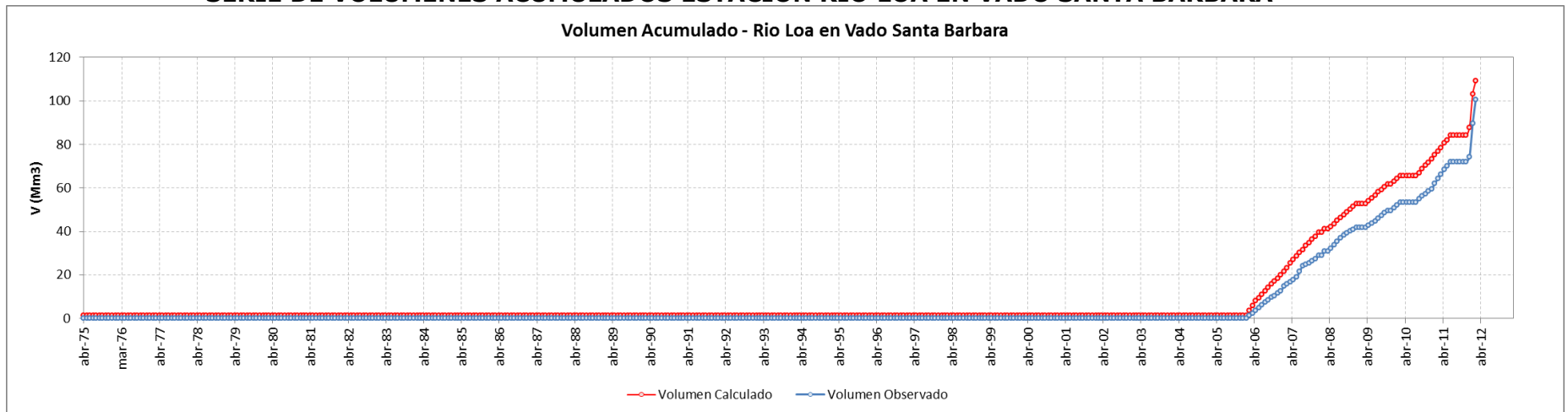
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-3
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO LOA EN VADO SANTA BÁRBARA



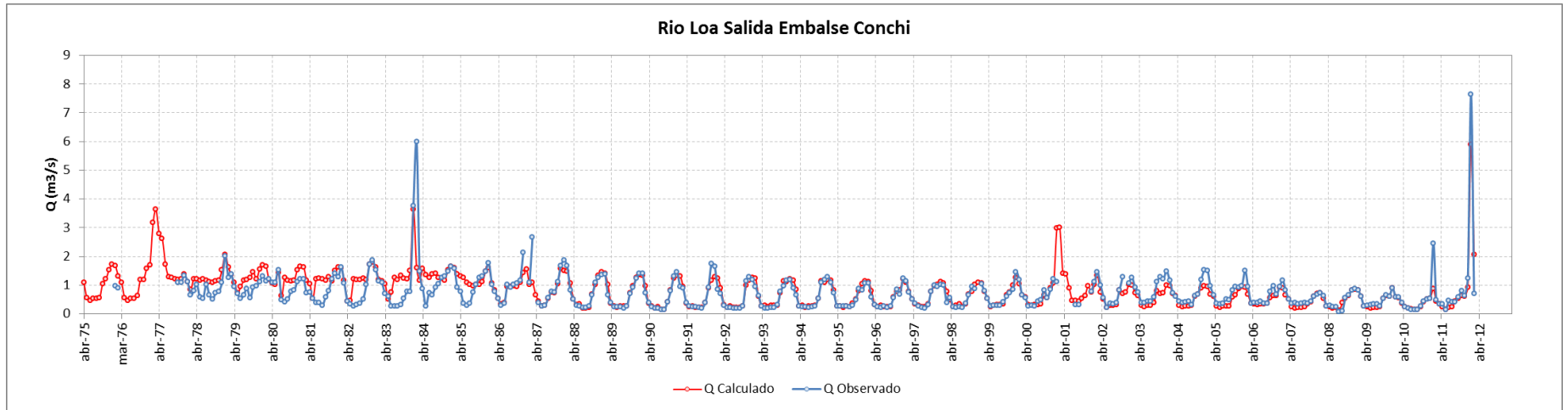
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-4
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO LOA EN VADO SANTA BÁRBARA



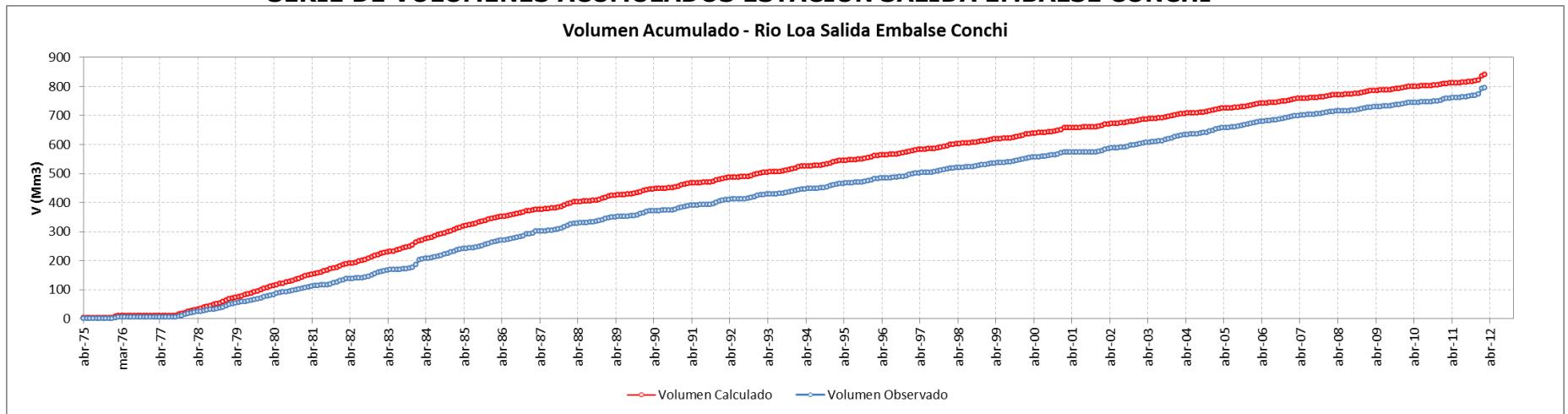
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-5
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN SALIDA EMBALSE CONCHI



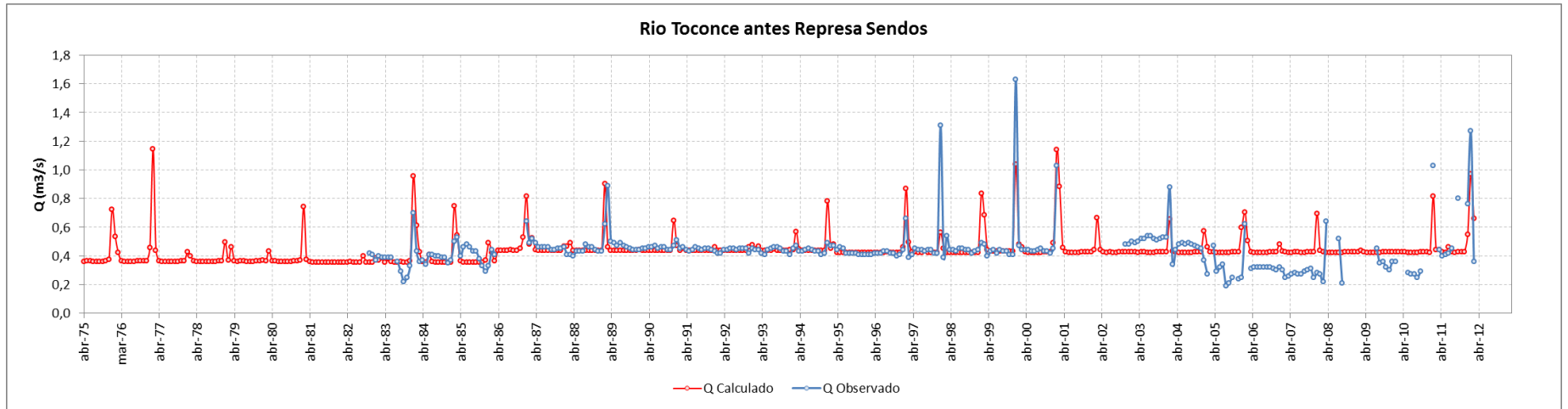
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-6
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN SALIDA EMBALSE CONCHI



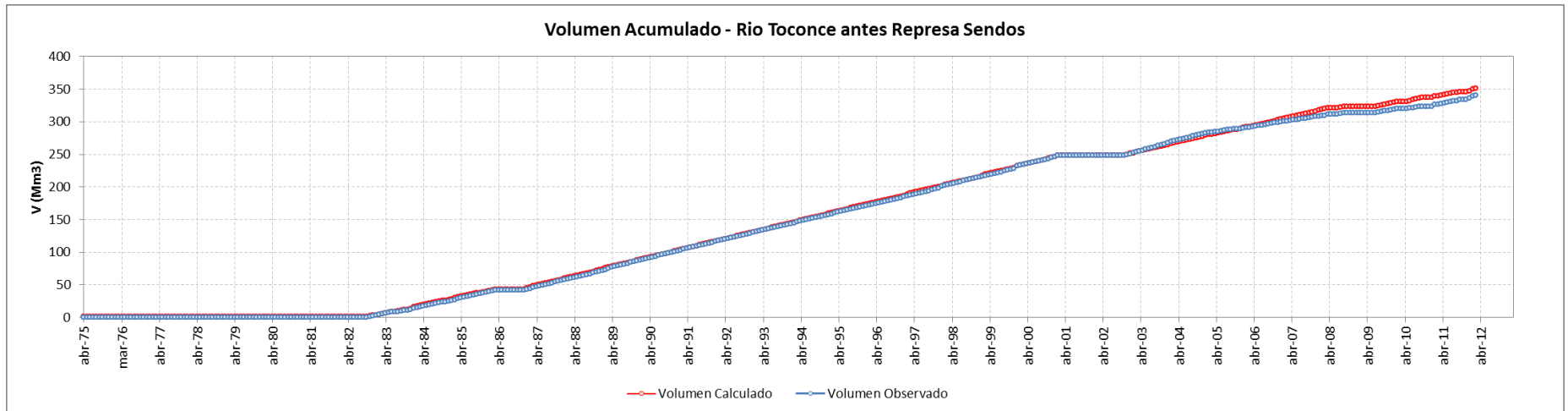
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-7
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO TOCONCE ANTES REPRESA SENDOS



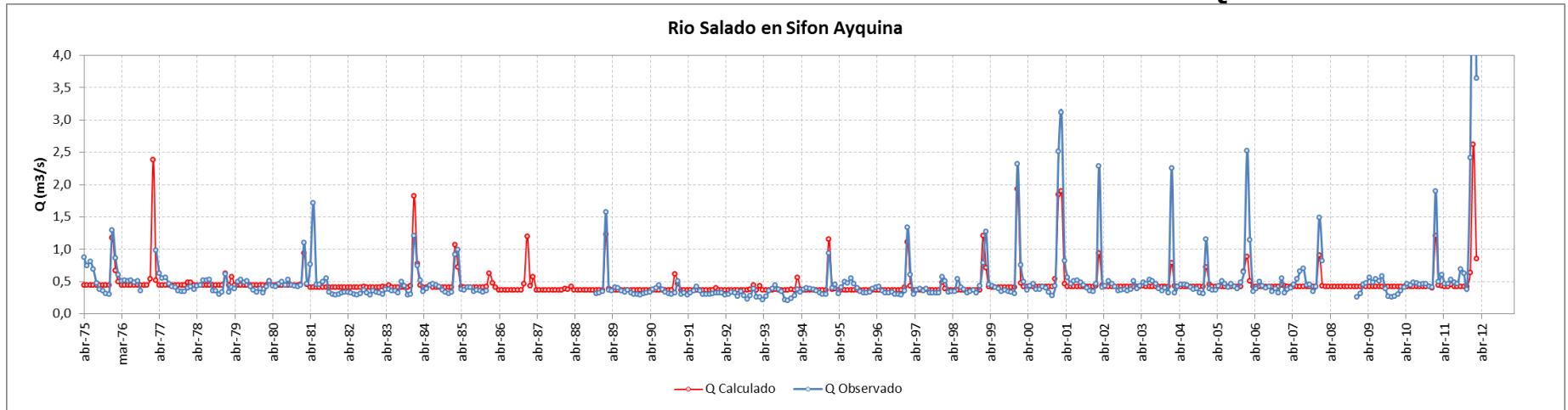
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-8
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO TOCONCE ANTES REPRESA SENDOS



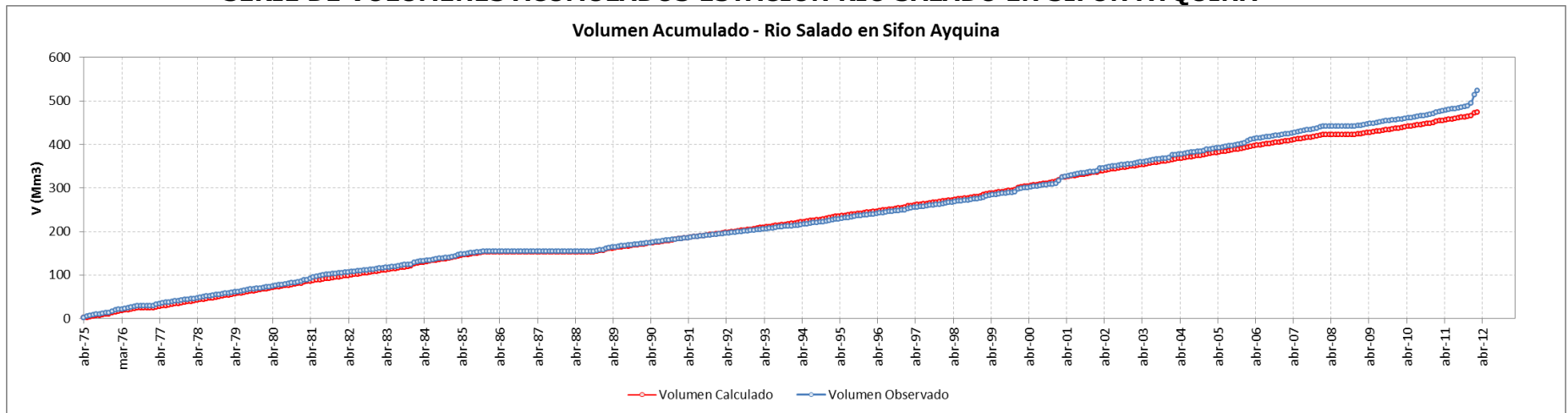
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-9
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO SALADO EN SIFÓN AYQUINA



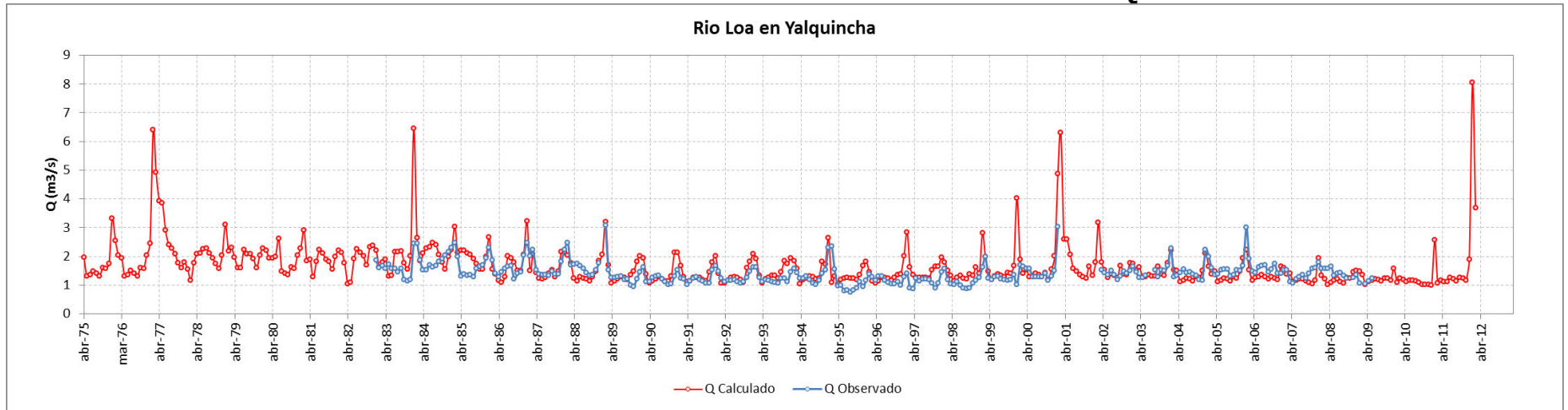
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-10
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO SALADO EN SIFÓN AYQUINA



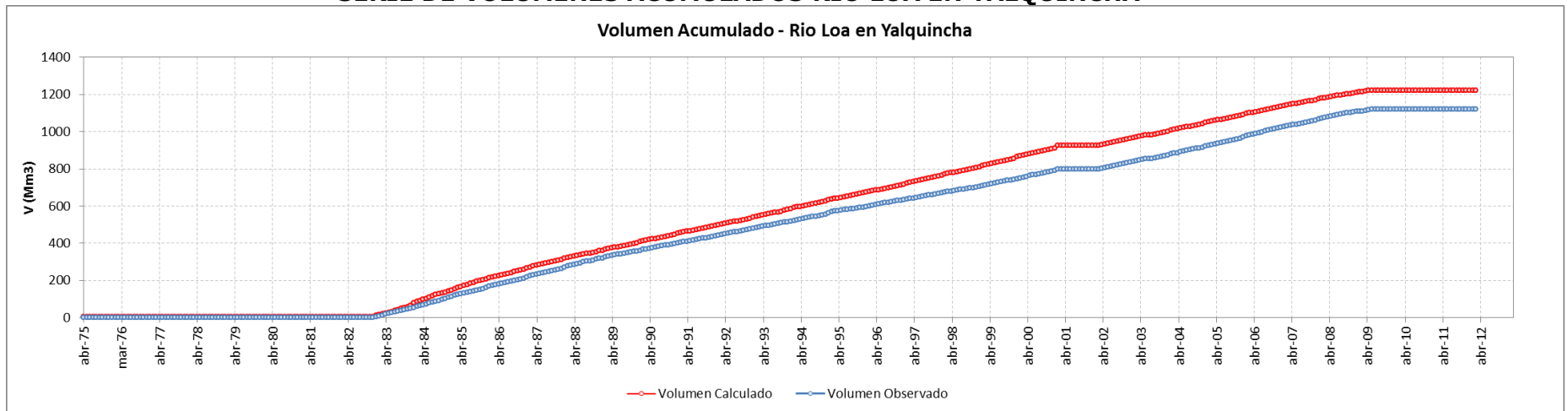
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-11
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO LOA EN YALQUINCHA



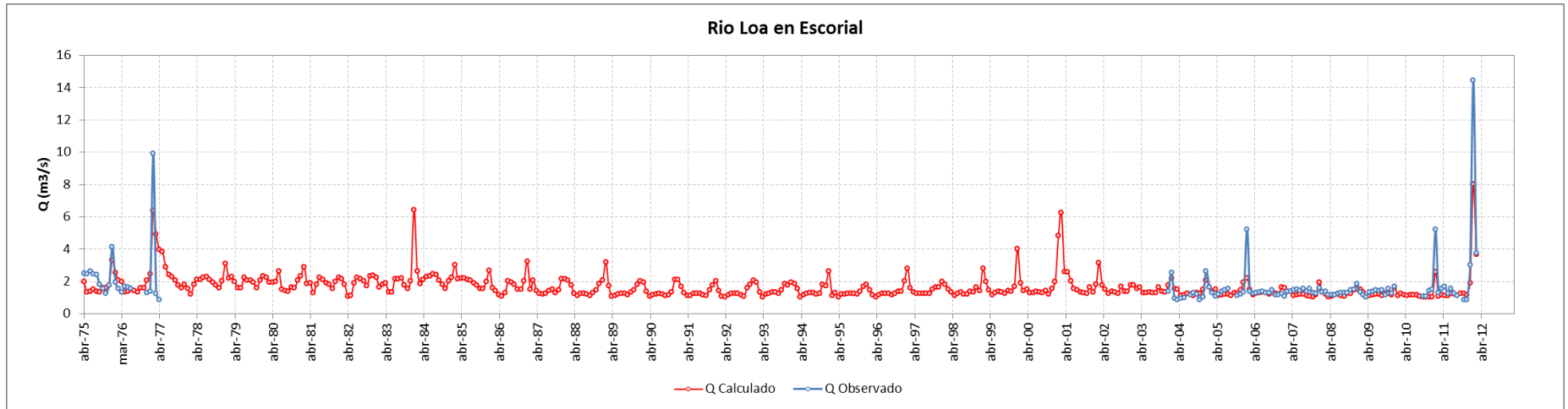
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-12
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS RÍO LOA EN YALQUINCHA



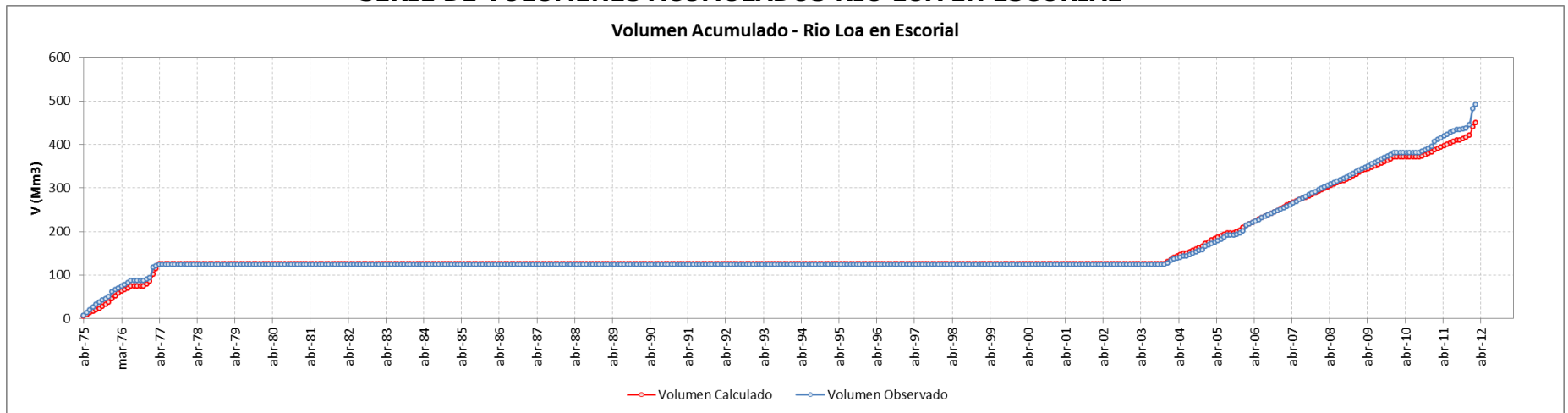
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-13
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO LOA EN ESCORIAL



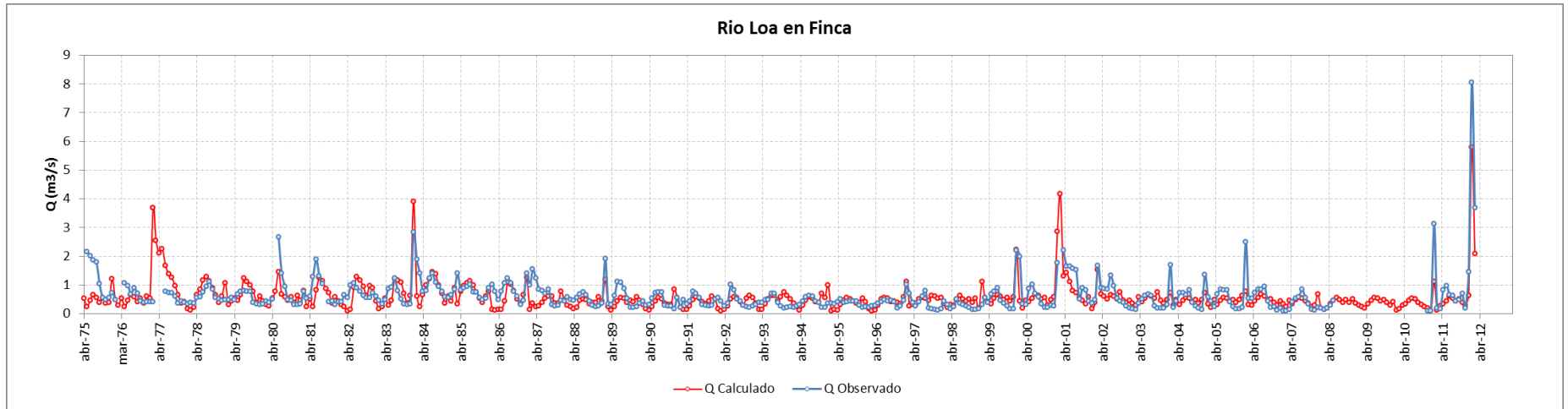
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-14
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS RÍO LOA EN ESCORIAL



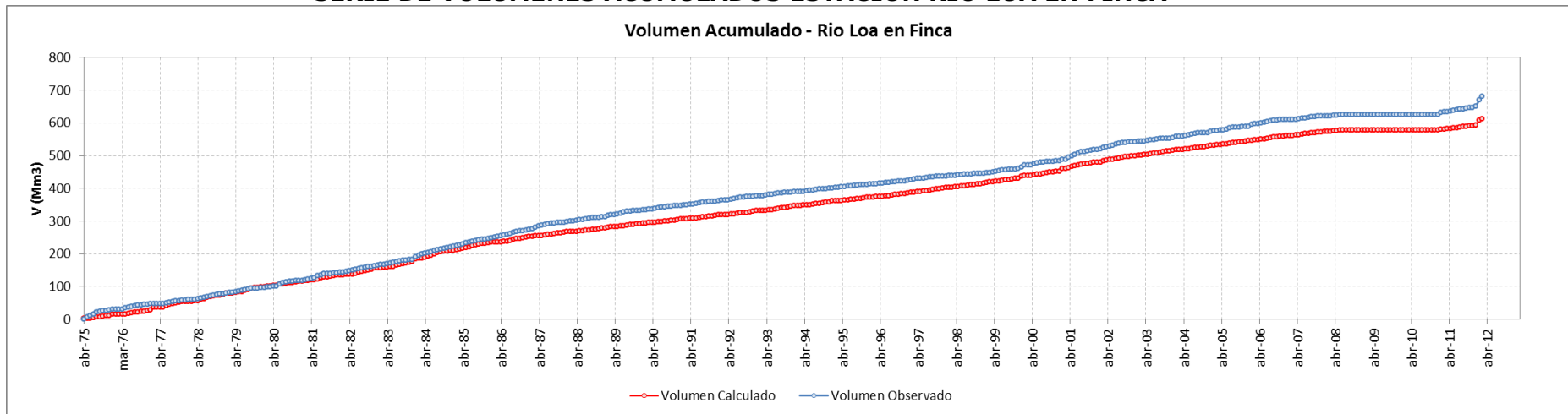
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-15
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO LOA EN FINCA



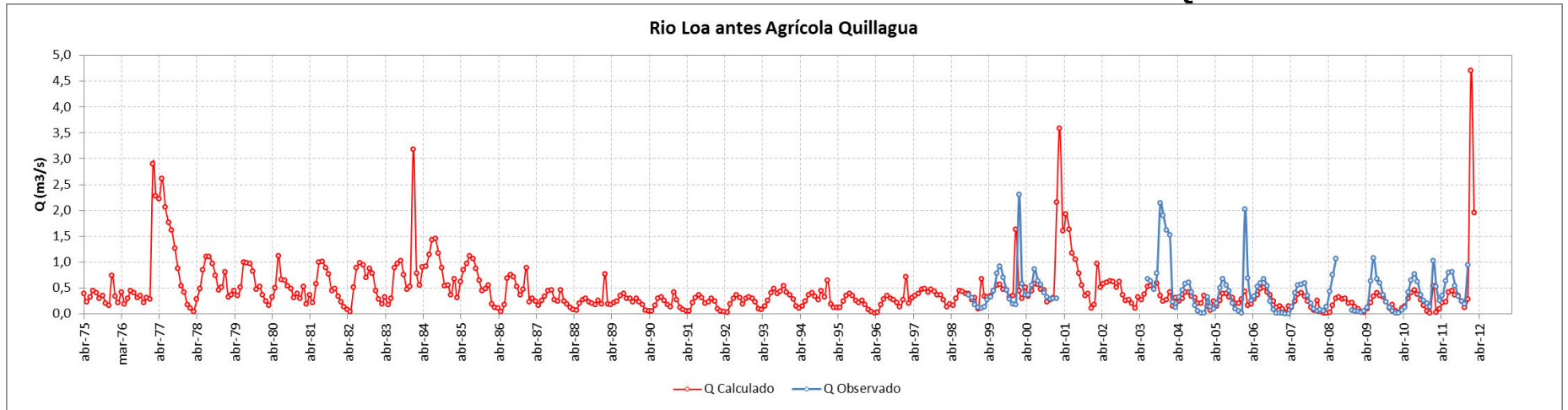
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-16
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO LOA EN FINCA



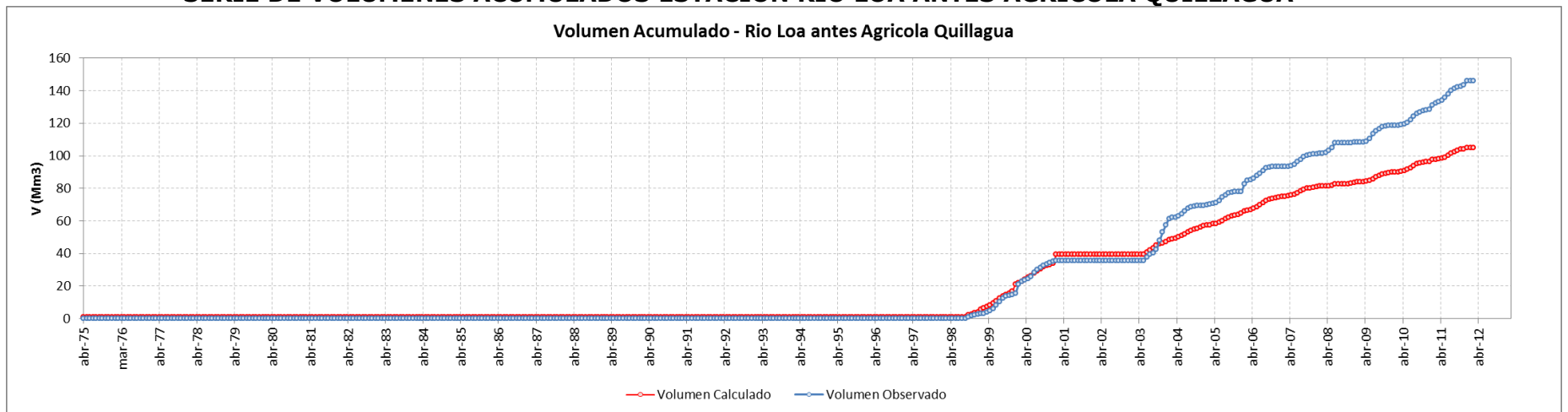
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-17
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO LOA ANTES AGRÍCOLA QUILLAGUA



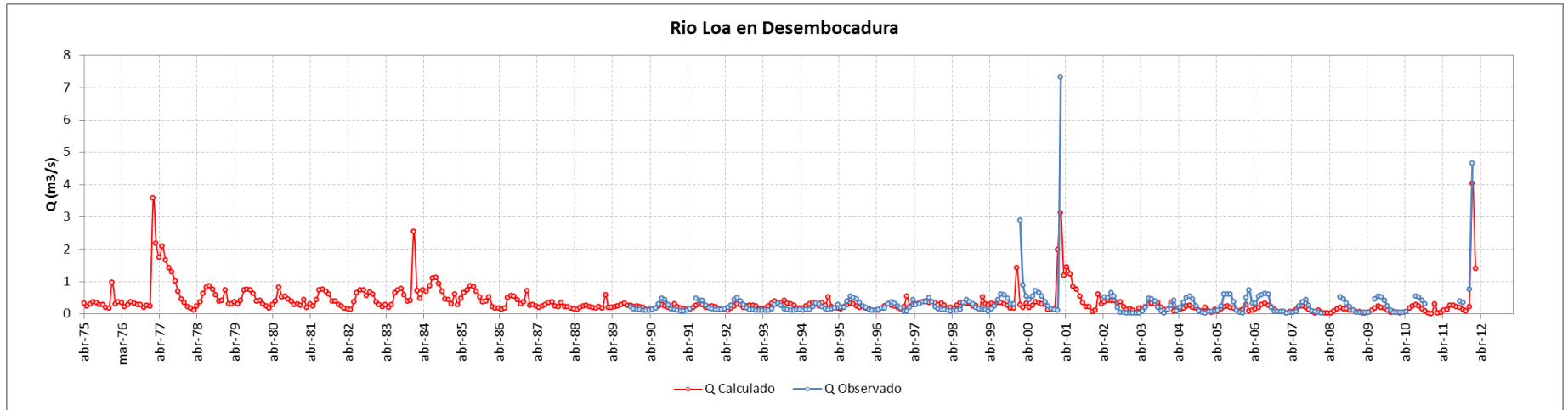
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-18
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO LOA ANTES AGRÍCOLA QUILLAGUA



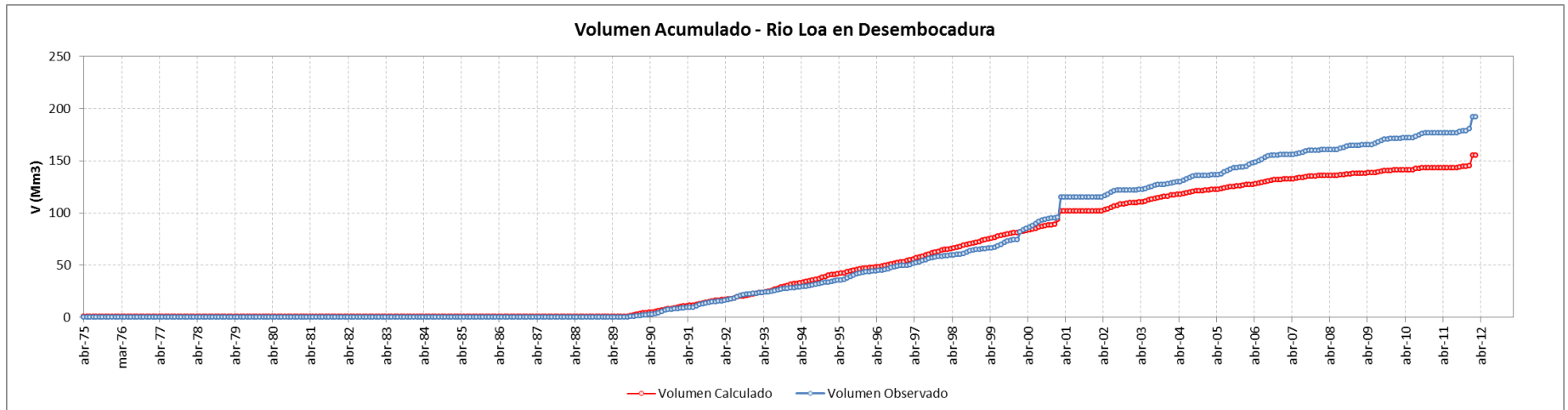
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-19
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO LOA EN DESEMBOCADURA



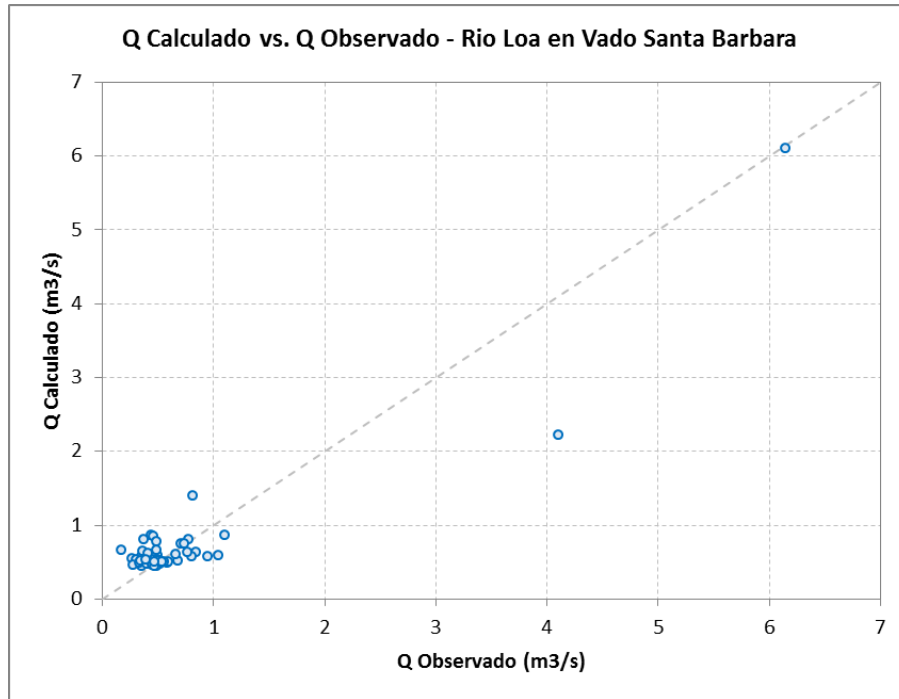
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-20
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO LOA EN DESEMBOCADURA



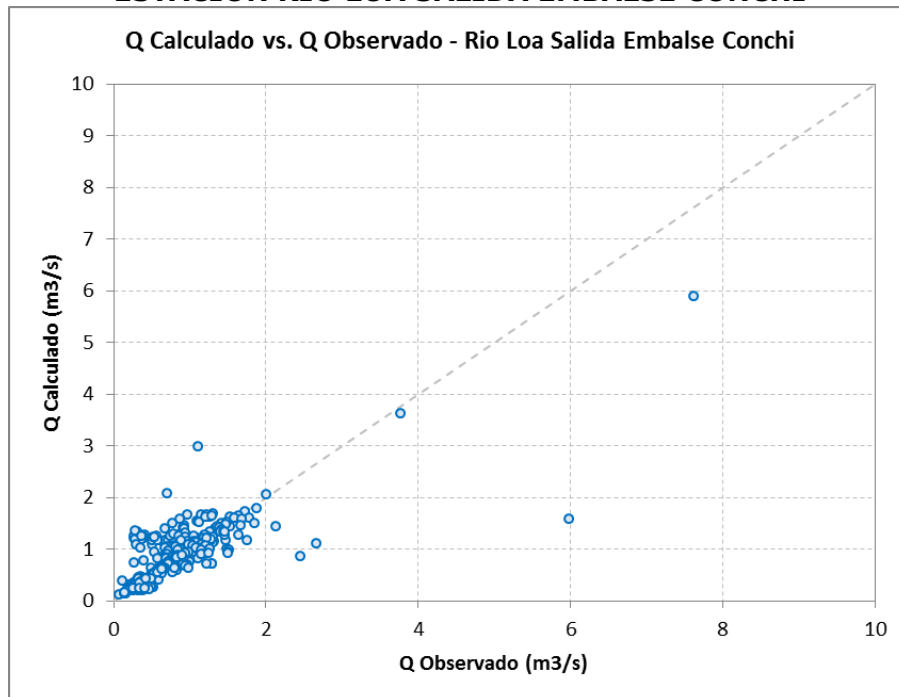
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-21
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO LOA EN VADO SANTA BARBARA



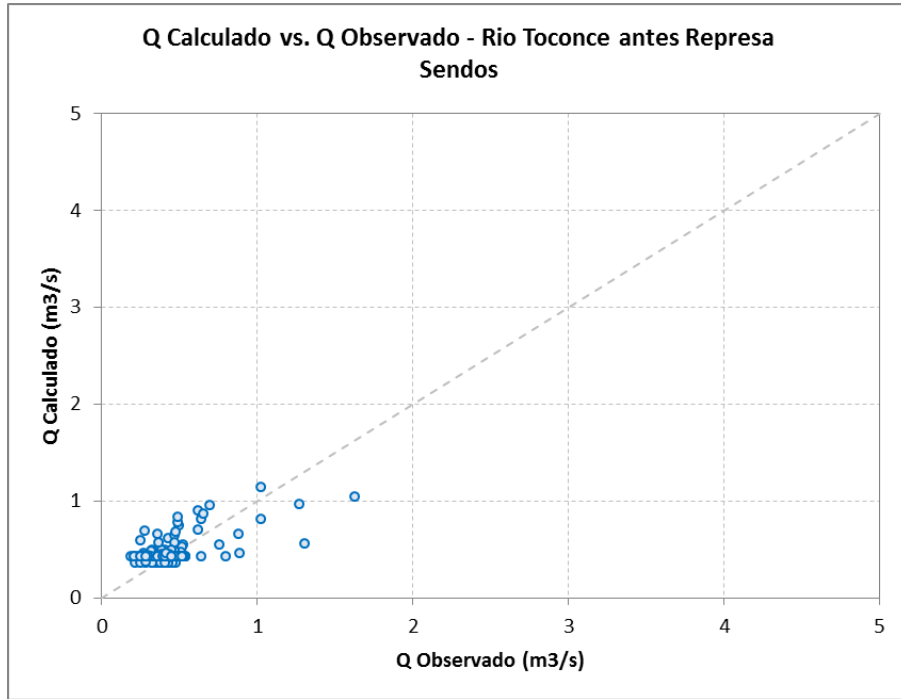
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-22
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO LOA SALIDA EMBALSE CONCHI



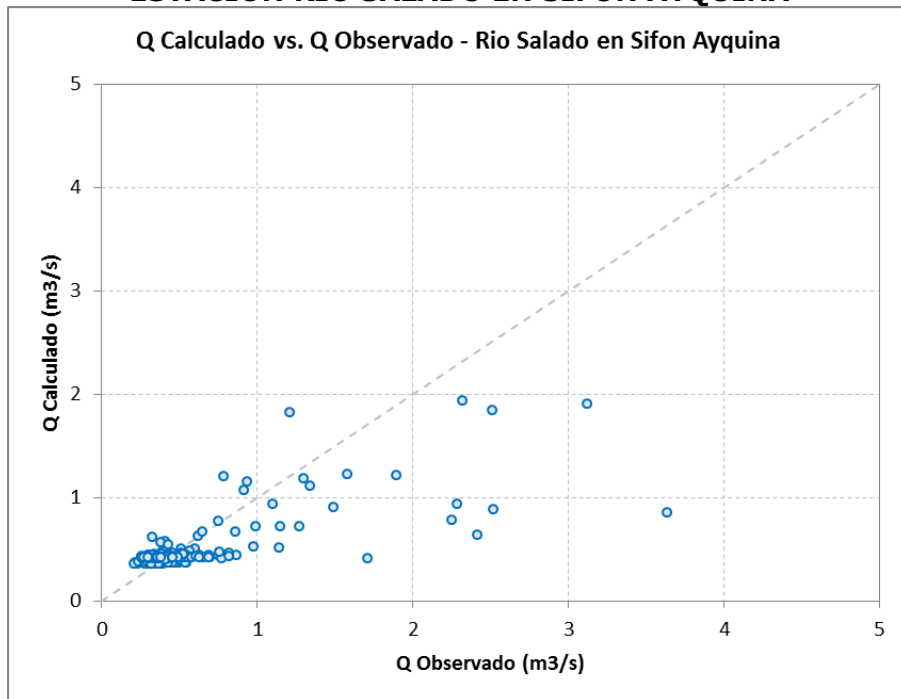
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-23
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO TOCONCE ANTES REPRESA SENDOS



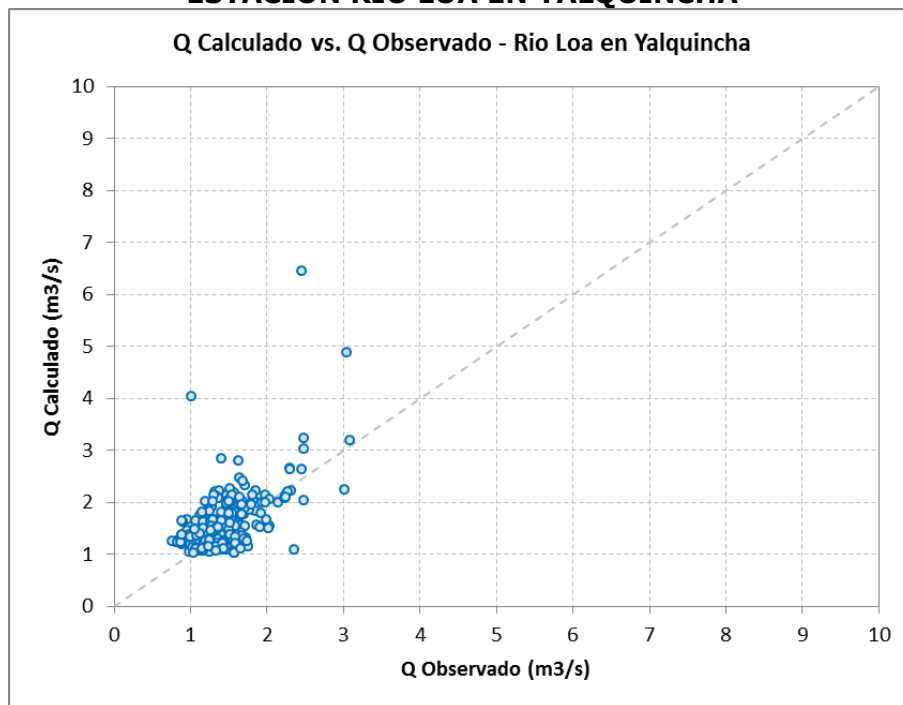
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-24
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO SALADO EN SIFÓN AYQUINA



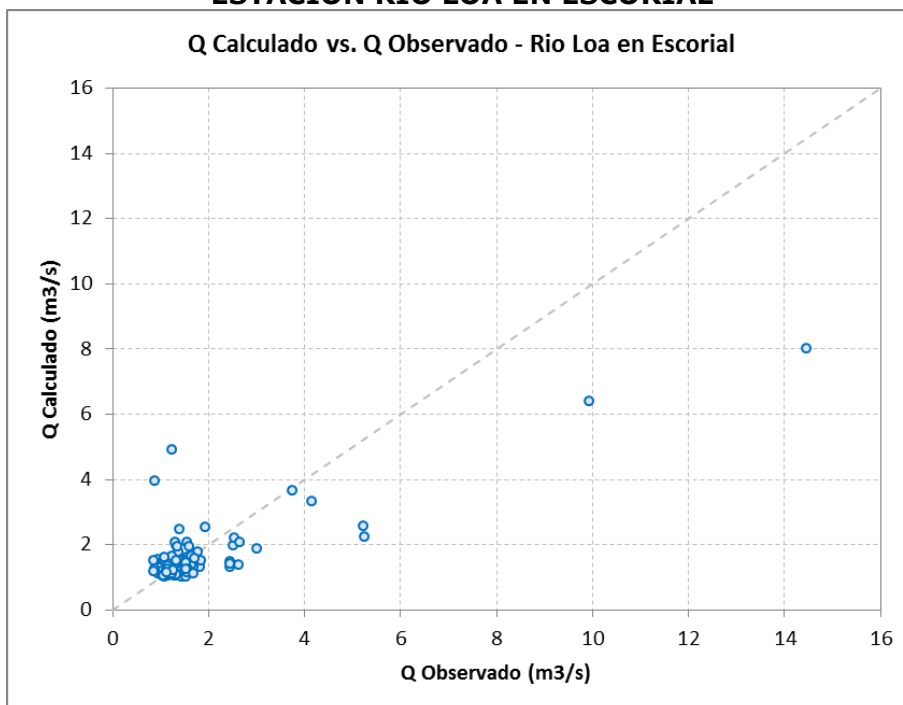
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-25
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO LOA EN YALQUINCHA



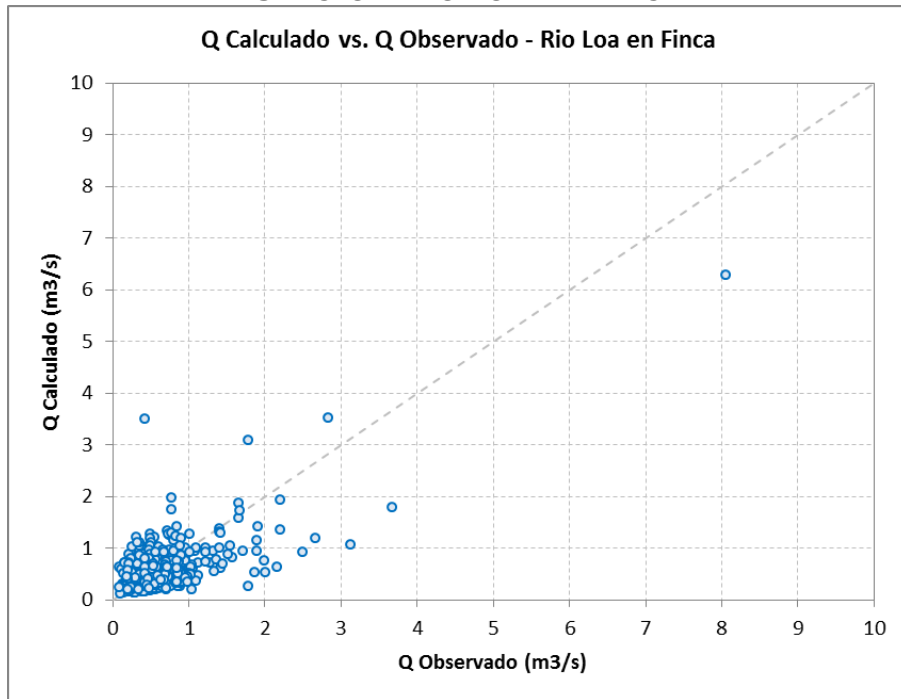
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-26
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO LOA EN ESCORIAL



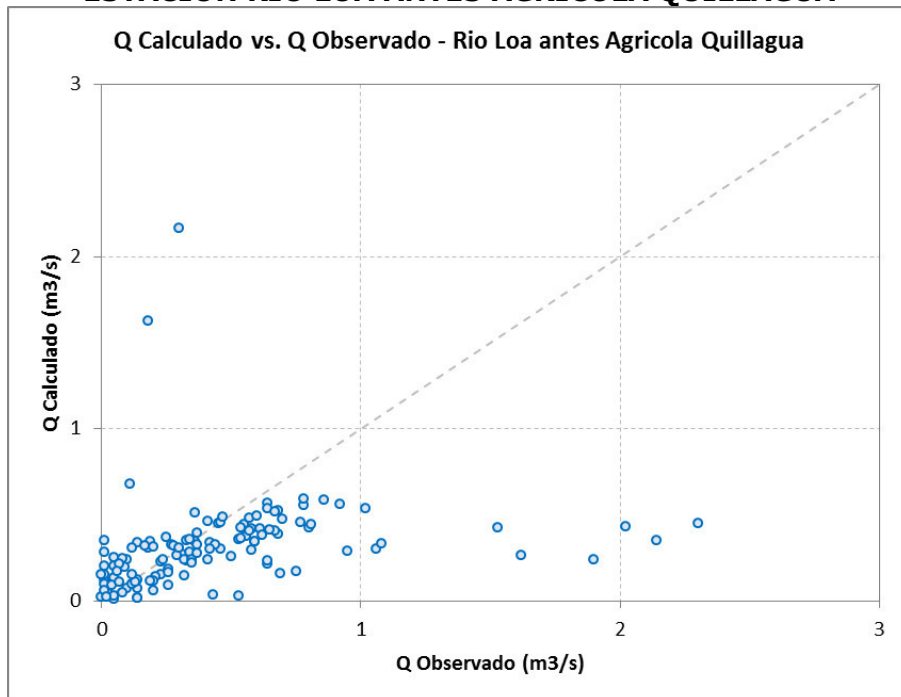
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-27
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO LOA EN FINCA



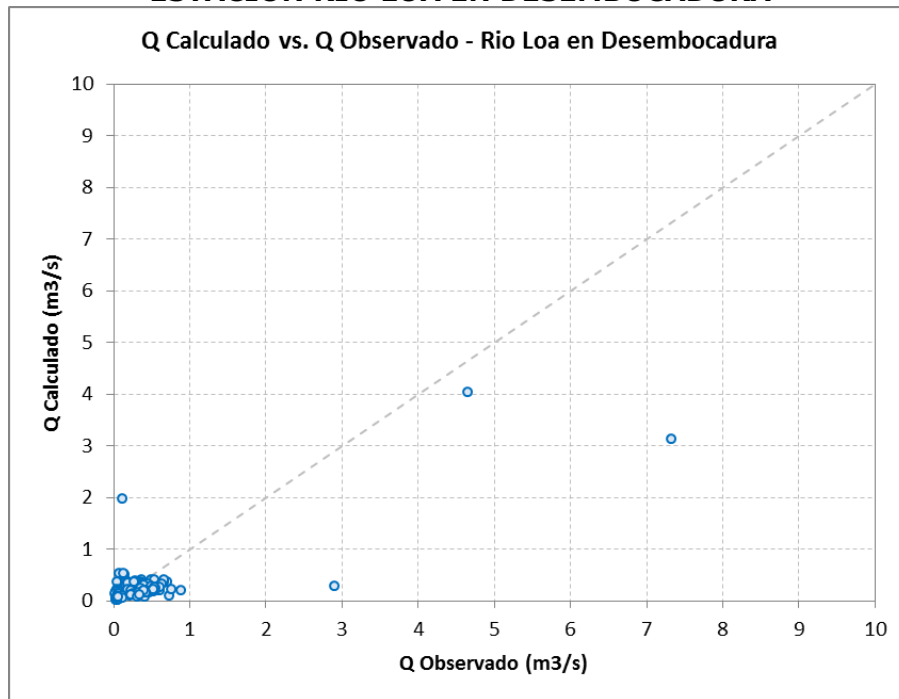
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-28
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO LOA ANTES AGRÍCOLA QUILLAGUA



Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.1-29
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO LOA EN DESEMBOCADURA



Fuente: Elaboración Propia.

CUADRO 9.1-1
ESTADÍSTICOS OBTENIDOS LUEGO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN

Estación	R ²	RMS (m ³ /s)	RMSN	Desv. Estandar (m ³ /s)	Error Medio (m ³ /s)	Error Abs. Medio (m ³ /s)	Error Típico (m ³ /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.

9.2. Análisis de la Calibración Obtenida

A partir de los resultados obtenidos en la calibración presentados anteriormente, se concluye los siguientes conceptos.

En base a los resultados obtenidos, la cuenca del río Salado se considera calibrada de manera satisfactoria. Si bien este sector presenta captaciones puntuales que pudieran afectar las variaciones de caudal, éste se encuentra bastante controlado por los afloramientos desde el acuífero que generan el caudal base del cauce. Por lo tanto, la calibración se obtuvo por medio del ajuste de parámetros del acuífero sobre la variación del caudal captado, del cual no se tiene conocimiento de su valor. De igual forma se aplicó un coeficiente de uso promedio a las captaciones puntuales de un 82% durante su periodo de uso, el que comienza en la fecha en que sus derechos fueron otorgados.

Para el río Loa se consideró en la calibración la estación Río Loa en Vado Santa Barbara, la cual a pesar de tener pocos años de información entrega una estimación de los caudales de entrada al embalse. Justamente este elemento es de gran importancia en la calibración de la cuenca, puesto que controla la variación estacional del flujo base hasta la desembocadura. La descarga del embalse se ajustó por medio de una captación puntual definida a los pies del embalse con un caudal correspondiente a la sumatoria de las demandas hídricas de los canales aguas abajo del embalse. De esta forma desde el año 1986 en adelante el ajuste es correcto, pero existen problemas en los años anteriores. Esto se justifica en que en ese periodo el flujo base de entrada al embalse es mayor a lo registrado luego del año 1986, por lo que el embalse alcanza su volumen de

almacenamiento máximo y pierde su efecto de control sobre el caudal del cauce. La razón de este aumento en el flujo base es que en el año 1986 comienzan a operar las aducciones de ESSAN en Quinchamale y Lequena con un caudal de derecho de 850 l/s. Por lo tanto se estima que durante el primer periodo debió existir alguna captación de la cual se desconoce su existencia o bien aquellas de Quinchamale y Lequena ya extraían agua desde el cauce, para de esa forma reducir el caudal de entrada al embalse. De acuerdo a esta incapacidad del embalse de controlar el flujo en los años anteriores a 1986, se observa una calibración deficiente en las estaciones del río Loa aguas abajo del embalse para este primer periodo.

El mismo inconveniente se registra en la estación Río Loa en Yalquincha, donde entre los años 1988 y 1998 existe una disminución del flujo base que no se logra explicar de acuerdo a las demandas existentes en la cuenca para ese periodo, ni asociar a una baja repentina de los afloramientos.

De acuerdo a los problemas de calibración en los primeros años de estudio, asociado a la menor certeza de la información con la que se cuenta, para el sector de Calama se decidió calibrar la estación Río Loa en Escorial que presenta datos desde el año 2004 en adelante. Los resultados obtenidos se ajustan a lo registrado en la estación, que se ubica al inicio de la zona agrícola de la ciudad, lo que es de suma importancia al considerar que en éste sector existe una alta demanda hídrica. De igual forma se considera que los resultados del modelo se ajustan a lo observado en la estación Río Loa en Finca, ubicada al término de la zona agrícola de Calama, donde existe una buena correlación con los peaks de caudales registrados y una excelente similitud respecto a la serie de volúmenes acumulados para el periodo completo de modelación, es decir el modelo predice de manera adecuada los volúmenes de oferta y demanda en el largo plazo.

Para considerar el poblado de Quillagua se utilizó la estación Río Loa antes de Zona Agrícola Quillagua, donde a pesar de no registrar buenos valores estadísticos se considera que se logró modelar de buena forma los caudales bajos y la dinámica del flujo para el periodo considerado. La baja correlación entre lo observado y modelado responde a la imposibilidad de representar la amplitud generada entre los caudales bajos y altos en el sector, lo cual se puede sustentar en la falta de información con la que se cuenta para la representación del sistema del río Loa aguas abajo de la confluencia con el río San Salvador. De igual forma, la modelación representa de buena forma los periodos en que el cauce del río es prácticamente nulo, lo cual se considera como la situación crítica y a la cual se debe prestar mayor atención.

Luego, para la estación Río Loa en Desembocadura se presenta un buen ajuste a los datos históricos donde, al igual que para el sector de Quillagua, existe una mejor representación de los caudales bajos. Sin embargo se consiguió una buena representación de la crecida ocurrida el año 2012/13, la cual se simuló de manera correcta en todas las estaciones de la cuenca sin perder el orden de magnitud frente a los valores registrados.

9.3. Análisis de los Resultados del Modelo

9.3.1. Balances Obtenidos en los Acuíferos Modelados

A continuación, se presentan balances subterráneos medios mensuales en toda la cuenca modelada, así como balances medios en todo el período modelado para cada acuífero. En el largo plazo no se observan variaciones entre cada mes, pues los acuíferos operan saturados durante el periodo de modelación consiguiendo que los flujos de entrada y salida se estabilicen.

Respecto a la operación subterránea de MAGIC, esta se calibró para que los resultados se ajustaran a lo entregado por la modelación subterránea en Modflow. El uso de MAGIC en general ha mostrado una sobreestimación en la recarga superficial (principalmente desde los cauces superficiales), por lo que ha sido necesario disminuir drásticamente los parámetros que la determinan junto al control de los afloramientos que se ven directamente relacionados con la recarga.

Además, la entrada por precipitaciones que MAGIC considera para cada acuífero corresponde únicamente al exceso de precipitación que cae sobre la zona de riego, no considerando recargas laterales, o infiltraciones en sectores altos de la cuenca. Por esto, es que se debió generar zonas de riego sin cultivos asociados para representar de mejor forma la recarga al acuífero.

No obstante lo anterior, los valores siguientes son representativos para el relleno activo del acuífero, es decir, el que es susceptible a explotación antrópica.

El Cuadro 9.3-1 detalla los resultados mencionados.

CUADRO 9.3-1
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA CADA ACUÍFERO MODELADO (m³/s)

BALANCE	AC-01 Quinchamale	AC-02 Río San Pedro	AC-03 Río Salado	AC-04 Pampa Llalqui	AC-05 Calama	AC-06 Maria Elena	AC-07 Salar de Llamara	AC-08 Río Loa a Desembocadura	Suma
Entradas									
Subterránea	0,71	1,42	2,11	0,16	0,17	0,06	0,30	0,10	5,02
Recarga PP+Riego	0,21	0,07	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,36
Recarga Ríos	0,16	0,19	0,32	0,12	1,03	0,00	0,00	0,54	2,36
Recarga Canales	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08
Salidas									
Subterránea	-0,02	-0,71	-0,16	-0,15	-0,16	-0,04	-0,07	-0,04	-1,34
Pozos	0,00	-0,96	-0,46	-0,01	-0,05	0,00	-0,02	0,00	-1,50
Afloramientos	-1,03	0,00	-1,81	-0,01	-1,13	0,00	-0,21	-0,77	-4,96
Total Entradas	1,07	1,68	2,44	0,27	1,36	0,06	0,30	0,64	7,82
Total Salidas*	-1,05	-1,67	-2,43	-0,18	-1,33	-0,04	-0,29	-0,81	-7,80
Balance	0,02	0,01	0,01	0,10	0,02	0,02	0,01	-0,16	0,02

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo al balance, se observa un balance total positivo, pero esta información es solo referencial ya que MAGIC no es una herramienta que represente de manera efectiva los acuíferos. La poca seguridad que entrega el programa respecto a esta zona es debido a una serie de simplificaciones tanto en la geometría de los acuíferos como en su interacción con el resto de los elementos.

De igual forma, al analizar los resultados por acuífero, se destaca la explotación en la cuenca del río San Pedro (AC-02) y los afloramientos que controlan el flujo base del río Salado. Otro sector importante de afloramientos es el correspondiente al acuífero de Calama, donde se observa una importante vertiente como Ojos de Opache y afloramientos en el sector aguas abajo de la confluencia entre los ríos Loa y Salado. Por otra parte, el caudal de afloramiento correspondiente al acuífero río Loa a

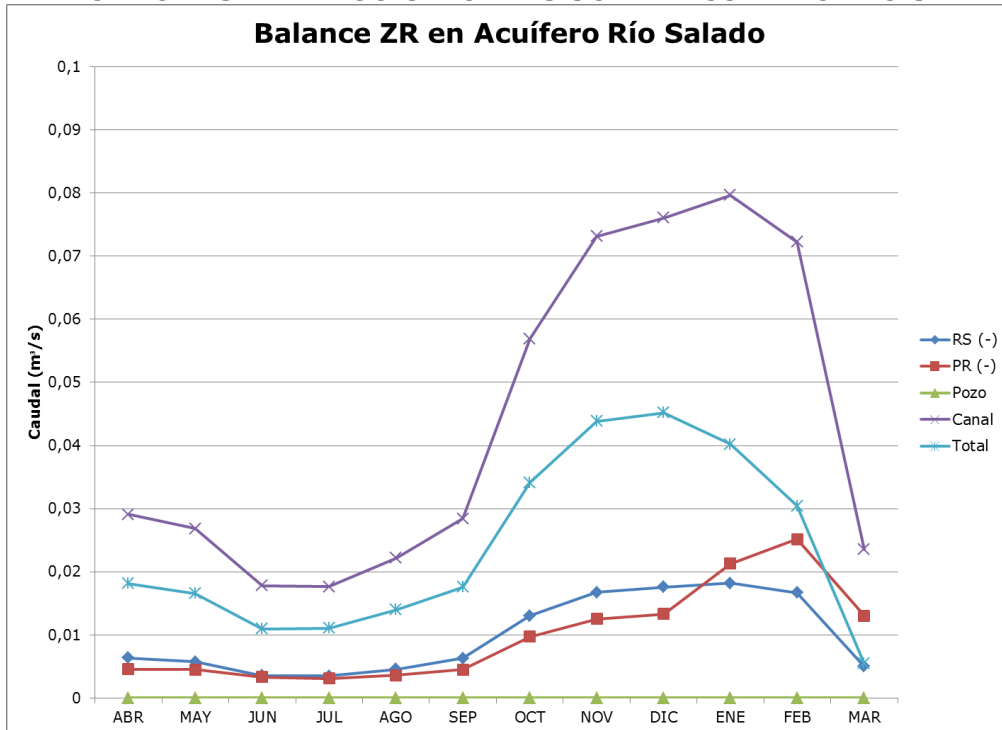
Desembocadura corresponde en gran parte a lo que ocurre en el sector de confluencia con el río San Salvador.

9.3.2. Balances Obtenidos en las Zonas de Riego

A partir de los resultados obtenidos en MAGIC, se realizaron balances en las 13 zonas de riego y discretizadas según los sectores acuíferos definidos. Por lo tanto, se presenta las diferentes entradas y salidas a las zonas de riego que pertenecen a los acuíferos del río Salado y Calama pues son los únicos con cultivos asignados. La nomenclatura "RS" quiere decir retorno superficial a los cauces naturales, y "PR" percolación sobre el acuífero correspondiente. Estas definiciones se relacionan con las zonas de riego generadas en MAGIC, donde el caudal afluente se subdivide en 3 flujos, aquel aprovechable por la planta, el que percola al acuífero y lo que retorna al cauce superficial sin ser utilizado. De acuerdo a esto se generan las Figuras 9.3-1 y 9.3-2, que presentan el balance hídrico en las zonas de riego ubicadas sobre los acuíferos del río Salado y Calama.

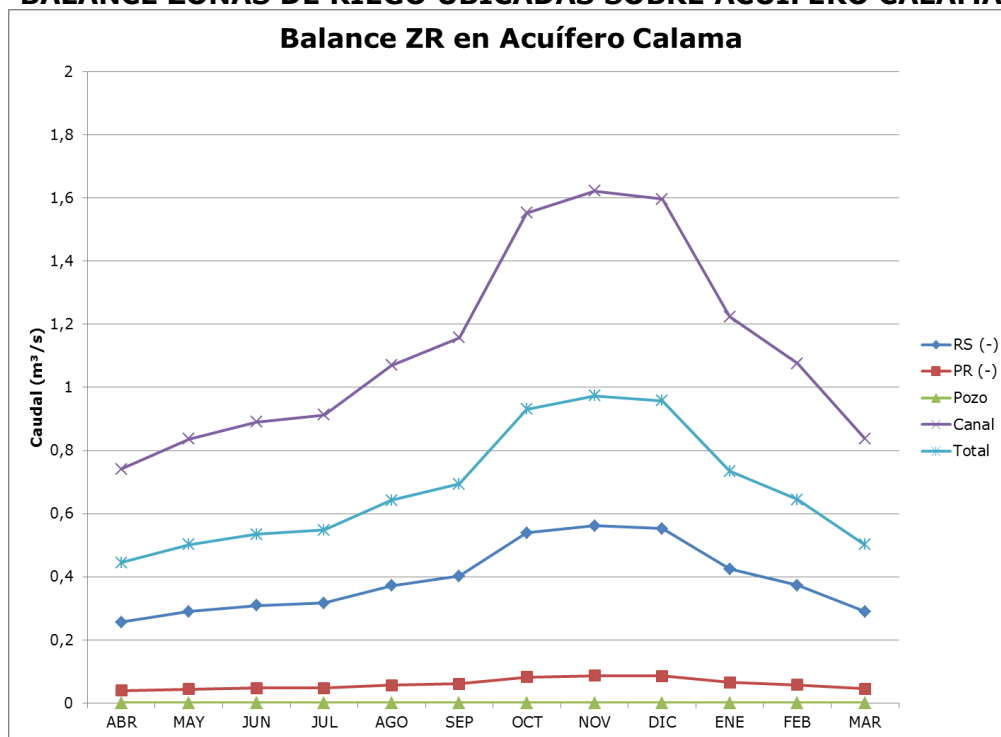
Se observa que en ninguno de los dos sectores existen pozos de bombeo asociados a las zonas de riego, siendo la única entrada lo distribuido por los canales. Los caudales asociados a la percolación y retorno superficial son considerados negativos en el balance debido a que éstos salen de la zona de riego hacia el acuífero y cauce superficial respectivamente. Por último, el total corresponde a la sumatoria de entradas y salidas de caudal a las zonas de riego, es decir, es el flujo que efectivamente puede llegar a ser aprovechado por los cultivos.

**FIGURA 9.3-1
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO RÍO SALADO**



Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 9.3-1
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO CALAMA



Fuente: Elaboración Propia.

9.3.3. Satisfacción Demanda Hídrica en Zonas de Riego

A partir de los resultados anteriores, se estimó la satisfacción de la demanda hídrica abastecida, para cada zona de riego, y en cada mes dentro del período de modelación.

La satisfacción de la demanda se estimó de la siguiente manera:

$$Satisfacción\ Demanda = \frac{Q\ Disponible\ para\ Riego}{NNM\ de\ cada\ ZR \cdot Sup.\ Cultivable}$$

El caudal disponible se obtuvo desde los resultados de MAGIC para cada zona de riego, y corresponde al caudal efectivamente entregado para el regadío de los cultivos, así como la NNM de cada zona de riego. Estos resultados se presentan en el Cuadro 9.3-2.

CUADRO 9.3-2
SATISFACCIÓN DEMANDA ZONA DE RIEGO POR ACUÍFERO

Zona de Riego	Localidad	Q Demandado (m3/s)	Q Afluyente (m3/s)	Seguridad de Riego
ZR-01	Lasana	0,253	0,251	98,9%
ZR-02	Chiu-Chiu	0,253	0,232	91,5%
ZR-03	Toconce	0,006	0,004	67,1%
ZR-04	Caspana	0,023	0,009	37,3%
ZR-05	Ayquina	0,003	0,003	97,1%
ZR-06	Turi	0,039	0,038	99,2%
ZR-07	Paniri	0,003	0,003	96,2%
ZR-08	Cupo	0,012	0,012	94,5%
ZR-09	Calama	0,046	0,044	97,0%
ZR-10	Calama	0,596	0,594	99,8%
ZR-11	Calama	0,424	0,407	96,0%
ZR-12	Calama	0,011	0,011	99,6%
ZR-13	Quillagua	0,003	0,003	99,1%

Fuente: Elaboración Propia.

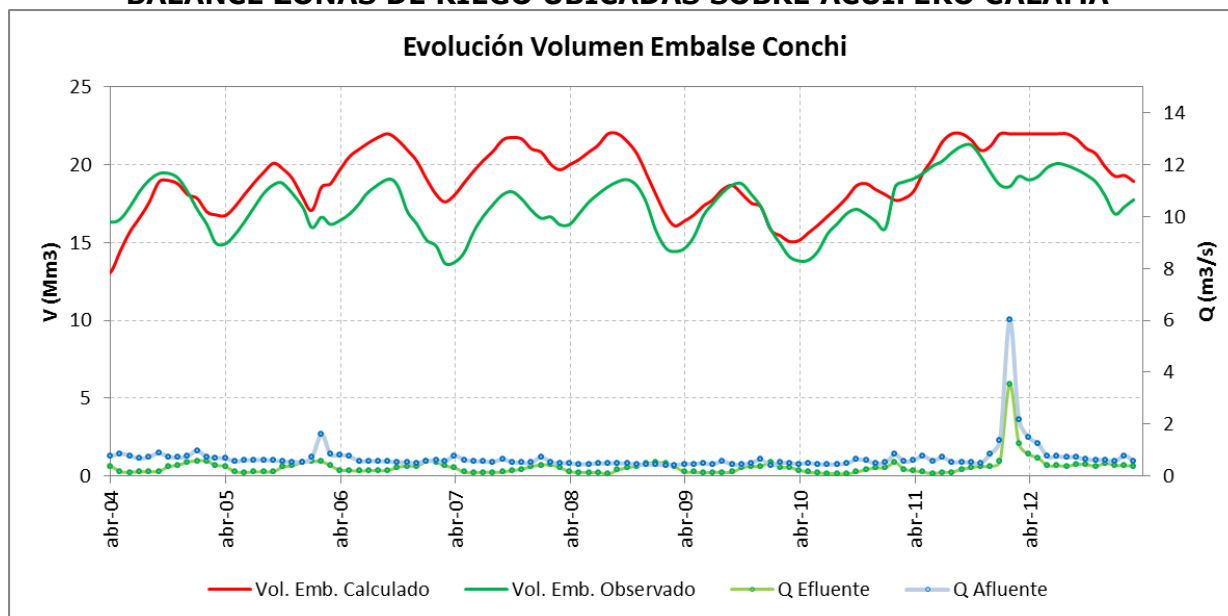
9.3.4. Análisis Volumétrico Embalse Conchi

El embalse Conchi fue representado mediante las herramientas de simulación de embalses que posee MAGIC. La principal dificultad que presenta esta herramienta, es que no permite adecuar una regla de operación del embalse fuera de los balances volumétricos que MAGIC realiza internamente. MAGIC sugiere en su manual modificar el código fuente para atender reglas de operación específicas de cada caso, situación que no es posible realizar.

Por esta razón, se decidió asignar una captación puntual al embalse que demandara caudal a los pies de esta para devolver la totalidad en el nodo siguiente. El caudal asignado a esta captación corresponde a la sumatoria de demandas de los canales aguas debajo del embalse. De esta forma se logró reproducir la curva de operación del embalse desde el año 1986 en adelante, ya que previa a esta fecha existe un caudal de entrada mayor al registrado lo que produce que el volumen máximo del embalse sea alcanzado. Bajo esa circunstancia, el embalse solo entrega caudal como rebase, sin considerar ninguna regla de operación hasta el momento en que se comienza a vaciar y estabilizar en un volumen promedio de 15,06 (Hm3) de un máximo de 22 (Hm3).

En la Figura 9.3-3 se aprecia la evolución del volumen embalsado modelado frente a la información oficial del volumen embalsado que solo se conoce desde el año 2004 en adelante.

**FIGURA 9.3-3
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO CALAMA**



9.3.5. Cumplimiento Caudal Ecológico Loa Medio y Bajo

Se analiza el cumplimiento del caudal ecológico en dos tramos del río Loa comprendidos por:

- Tramo 1: Desde estación fluviométrica Río Loa en Finca hasta su confluencia con río San Salvador. Presenta un caudal ecológico de 140 l/s de acuerdo al cálculo realizado por Arrau Ingenieros Consultores en el estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta (2012). Para el análisis de éste tramo se utilizaron los resultados de la modelación en MAGIC de los nodos 90 a 92.
- Tramo 2: Desde la confluencia entre los ríos Loa y San Salvador hasta la estación fluviométrica Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua. Presenta un caudal ecológico de 66 l/s de acuerdo al cálculo realizado por Arrau Ingenieros Consultores en el estudio Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta (2012). Para el análisis de este tramo se utilizaron los resultados de la modelación en MAGIC de los nodos 104 a 108.

El Cuadro 9.3-3 presenta el porcentaje de situaciones de no cumplimiento del caudal ecológico en el nodo correspondiente de acuerdo al caudal ecológico de cada tramo frente a un total de 38 años analizados. Por otro lado, en el Cuadro 9.3-4 se muestra el caudal medio necesario para su cumplimiento.

**CUADRO 9.3-3
SITUACIONES DE NO CUMPLIMIENTO DEL CAUDAL ECOLÓGICO**

Nodo / Mes	Tramo 1			Tramo 2				
	NO-090	NO-091	NO-092	NO-104	NO-105	NO-106	NO-107	NO-108
Abr	18%	37%	50%	0%	0%	18%	0%	16%
May	0%	8%	63%	0%	0%	5%	0%	24%
Jun	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Jul	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ago	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Sep	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	0%
Oct	0%	0%	16%	0%	0%	0%	0%	0%
Nov	0%	0%	39%	0%	0%	0%	0%	0%
Dic	0%	3%	21%	0%	0%	3%	0%	5%
Ene	3%	13%	13%	0%	3%	8%	0%	3%
Feb	8%	26%	61%	0%	0%	13%	0%	5%
Mar	11%	45%	84%	0%	0%	32%	0%	24%

Fuente: Elaboración Propia.

**CUADRO 9.3-4
CAUDAL MEDIO DE NO CUMPLIMIENTO DEL CAUDAL ECOLÓGICO (l/s)**

Nodo / Mes	Tramo 1			Tramo 2				
	NO-090	NO-091	NO-092	NO-104	NO-105	NO-106	NO-107	NO-108
Abr	10,3	65,0	111,6	0,0	0,0	31,7	0,0	31,5
May	0,0	51,0	69,0	0,0	0,0	12,0	0,0	31,1
Jun	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Jul	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ago	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sep	0,0	0,0	18,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oct	0,0	0,0	26,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nov	0,0	0,0	28,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dic	0,0	39,0	48,1	0,0	0,0	48,0	0,0	6,0
Ene	29,0	55,2	136,0	0,0	2,0	28,0	0,0	49,0
Feb	28,0	62,1	78,8	0,0	0,0	34,8	0,0	18,5
Mar	21,5	49,1	100,3	0,0	0,0	41,0	0,0	28,3

Fuente: Elaboración Propia.

9.4. Análisis de Sensibilidad de la Modelación

Este análisis se realiza con el objetivo de evaluar la sensibilidad del modelo y su calibración frente a la variación de algunos de sus parámetros. De acuerdo a esto se decidió modificar tanto el coeficiente de almacenamiento de los acuíferos como el coeficiente de percolación en las zonas de riego, con lo cual se analizan dos elementos importantes en la conformación del modelo.

9.4.1.1. Análisis de Sensibilidad al Coeficiente de Percolación

La verificación de la sensibilidad del modelo al coeficiente de percolación se definió en base a una variación de este parámetro en un 10%. El análisis se centró en las estaciones de calibración Río Loa en Yalquincha y Río Loa en Finca las cuales se ubican al inicio y final de las zonas de riego de Calama. El resultado de este análisis se presenta en el Cuadro 9.4-1, el cual se construye en base a los parámetros de calibración de las estaciones mencionadas.

**CUADRO 9.4-1
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL COEFICIENTE DE PERCOLACIÓN**

Nodo	Río Loa en Yalquincha			Río Loa en Finca			
	Parámetro Calibración	Valor Calibrado	Variación Porcentual		Valor Calibrado	Variación Porcentual	
			-10%	10%		-10%	10%
R2	0,340	0,3%	0,3%	0,450	-0,2%	-0,4%	
RMS	0,463	0,2%	1,0%	0,450	0,1%	0,2%	
RMSN	0,199	0,2%	1,0%	0,060	0,1%	0,2%	
DESV EST	0,620	0,1%	0,3%	0,550	0,0%	0,1%	
ERROR MEDIO	0,124	1,4%	5,6%	-0,060	77,4%	61,8%	
ERROR ABS MED	0,288	0,4%	1,5%	0,280	0,2%	0,4%	
ERROR TÍPICO	0,445	0,0%	0,2%	0,350	0,0%	0,4%	

Fuente: Elaboración Propia.

En base a los resultados no se verifica una variación importante en la calibración del modelo, exceptuando el parámetro correspondiente al error medio para el NO-090. En este punto se observan variaciones superiores al 60%, pero éstas se justifican en su bajo valor, es decir si bien porcentualmente es una variación importante, en términos numéricos lo deja de ser.

9.4.1.2. Análisis de Sensibilidad al Coeficiente de Almacenamiento

Este parámetro constituye un parámetro importante en la construcción geométrica de los acuíferos al controlar el volumen máximo de almacenamiento. El análisis se verifica en base a los balances subterráneos del modelo de acuerdo a los resultados entregados por MAGIC. El Cuadro 9.4-2 contiene los resultados obtenidos para el balance subterráneo de la cuenca completa del río Loa y aquel correspondiente al acuífero de Calama.

CUADRO 9.4-2
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

BALANCE	Total			Acuífero Calama			
	Caudal de Balance	Valor Calibrado (m ³ /s)	Factor de Variación		Valor Calibrado (m ³ /s)	Factor de Variación	
			0,5	2		0,5	2
Entradas							
Subterránea	1,28	-1,4%	0,8%	0,11	0,0%	0,0%	
Recarga PP+Riego	0,37	-0,5%	-0,5%	0,09	0,0%	-0,1%	
Recarga Ríos	3,04	0,7%	1,2%	1,26	-0,2%	1,0%	
Recarga Canales	0,09	0,0%	0,0%	0,09	0,0%	0,0%	
Salidas							
Subterránea	-1,28	-1,4%	0,8%	-0,16	0,0%	0,0%	
Pozos	-1,51	0,0%	0,0%	-0,05	0,0%	0,0%	
Afloramientos	-5,24	2,5%	1,9%	-1,34	-0,2%	1,0%	
Total Recargas*	3,49	0,6%	1,0%	1,44	-0,2%	0,9%	
Total Salidas*	-6,75	1,9%	1,5%	-1,39	-0,2%	0,9%	
Recarga (PP+R+C)	0,45	-0,4%	-0,4%	0,17	0,0%	0,0%	
Afloramiento Neto	-2,20	4,8%	2,8%	-0,07	0,1%	0,0%	
Balance	-3,25	3,3%	2,0%	0,05	-0,2%	-0,2%	

Fuente: Elaboración Propia.

En este caso se decidió duplicar y disminuir a la mitad el valor del coeficiente de almacenamiento, con lo que no se observan mayores variaciones en el balance subterráneo. El parámetro más afectado es el afloramiento neto en un 4,8% que en términos numéricos corresponde a 105 l/s en toda la cuenca. Para comprender la importancia de esta variación, en el Cuadro 9.4-3 se presenta el valor de los parámetros de calibración para la estación fluviométrica Río Loa en Desembocadura.

CUADRO 9.4-3
PARÁMETROS DE CALIBRACION NODO DE CIERRE

Parámetro Calibración	Río Loa en Desembocadura	
	Valor Calibrado	Variación Porcentual
R²	0,630	4%
RMS	0,380	1%
RMSN	0,050	1%
DESV EST	0,480	8%
ERROR MEDIO	-0,050	-22%
ERROR ABS MED	0,160	0%
ERROR TÍPICO	0,220	-30%

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que las mayores variaciones se presentan en el error medio y típico. En el primer caso, el valor numérico es bajo por lo que la variación no es de importancia. En cuanto al error típico, este indica que la media muestral presenta mayor coherencia con la media de la estadística observada. Esto no significa necesariamente un mejor ajuste a la curva de calibración, como si lo indican parámetros como el coeficiente de correlación (R^2) o el error cuadrático medio (RMS). Estos indicadores analizan las variaciones de manera puntual y no de la media muestral y a su vez se mantienen en intervalos aceptables de variación de acuerdo al factor de sensibilidad aplicado para el coeficiente de almacenamiento.

10. CORRECCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO SUBTERRÁNEO

10.1. Descripción y Análisis del Modelo Subterráneo

Como parte del estudio "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. Este modelo fue desarrollado en Visual MODFLOW Flex 2012.1 y no fue sometido a un proceso de calibración.

El Cuadro 10.1-1 muestra las principales características espaciales del modelo.

**CUADRO 10.1-1
CARACTERÍSTICAS MODELO MATRAZ**

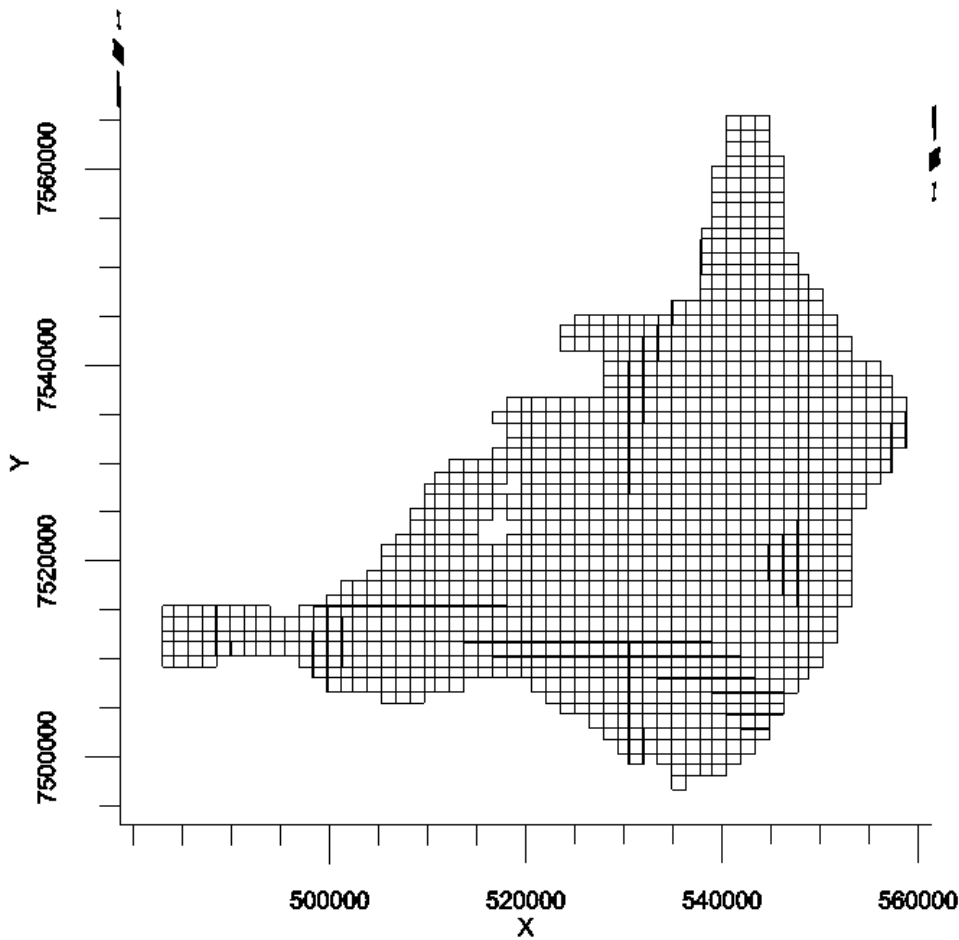
PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Límite Norte (UTM)	m	7.566.206
Límite Sur (UTM)	m	7.493.206
Límite Oeste (UTM)	m	478.635
Límite Este (UTM)	m	561.490
Nº Filas	-	200
Nº Columnas	-	227
Nº Estratos	-	3
Nº Celdas	-	136.200
Tamaño Celdas	m x m	365 x 365

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 10.1-1, se presenta el dominio espacial del modelo elaborado por Matraz y desarrollado en Visual MODFLOW Flex.

Previo a la realización de su calibración por parte de KP, el modelo fue sometido a un profundo análisis de su construcción y datos de entrada en general, de manera tal de identificar problemas y posibles modificaciones previo al proceso mismo de calibración. A continuación se describen las principales observaciones al modelo desarrollado por Matraz.

FIGURA 10.1-1
DOMINIO DEL MODELO CALAMA DE MATRAZ



Fuente: Modelo Matraz (2012) realizado en Visual MODFLOW Flex.

10.1.1. Geometría del Modelo Matraz

El primer punto analizado en cuanto a la geometría del modelo corresponde al nivel de terreno. En este sentido, se compararon los niveles superficiales del modelo con la superficie generada en base a un raster utilizando como fuente el modelo digital de elevación SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) desarrollado por la NASA. Los resultados de este análisis mostraron diferencias significativas de nivel en el sector Norte del modelo, aguas abajo del embalse Conchi, observándose hasta 327 metros de diferencia. Lo anterior provocaba, además, que la cota del río Loa en ese sector fuera mucho más elevada que la realidad. Diferencias entre 200 y 327 metros se detectaron también a lo largo del cauce del río San Salvador entre antes de la confluencia con la vertiente Ojos de Opache y a la salida Oeste del modelo.

Similar situación, pero con diferencias del orden entre 100 y 200 metros, se observaron en la zona ubicada entre Yalquincha y la estación fluviométrica Río Loa en Escorial y en el

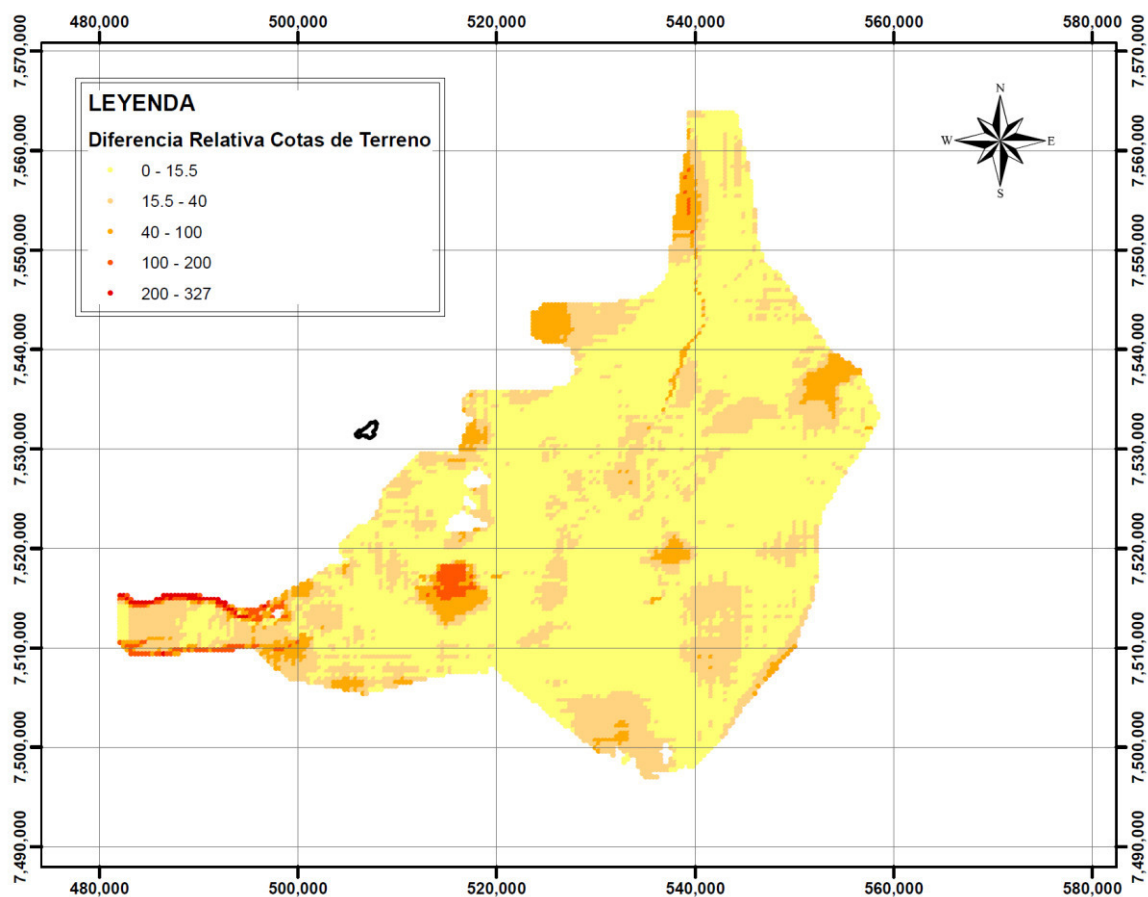
tramo del río Loa que va aproximadamente desde la estación fluviométrica Río Loa en la Finca hasta la salida Oeste del modelo.

Diferencias más bajas que se sitúan entre los 40 y 100 metros se apreciaron nuevamente en el sector Norte del modelo; en el tramo del río Loa que va desde los poblados de Lasana y Chiu Chiu; en el tramo del río Loa que va aproximadamente desde la estación fluviométrica Río Loa en Chintoraste hasta la salida Oeste del modelo; en el tramo del río San Salvador que va aproximadamente desde su nacimiento hasta antes de la junta con la vertiente Ojos de Opache; nuevamente en la zona situada entre Yalquincha y la estación de control fluvimétrico Río Loa en Escorial; en algunas área puntuales de Pampa Llalqui y al Sureste del modelo y finalmente en la zona ubicada al Noreste del modelo cercana al río Salado.

En cuanto al resto de la zona de modelación, las diferencias no fueron importantes.

Lo señalado anteriormente puede visualizarse en la Figura 10.1-2, la cual muestra los sectores dentro del área activa del modelo de Matraz que presentan las mayores diferencias entre cotas de terreno registradas.

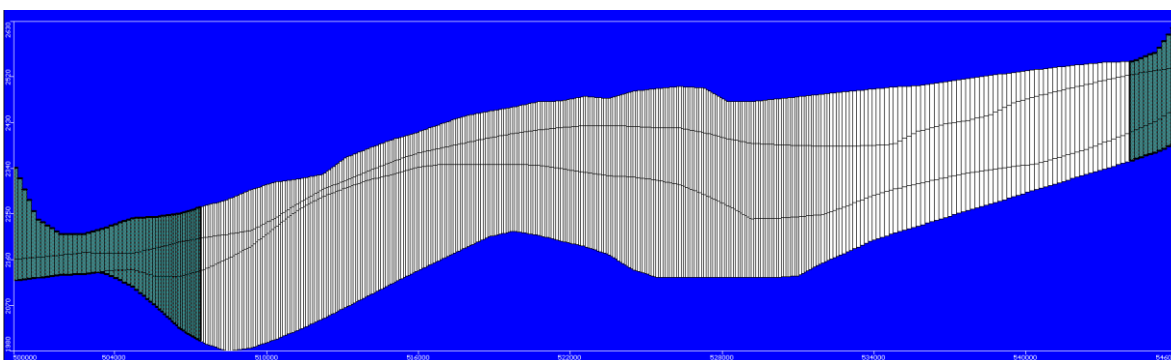
FIGURA 10.1-2
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA RELATIVA DE COTAS DE TERRENO OBTENIDAS POR MATRAZ Y EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN SRTM



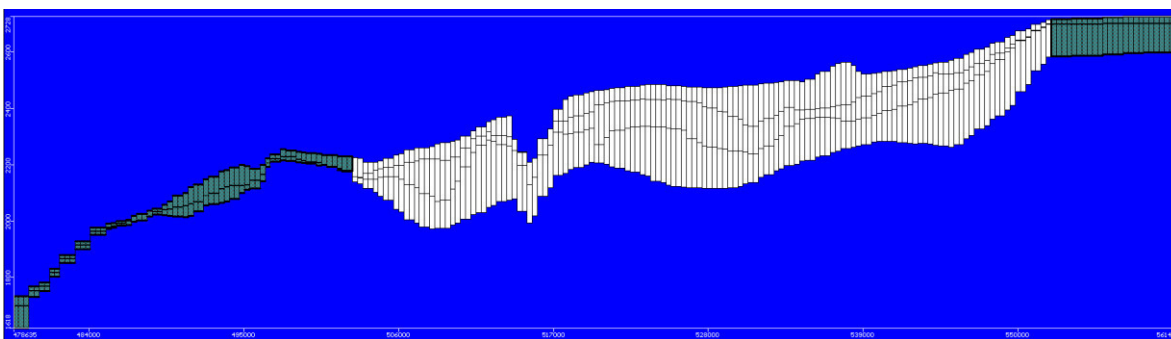
Fuente: Elaboración propia.

El segundo punto a analizar correspondió a la geometría de los estratos. Éstos presentaban claras diferencias con los estratos observados en el Estudio Talabre, sobretodo en áreas que tenían en común ambos modelos. Ejemplo de lo anterior, se visualiza en la Figura 10.1-3 donde se muestran dos perfiles Este-Oeste correspondientes a los modelos de Talabre y de Matraz, donde para éste último se aprecia claramente una discontinuidad en los estratos la que se refleja a través de una gran depresión en el sector de Yalquincha – Río Loa en Escorial y que no es observado de ningún modo en el modelo de Talabre.

**FIGURA 10.1-3
PERFILES ESTE-OESTE EN MODELOS TALABRE Y MATRAZ**



(MODELO TALABRE)

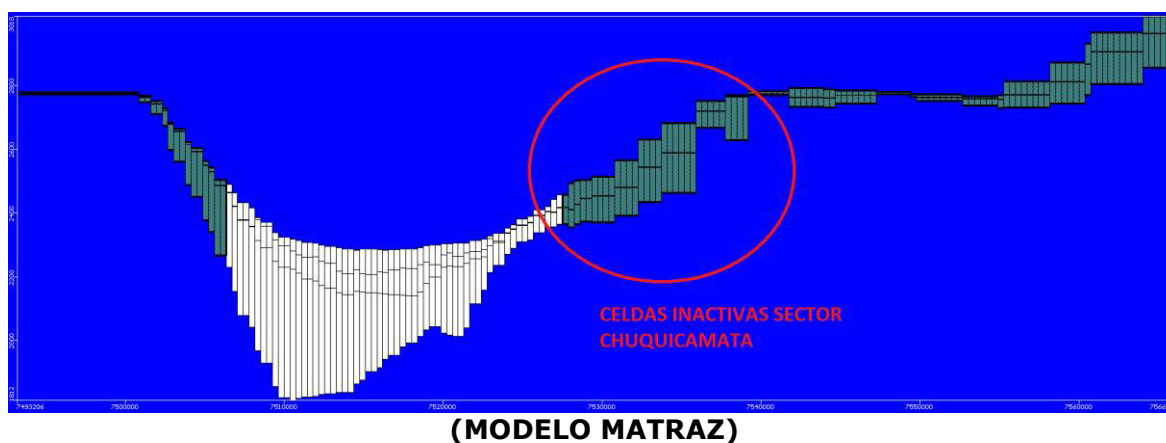
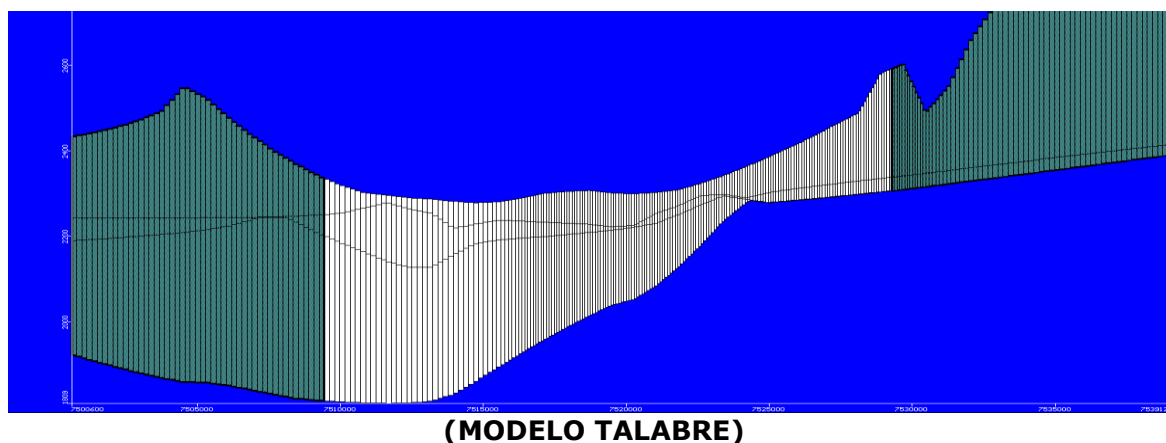


(MODELO MATRAZ)

Fuente: Modelos Talabre (2010) y Matraz (2012).

Asimismo, el modelo de Matraz no considera el sector norponiente perteneciente a la mina Chuquicamata, la que sí aportaría con flujos subterráneos provenientes desde dicha faena minera de propiedad de CODELCO. Lo anteriormente señalado, se aprecia en la Figura 10.1-4 donde se muestran dos perfiles de orientación Norte-Sur, de los cuales el que corresponde al modelo de Matraz, se observan celdas inactivas en el sector de Chuquicamata.

**FIGURA 10.1-4
PERFILES NORTE-SUR EN MODELOS TALABRE Y MATRAZ, SECTOR
CHUQUICAMATA**

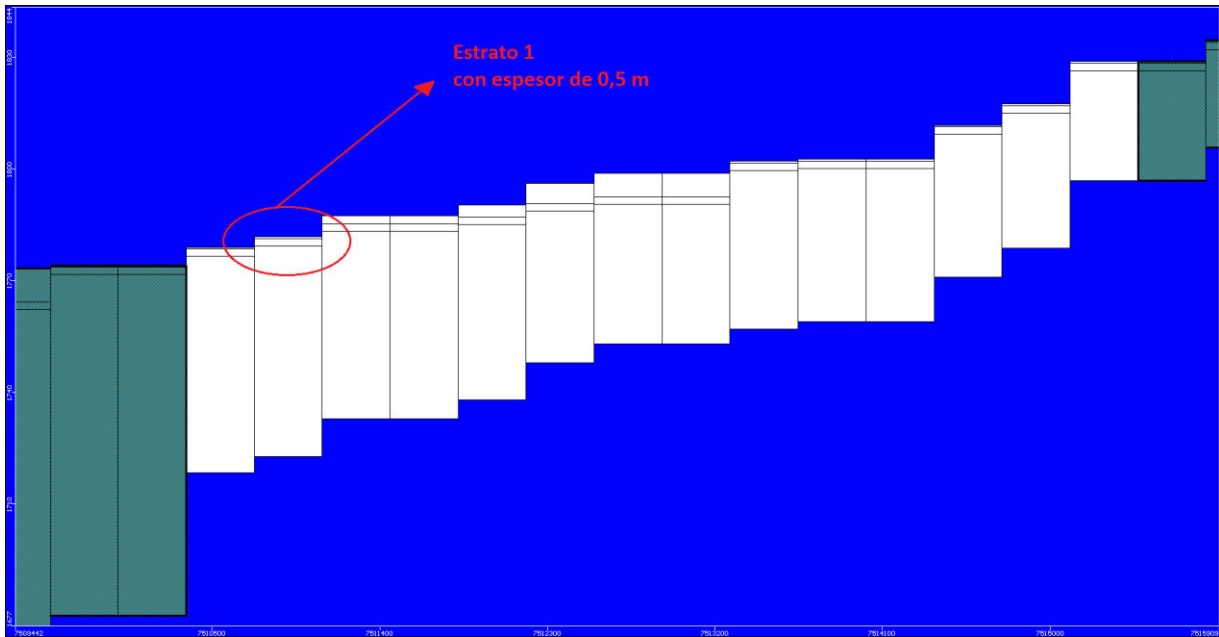


Fuente: Modelos Talabre (2010) y Matraz (2012).

Además, se observó que en algunos sectores el espesor de los estratos llegaba a ser tan pequeño como 0,5 m, lo que podría provocar inestabilidades en la modelación debido a las discontinuidades de estratos entre una celda y otra. La Figura 10.1-5, ejemplifica lo anteriormente mencionado en uno de los tantos sectores donde se aprecian espesores de estratos de 0,5 m.

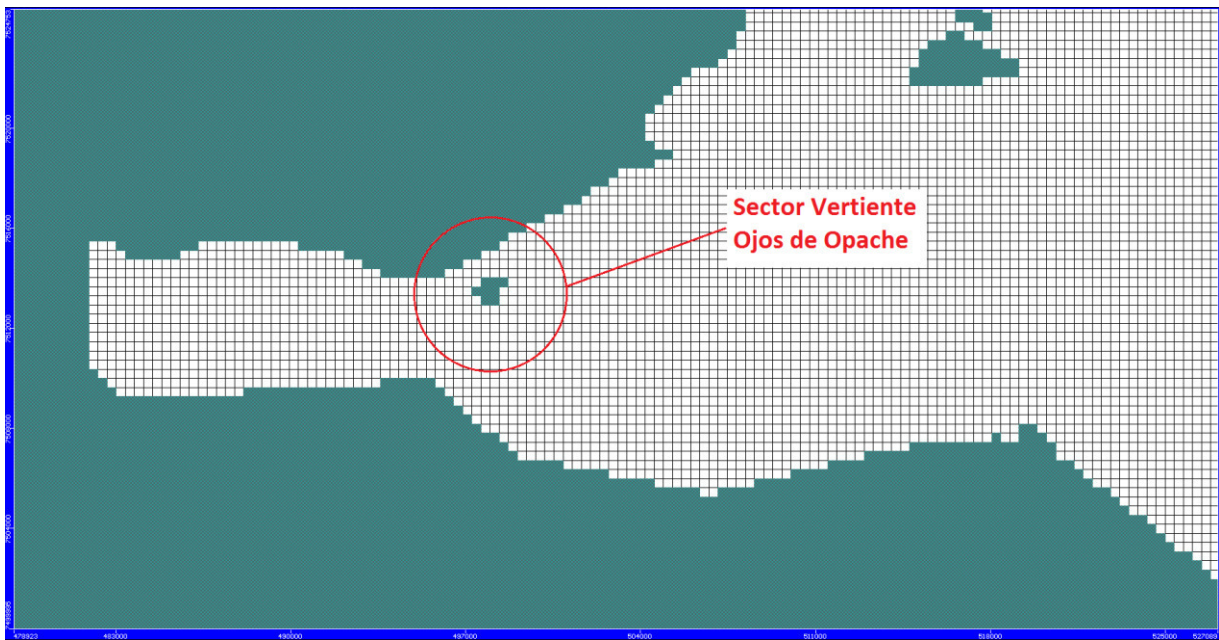
Por otra parte en el modelo de Matraz, específicamente en la zona de vertiente Ojos de Opache, se definieron un número de 8 celdas inactivas abarcando gran parte de este sector y en cada uno de los 3 estratos del modelo. Esto último, no se condice con lo que ocurre en la realidad ya que existen afloramientos de origen subterráneo que dan origen a esta vertiente y cuyas aguas posteriormente descargan al río San Salvador tras recorrer 3,5 kilómetros. En la Figura 10.1-6, se presenta la situación que se describe anteriormente en donde existen celdas inactivas en el sector de vertiente Ojos de Opache.

FIGURA 10.1-5
SECTOR SALIDA OESTE MODELO MATRAZ CON ESTRATOS DE ESPESOR DE 0,5 m



Fuente: Modelo Matraz (2012).

FIGURA 10.1-6
SECTOR VERTIENTE OJOS DE OPACHE CON DEFINICIÓN DE CELDAS INACTIVAS



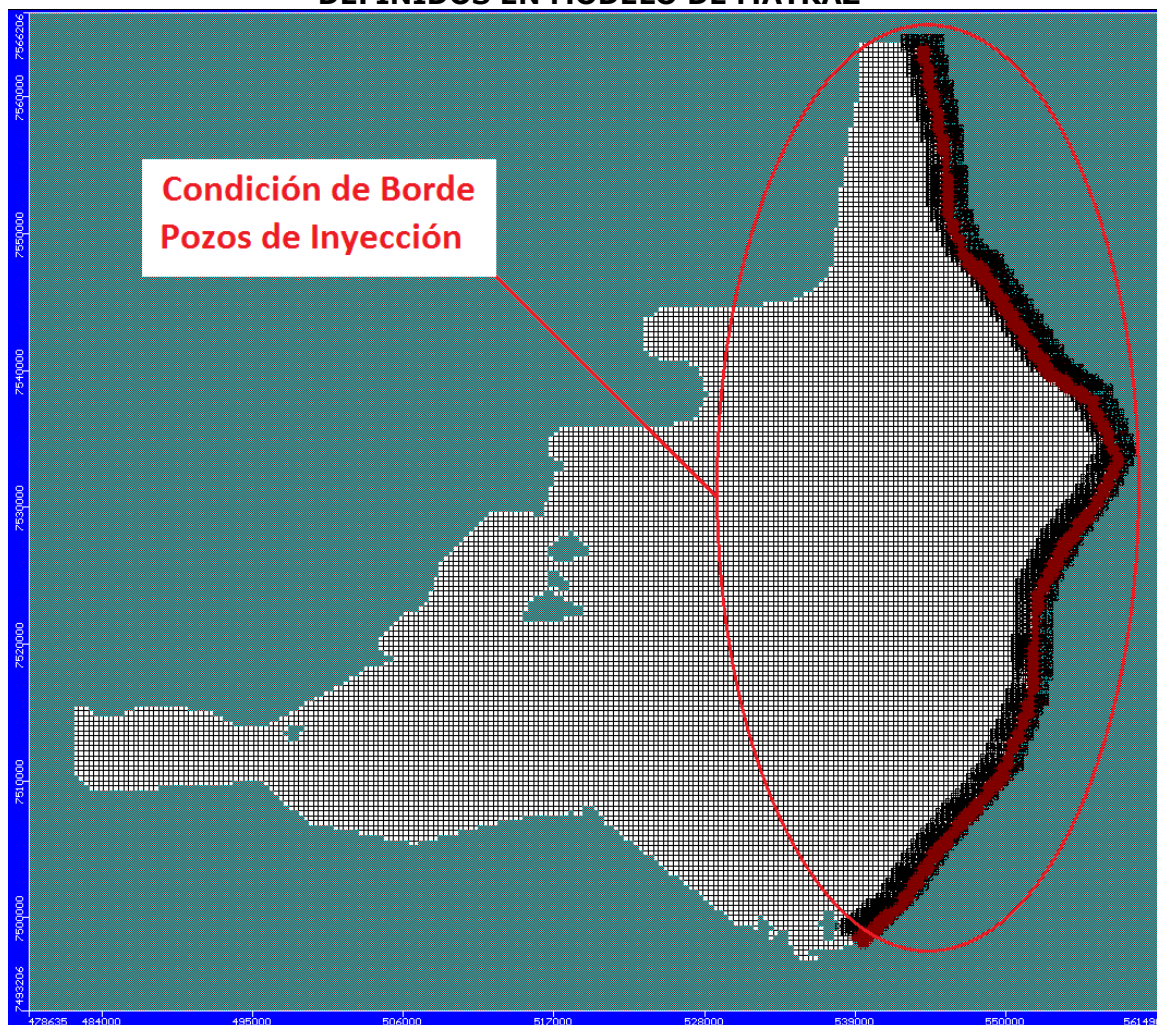
Fuente: Modelo Matraz (2012).

10.1.2. Condiciones de Borde del Modelo Matraz

Tres aspectos principales fueron observados en cuanto a las condiciones de borde del modelo: El uso de pozos de inyección para representar la condición de borde oriental, los niveles de la condición de Río y la no existencia de una condición de borde nor-poniente conectando con el sector de Chuquicamata.

Acerca del uso de pozos de inyección como condición de borde, se observa que estos cubren completamente el extremo oriente del modelo, desde el embalse Conchi hasta el sector Sur de Pampa Yalqui, con un caudal total de 1.458,3 l/s. Este consultor considera que la aplicación de este tipo de condición de borde fuerza al modelo a recibir un caudal de entrada que podría no ajustarse a la realidad del sistema. En la Figura 10.1-7, se presenta la condición de borde definida por Matraz utilizando pozos de inyección en todo el contorno oriental del modelo.

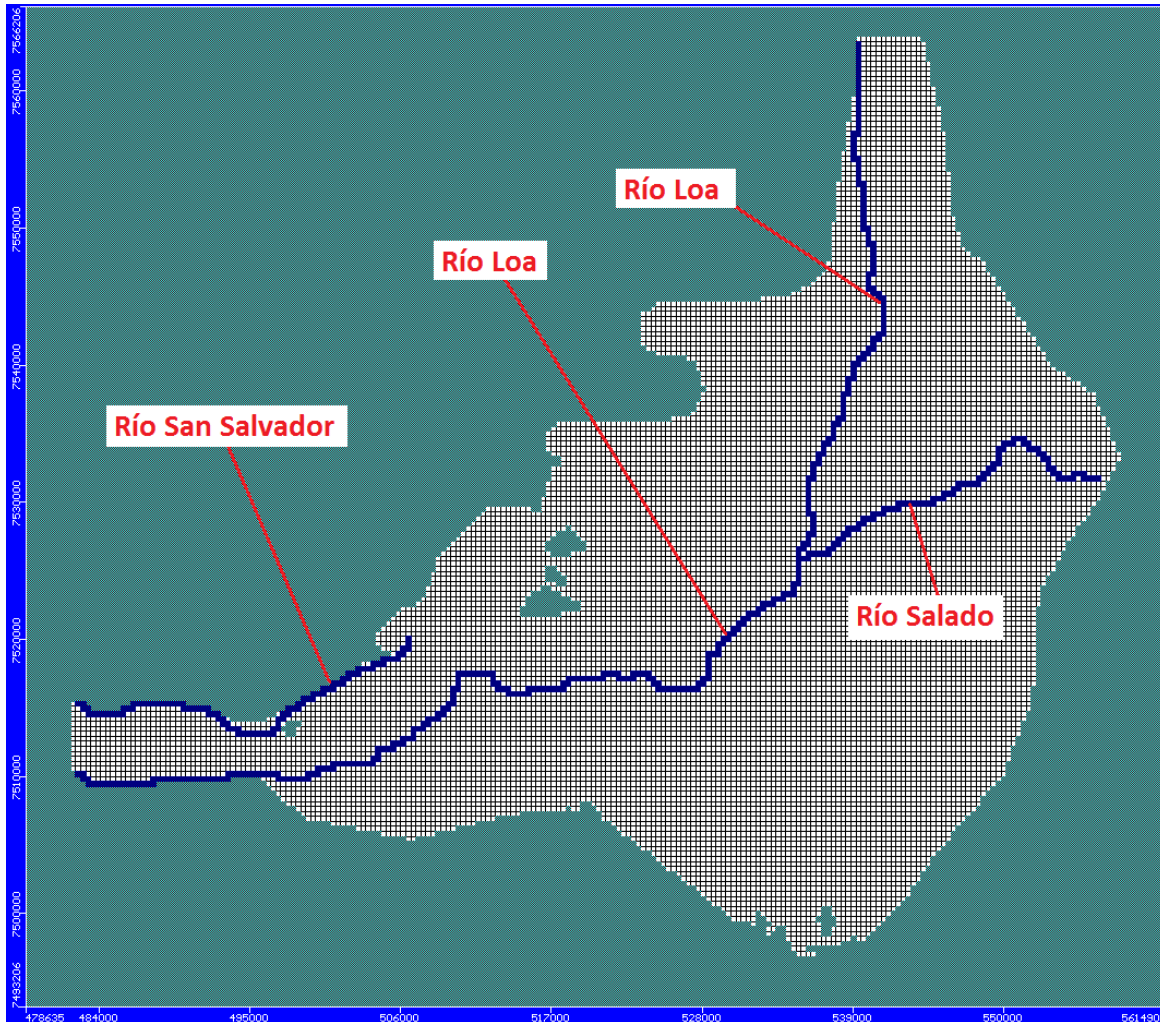
**FIGURA 10.1-7
CONDICIÓN DE BORDE POZOS DE INYECCIÓN EN CONTORNO ORIENTAL
DEFINIDOS EN MODELO DE MATRAZ**



Fuente: Modelo Matraz (2012).

En cuanto a la condición de borde de Río, de acuerdo a lo revisado en el punto anterior, existirían problemas de cota debido a los errores en la cota de terreno de algunos sectores, por lo que sería necesario realizar un ajuste. En la Figura 10.1-8, se muestra la condición de borde definida en el modelo de Matraz, la cual incorpora tanto los ríos Loa, Salado y San Salvador.

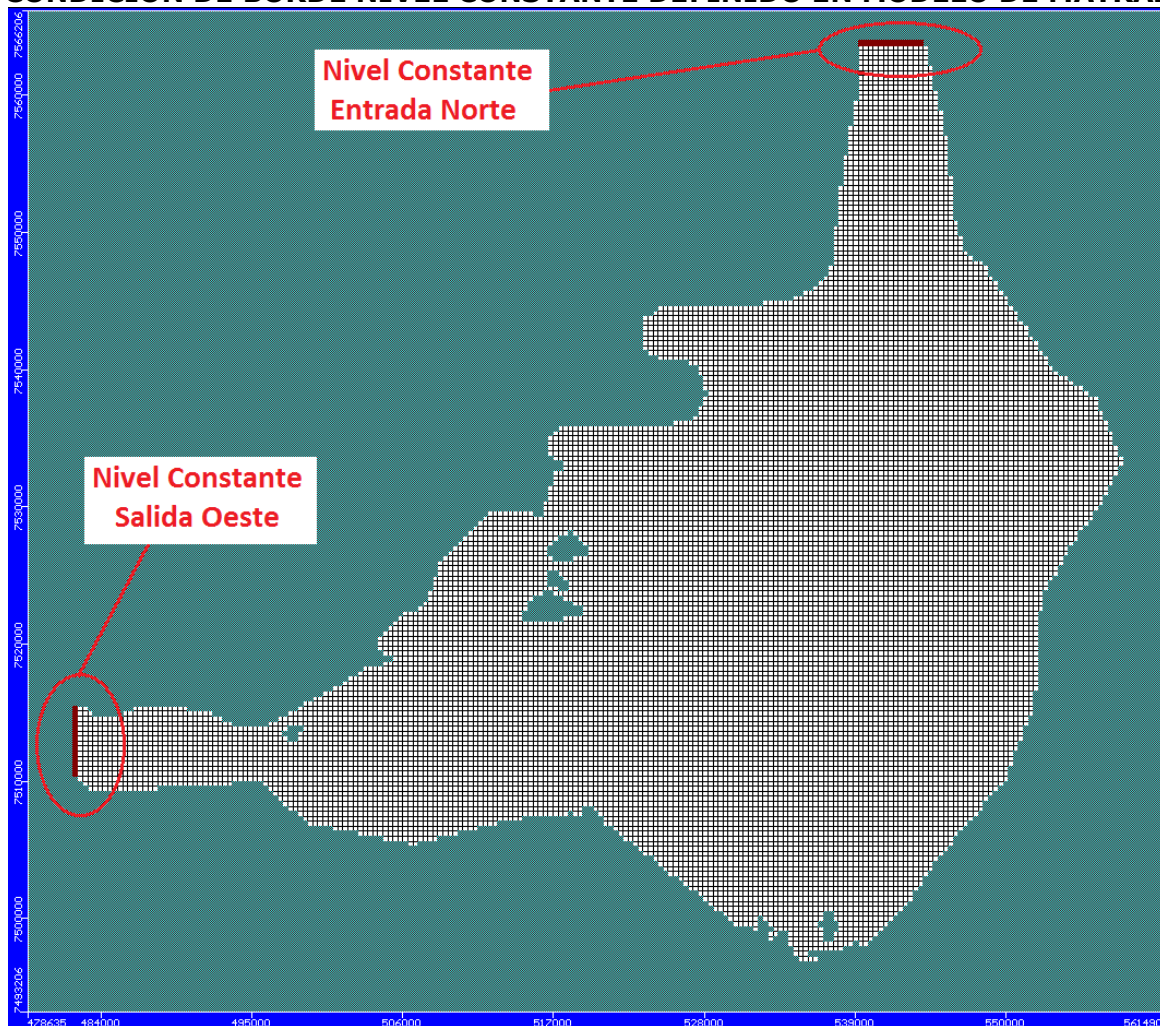
FIGURA 10.1-8
CONDICIÓN DE BORDE TIPO RÍO DEFINIDO EN MODELO DE MATRAZ



Fuente: Modelo Matraz (2012).

En lo referente a la condición de borde de nivel constante, se definieron tanto en la parte norte (sector Conchi) como en la salida oeste del modelo a 20 km aguas abajo de la estación fluviométrica Río Loa en la Finca y en cada uno de los 3 estratos del modelo. En el caso de la condición de borde ubicada en la entrada Norte del modelo, se definieron celdas con este tipo de condición cuyos niveles varían linealmente desde los 3.030,9 hasta los 3.070,7 m. Por otro lado, para la salida Oeste se adoptó un valor de nivel constante que varía linealmente desde los 1.778,7 m hasta los 1.828,6 m. En la Figura 10.1-9, se presenta la definición de esta condición de borden en el dominio del modelo de Matraz.

FIGURA 10.1-9
CONDICIÓN DE BORDE NIVEL CONSTANTE DEFINIDO EN MODELO DE MATRAZ



Fuente: Modelo Matraz (2012).

Por último, se ha observado la ausencia de una condición de borde definida en el Estudio Talabre, correspondiente a un aporte subterráneo al norte de Calama, proveniente de Chuquicamata. De acuerdo a ese estudio, esta recarga sería del orden de 164 l/s y queda en evidencia de acuerdo a lo que arrojaron las equipotenciales generadas a partir de la información de niveles subterráneos observados en pozos de propiedad de CODELCO durante el período de enero de 2003.

10.1.3. Parámetros Elásticos del Modelo Matraz

Se analizaron principalmente la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento ingresados al modelo Matraz. En ambos casos no se dispone de una discretización espacial de los parámetros, observándose una única zona homogénea y diferenciada sólo para los 3 estratos representados.

En el caso de la permeabilidad, cada estrato posee una permeabilidad homogénea distinta, siendo el más permeable el estrato superior y el menos permeable el estrato intermedio.

En el caso del almacenamiento, el estrato inferior presenta un coeficiente menor al de los otros 2 estratos, los cuales se encuentran representados por el mismo valor.

10.1.4. Recargas y Descargas del Modelo Matraz

Las recargas al sistema corresponden a las entradas subterráneas a través de la condición de borde de nivel constante en Conchi y los pozos de inyección en el sector oriente del modelo, las entradas por concepto de recarga areal y las entradas por filtraciones de los cauces.

En el caso de las entradas subterráneas, falta considerar, tal como se mencionó en el punto anterior, la entrada subterránea proveniente del sector de Chuquicamata. En el caso de la recarga areal, ésta se encuentra dividida en recarga por precipitación, recarga en zonas de riego de Calama y Chiu Chiu, recarga por sistema de agua potable y las filtraciones del Tranque Talabre. Sin embargo, no se encuentran ingresadas las recargas asociadas a la zona de riego de Lasana.

Finalmente, la recarga por filtraciones de los cauces no puede ser analizada, ya que ellas corresponden al resultado del modelo ya calibrado.

En cuanto a las descargas del sistema, el modelo considera la salida subterránea poniente y los afloramientos producidos en los cauces. En ambos casos, los caudales corresponden al resultado del proceso de calibración, por lo que no pueden ser analizados previamente. Sin embargo, se debe tener en consideración que el sector aguas debajo de Calama es conocido por sus altos caudales de afloramiento, por lo que una condición de tipo Dren sería la más adecuada para representar los caudales de afloramiento del río San Salvador y una serie de vertientes cuyo único caudal de origen es el afloramiento subterráneo.

10.1.5. Diagnóstico del Modelo Matraz

Como resultado del análisis realizado, se concluyó que el modelo del acuífero de Calama proporcionado por la DGA no se encuentra en una etapa de desarrollo suficiente como para poder realizar el proceso de calibración. Esto se debe a que existen falencias geométricas importantes que impiden el correcto funcionamiento del embalse subterráneo, en conjunto con la ausencia de información clave previa al inicio de la calibración. Dentro de las falencias geométricas importantes se corroboran también en el estudio denominado "Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta", realizado por MAYCO Consultores para la DGA en el año 2013. En dicho estudio, se realizaron trabajos de prospección geofísica que incluyeron el levantamiento de 5 perfiles TEM situados dentro del dominio del modelo hidrogeológico definido por Matraz y cuyos resultados mostraron que aquellos perfiles ubicados en la parte oriental del modelo la superficie de contacto basamento-relleno se encontraría entre 200 y 300 m más profundo de lo estimado por Matraz. En particular, estas diferencias se encontrarían en la zona Sureste de Pampa Llalqui, en la parte Noreste correspondiente a la sección del río Salado que entrada al modelo y en el borde Norte aguas abajo del embalse Conchi.

Dado lo anterior, se ha decidido realizar una reconstrucción del modelo subterráneo, manteniendo en la medida de lo posible el trabajo realizado por Matraz y complementándolo con información de los modelos realizados en el Estudio Talabre y Estudio Tesoro.

10.2. Reconstrucción del Modelo Subterráneo

La reconstrucción del modelo Calama se realizó tomando como punto de inicio sólo la geometría del modelo Matraz, es decir, considerando la misma extensión espacial, zona activa, estratificación y tamaño de celdas. A partir de este punto, se realizaron una serie de modificaciones a esta geometría, con el objeto de compatibilizar las observaciones de otros estudios y el conocimiento de este consultor.

A continuación, una vez ajustada la geometría, se procedió al ingreso de los parámetros y valores asociados al resto de los elementos que conforman un modelo numérico, algunos de los cuales fueron sometidos al proceso de calibración.

Todo el desarrollo de este nuevo modelo fue realizado en Visual MODFLOW versión 4.6.0.162 en su versión clásica, debido a que la versión Flex utilizada por Matraz aún se encuentra en desarrollo y no dispone de todas las herramientas de modelación que se encuentran en la versión clásica.

Cabe mencionar que las principales fuentes de información para la reconstrucción de este modelo fueron obtenidas de los estudios "Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales" desarrollado por CODELCO-Knight Piésold (en adelante Estudio Talabre) y "Resumen de los Resultados del Desarrollo y Aplicación de un Modelo de Flujo de Aguas Subterránea en la Cuenca del Río Loa" elaborado por Minera El Tesoro-Montgomery & Associates (adelante Estudio Tesoro).

10.2.1. Dominio del Modelo

El dominio general del modelo fue mantenido de acuerdo a la definición de Matraz, utilizando los mismos límites geográficos presentados en el Cuadro 10.1-1.

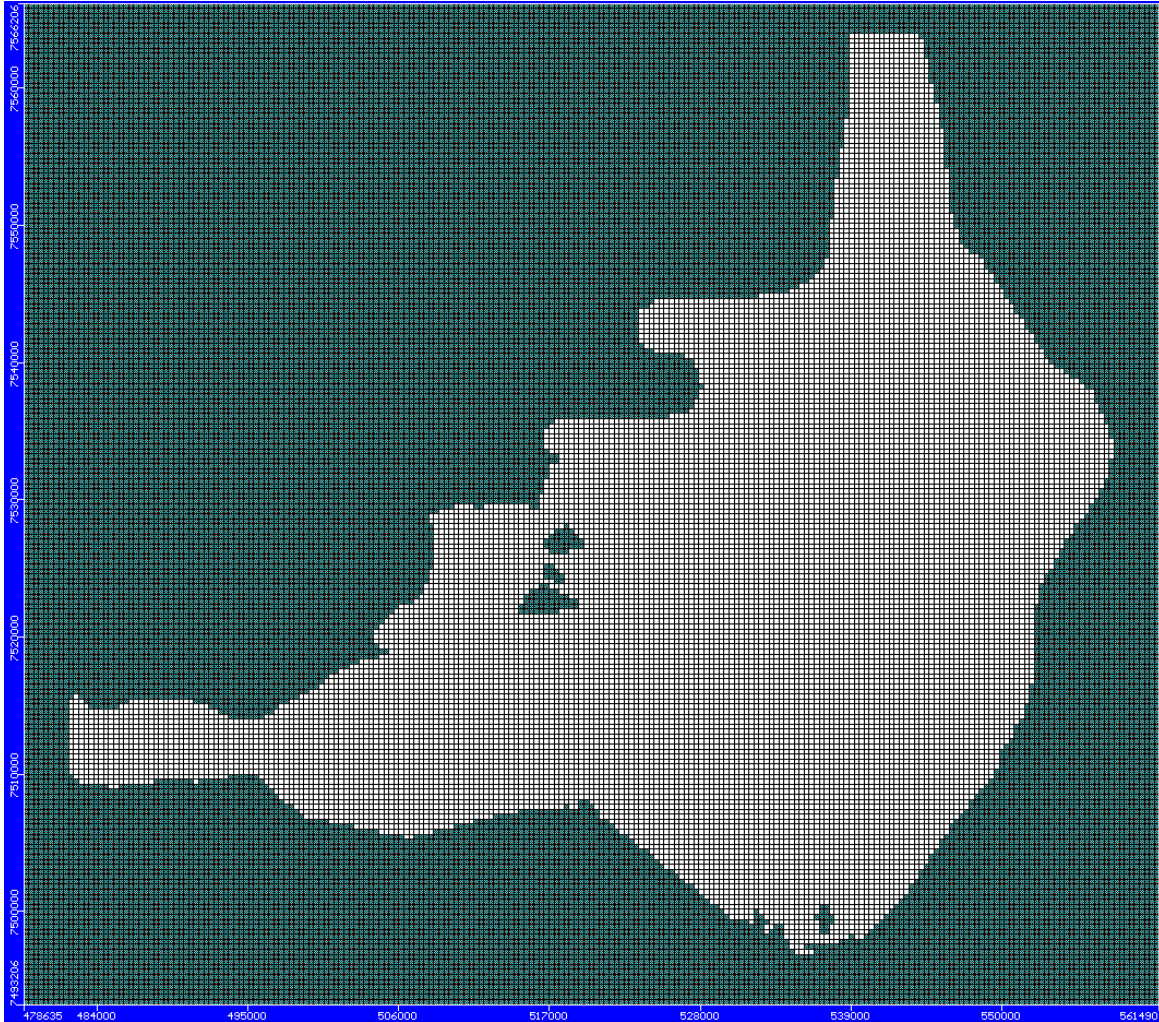
La zona activa del modelo fue también mantenida de acuerdo a las definiciones de Matraz, a excepción del límite ubicado al Norte de Calama, el cual fue extendido aproximadamente 1.550 m hacia Chuquicamata, de manera tal de incluir el pozo SI-5B (de propiedad de CODELCO) dentro de la zona activa y agregar una condición de borde de nivel constante como aporte de flujo subterráneo desde Chuquicamata. También se activaron algunas celdas correspondientes al río San Salvador, río Loa en su tramo final hacia la salida Oeste del Modelo y en el tramo inicial aguas abajo del embalse Conchi con el objeto de representar lo más fielmente posible la topografía de sus respectivos cauces.

Del mismo modo, se activaron las celdas que originalmente se encontraban inactivas en el sector de la vertiente Ojos de Opache para que posteriormente pueda ser representada mediante alguna condición de borde en el modelo numérico.

Por otro lado, se inactivaron algunas celdas en la entrada Sureste del sector de Pampa Llalqui y en la entrada Noreste del sector del río Salado para facilitar la definición de las condiciones de borde en dichas zonas.

En la Figura 10.2-1, se muestra el dominio espacial del modelo definido para el presente estudio.

**FIGURA 10.2-1
DOMINIO DEL MODELO**



Fuente: Elaboración propia.

10.2.2. Discretización Horizontal y Vertical

La discretización espacial, tanto en el plano horizontal como en el eje vertical, fue mantenida de acuerdo a lo proporcionado por Matraz. De este modo, el modelo posee celdas de igual tamaño en todo el dominio ($365 \times 365 \text{ m}^2$) y 3 estratos que representan las calizas en la zona superior, las arcillas en el estrato intermedio y las gravas en el estrato inferior.

Sin embargo, las cotas asociadas a cada uno de los estratos debieron ser redefinidas de acuerdo a las observaciones mencionadas en el punto 10.1.1. De este modo, la cota de terreno para cada celda fue definida en base al modelo digital de elevación SRTM. El proceso se realizó generando en primer lugar un archivo raster para toda la zona de estudio. Luego se exportó la grilla de modelación al programa ArcGIS, mediante el cual fue posible asignar a cada una de las celdas la cota de terreno correspondiente a su

ubicación en el raster generado. Finalmente, las cotas asociadas a cada celda fueron importadas a Visual MODFLOW siguiendo el formato matricial que define el programa para relacionar biunívocamente a cada una de las celdas del modelo con su respectiva elevación. Alternativa que puede encontrarse dentro de Visual MODFLOW en la opción *GRID>Import Elevation>Array Preview*, de esta forma, los valores quedan fijados y guardados posteriormente en el archivo de extensión *.VMG.

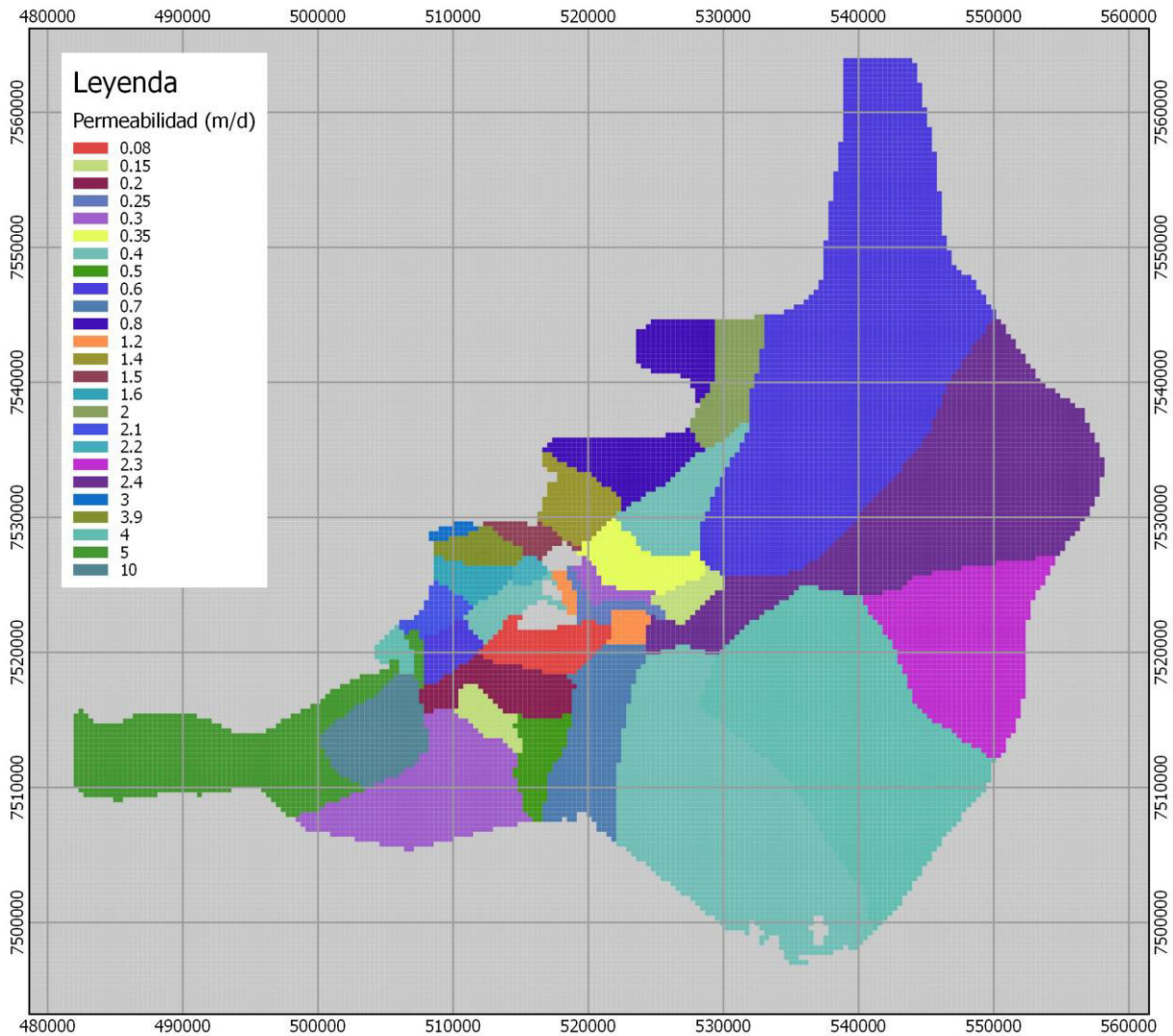
En cuanto a los niveles asociados a los estratos y el basamento, se realizaron una serie de modificaciones. En primer lugar, en la zona ubicada desde la junta de los ríos Loa y Salado hasta Calama, se utilizó la información estratigráfica obtenida del Estudio Talabre, cuya interpretación fue realizada en base a una amplia información de sondajes y geofísica interpretada en el mismo estudio, por lo que representa la fuente de información más confiable dentro del sector. En segundo lugar, se utilizó la información interpretada por Matraz para el resto de la zona de modelación, debido a que en esos sectores, Matraz es el generador de la única información disponible. Sin embargo, esta última información fue en parte modificada de acuerdo a las observaciones realizadas en el estudio de MAYCO Consultores (2013) para la DGA, en el cual se menciona que la interpretación realizada por Matraz posee ciertas diferencias en cuanto a la profundidad del basamento. Por último, para todos los estratos se definió un espesor mínimo de 6 m, de manera tal de minimizar las inestabilidades generadas por la interconexión de celdas con espesores muy pequeños.

10.2.3. Parámetros Elásticos

El comportamiento del acuífero de Calama presenta una gran complejidad, debido a lo cual su representación se realiza mediante un gran número de zonas de permeabilidad, que permitan representar los niveles observados e interacción de flujos superficiales y subterráneos.

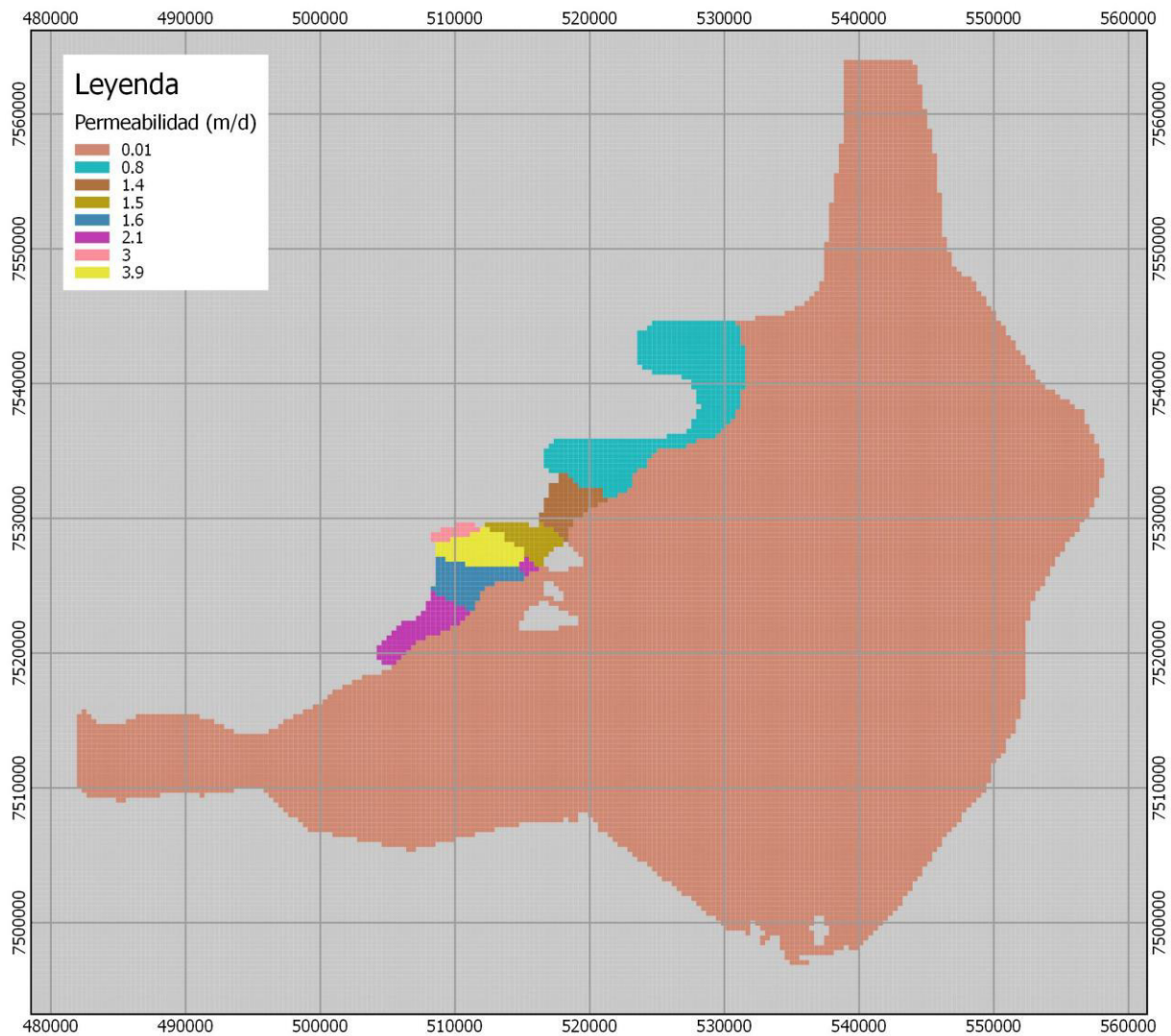
Es por esto que como escenario inicial de distribución de permeabilidades, se utilizó la zonificación presentada en el Estudio Talabre para el sector de Calama hacia aguas arriba y la zonificación presentada en el Estudio Tesoro para el sector de Calama hacia aguas abajo. En aquellas zonas fuera del área modelada en los 2 estudios anteriores, se extendieron las zonas existentes de manera tal de abarcar todo el modelo. Las Figuras 10.2-2, 10.2-3 y 10.2-4 muestran la distribución inicial de permeabilidad para los estratos superior, intermedio e inferior, respectivamente.

FIGURA 10.2-2
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL INICIAL DE PERMEABILIDADES EN ESTRATO SUPERIOR



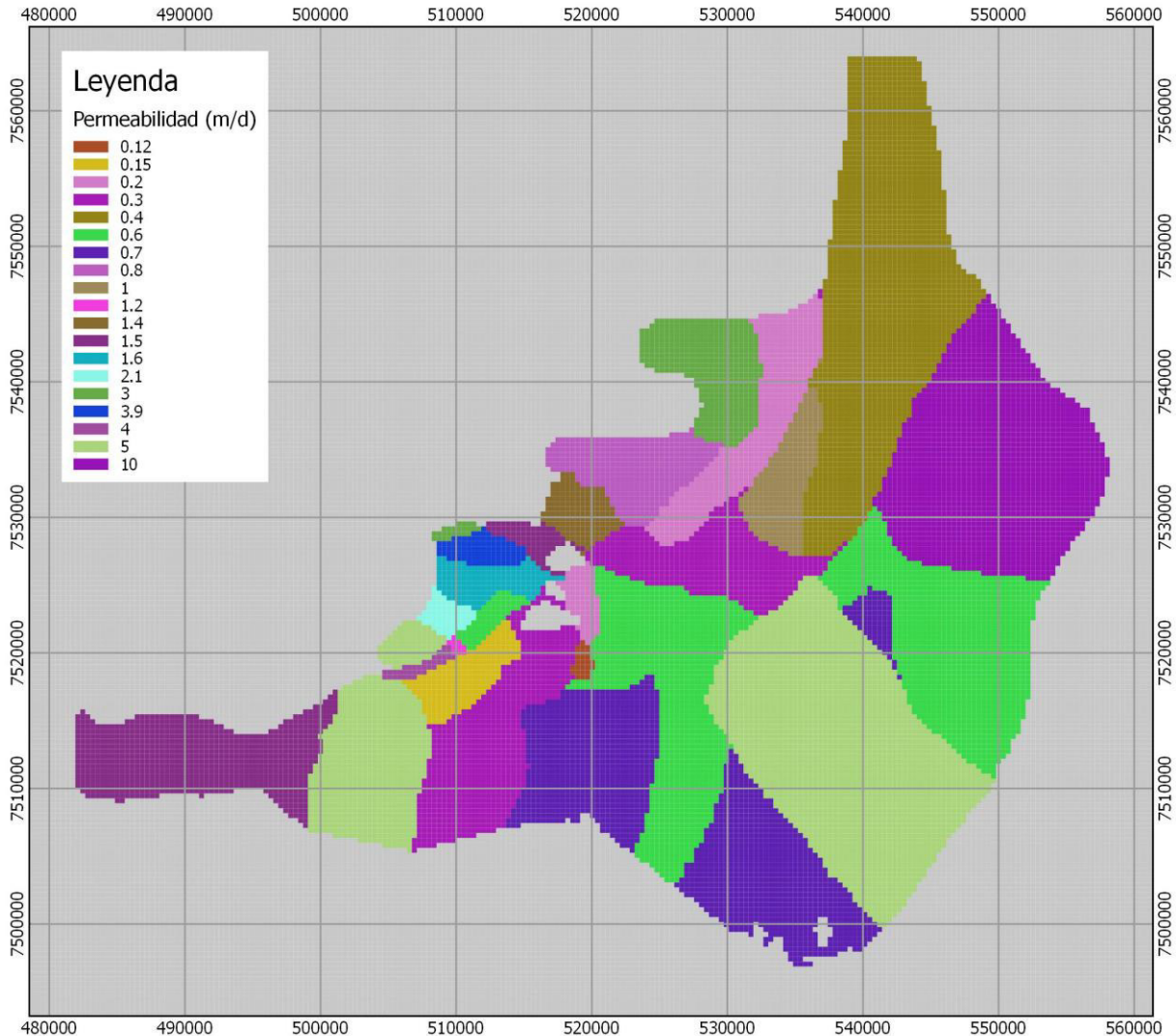
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 10.2-3
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL INICIAL DE PERMEABILIDADES EN ESTRATO INTERMEDIO



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 10.2-4
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL INICIAL DE PERMEABILIDADES EN ESTRATO INFERIOR



Fuente: Elaboración propia.

Este parámetro fue sometido más tarde a un proceso de calibración en régimen permanente.

En cuanto a la definición del coeficiente de almacenamiento, este se realizó de acuerdo a la zonificación presentada en el Estudio Talabre y utilizando sus mismos valores. Estas zonas fueron extendidas fuera de los límites del modelo Talabre de manera tal de abarcar toda el área activa de modelación. De todos modos, es importante destacar que este parámetro es relevante sólo para el régimen transiente, por lo que no fue calibrado y sólo fue agregado al modelo como información adicional.

10.2.4. Condiciones de Borde

Se definieron 3 tipos de condición de borde distintas: condición de nivel constante, condición tipo río y condición tipo dren.

Se definieron 5 condiciones de borde de nivel constante, las cuales se mencionan en el Cuadro 10.2-1.

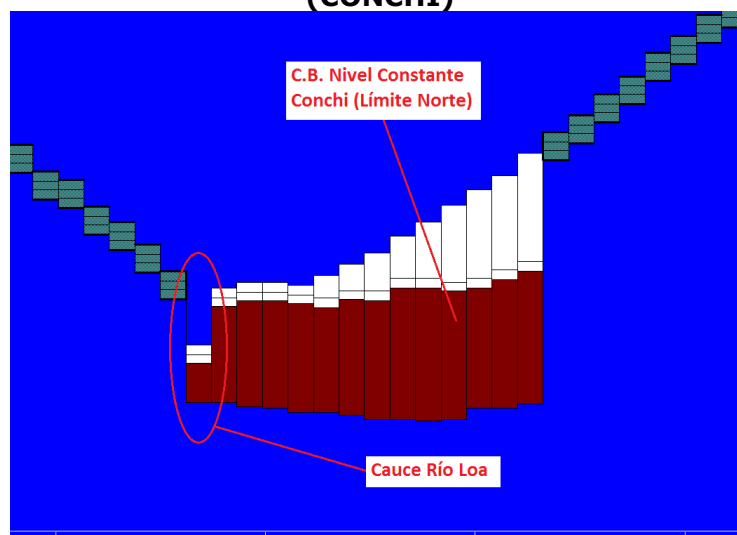
**CUADRO 10.2-1
CONDICIÓN DE BORDE DE NIVEL CONSTANTE**

UBICACIÓN	NOMBRE	VALOR (m s.n.m.)
Límite Norte	Conchi	2.975
Límite Nor-Oriente	Salado	2.575 - 2.675
Límite Sur-Oriente	Llalqui	2.612
Límite Nor-Poniente	Chuquicamata	2.430
Límite Poniente	Salida	1.590

Fuente: Elaboración Propia

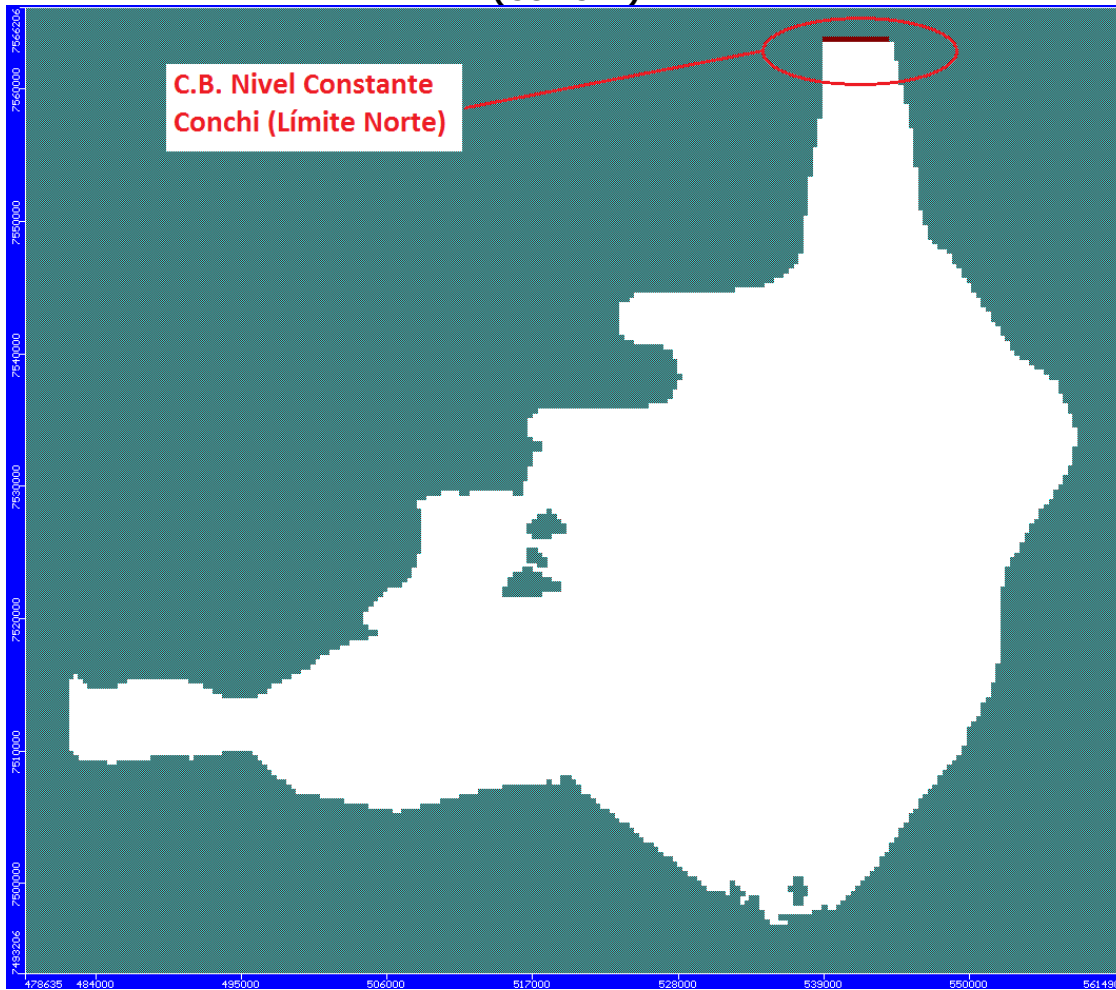
La condición de borde de nivel constante Conchi ubicada a la entrada del modelo en su lado Norte, se impuso en el estrato inferior dado que la celda superior que define el comienzo del cauce del río Loa presenta una cota más baja en comparación con el resto de las celdas contiguas, y por tanto es el río quien impone una condición de nivel constante sobre las demás celdas adyacentes, quienes para esa cota el nivel de agua subterránea estaría en el estrato inferior. En la Figura 10.2-5, se muestra la condición de borde de nivel constante definida en el límite Norte (Conchi) del modelo.

**FIGURA 10.2-5
CONDICIÓN DE BORDE NIVEL CONSTANTE EN LÍMITE NORTE DEL MODELO
(CONCHI)**



Fuente: Elaboración propia.

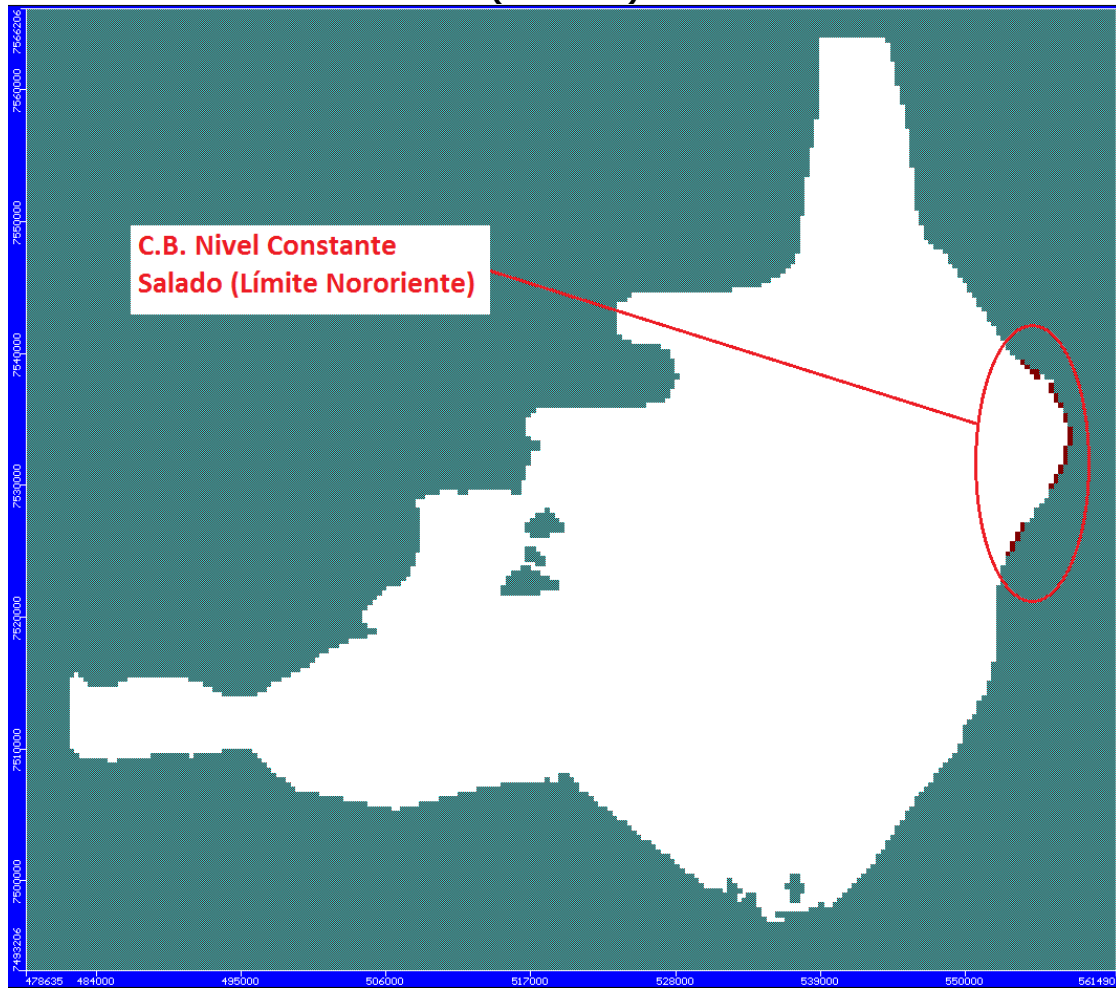
**FIGURA 10.2-5 (CONTINUACIÓN)
CONDICIÓN DE BORDE NIVEL CONSTANTE EN LÍMITE NORTE DEL MODELO
(CONCHI)**



Fuente: Elaboración propia.

La condición de borde de nivel constante Salado, dispuesta en la entrada Nororiente del dominio del modelo se fijó en el estrato inferior adoptando valores de niveles que fueron variando para adecuarse a la topografía definida para las celdas que conforman el estrato acuífero inferior. En la Figura 10.2-6, se muestra la condición de borde de nivel constante definida en el Límite Nororiente (Salado) del modelo.

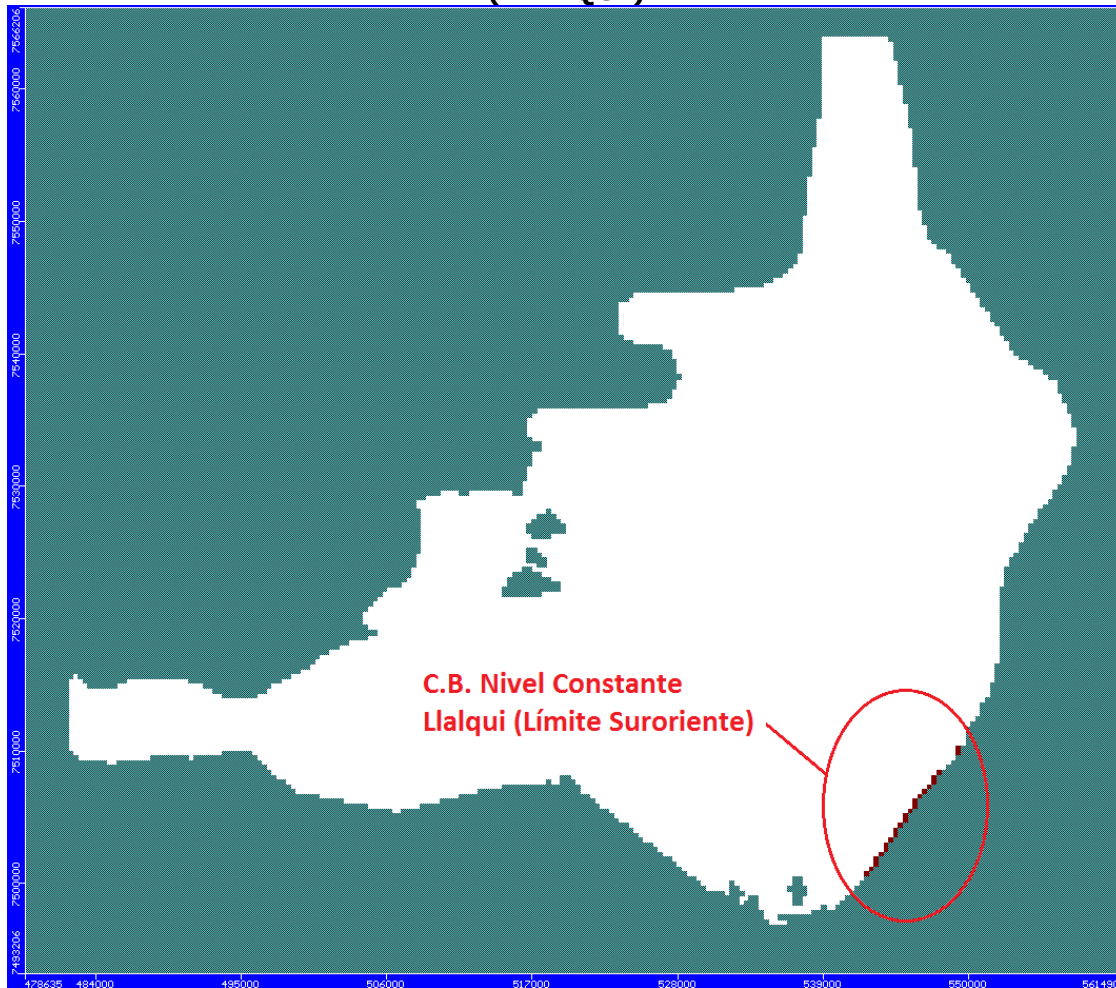
FIGURA 10.2-6
CONDICIÓN DE BORDE NIVEL CONSTANTE EN LÍMITE NORORIENTE DEL MODELO
(SALADO)



Fuente: Elaboración propia.

La condición de borde de nivel constante Llalqui, impuesta en la entrada Sureste del dominio del modelo se definió en el estrato inferior con un valor único de nivel para todas las celdas que conforman esta condición. El valor fijado de nivel de agua subterránea supuso una condición de nivel acotado dentro del estrato inferior. En la Figura 10.2-7, se presenta la condición de borde de nivel constante definida en el Límite Sureste (Llalqui) del modelo.

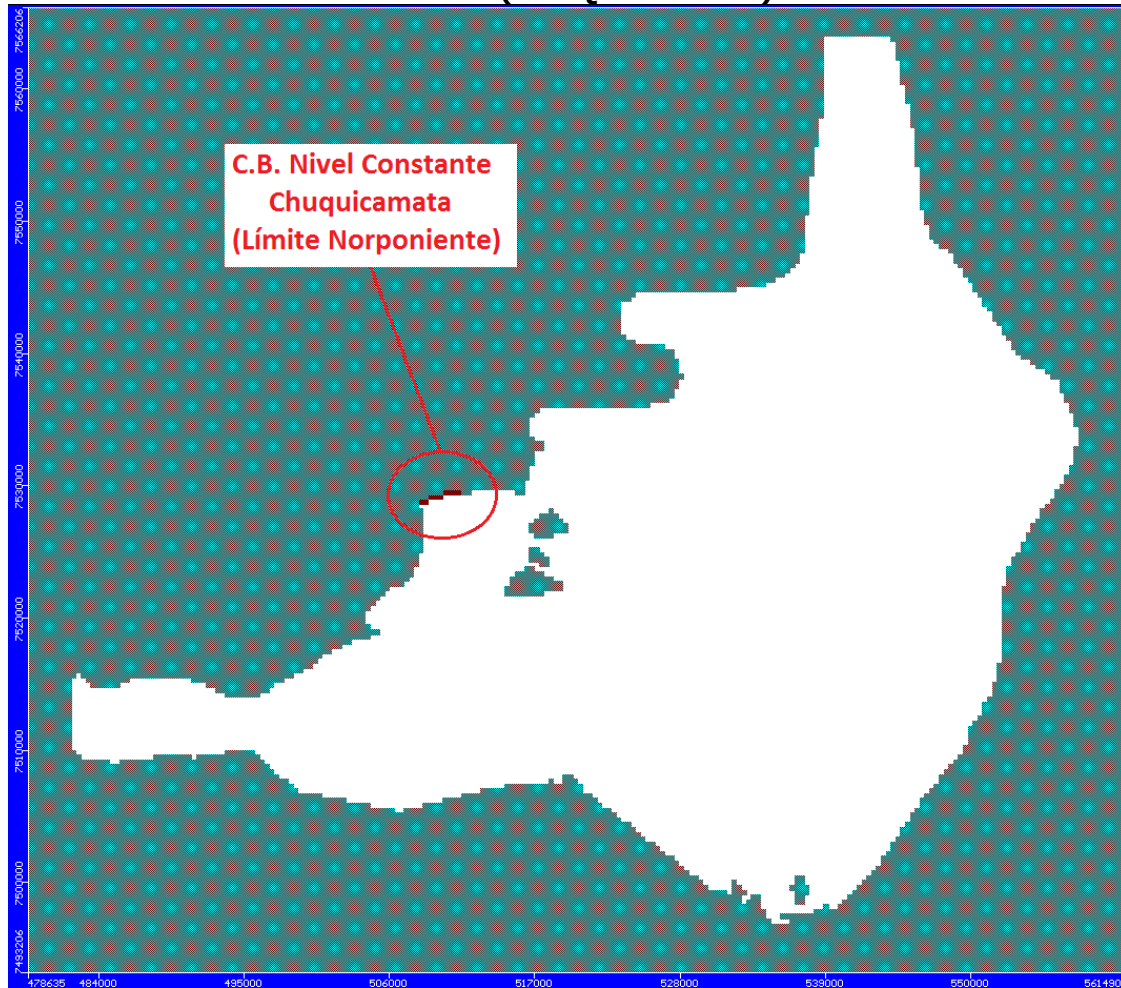
FIGURA 10.2-7
CONDICIÓN DE BORDE NIVEL CONSTANTE EN LÍMITE SURORIENTE DEL MODELO (LLALQUI)



Fuente: Elaboración propia.

La condición de borde de nivel constante Chuquicamata ubicada en la entrada Norponiente del modelo fue definida en cada uno de los 3 estratos del sistema acuífero siendo concordante con lo desarrollado en el modelo del Estudio Talabre. Según dicho estudio, el valor adoptado del nivel de aguas subterráneas se obtuvo en base a equipotenciales construidas con datos de niveles observados en pozos de CODELCO ubicados en el sector durante el mes de Enero de 2003. En la Figura 10.2-8, se aprecia la condición de borde de nivel constante definida en el Límite Norponiente (Chuquicamata) del dominio del modelo.

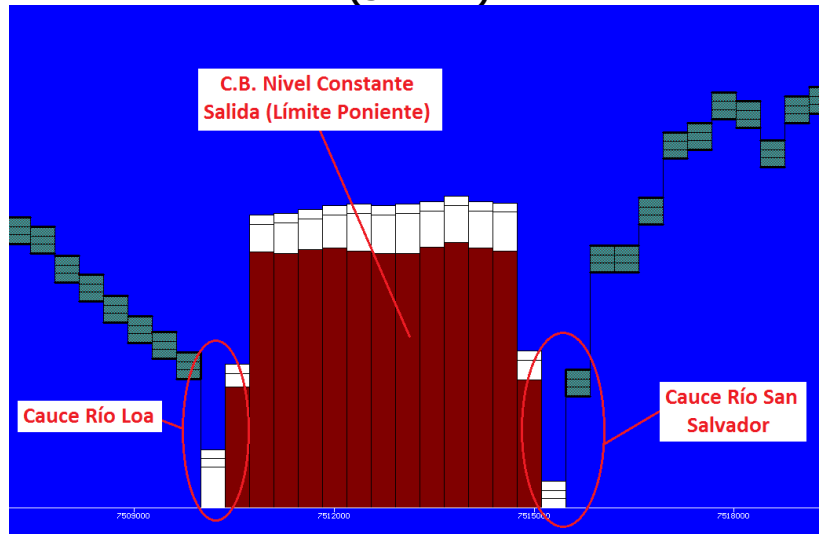
**FIGURA 10.2-8
CONDICIÓN DE BORDE NIVEL CONSTANTE EN LÍMITE NORPONIENTE DEL
MODELO (CHUQUICAMATA)**



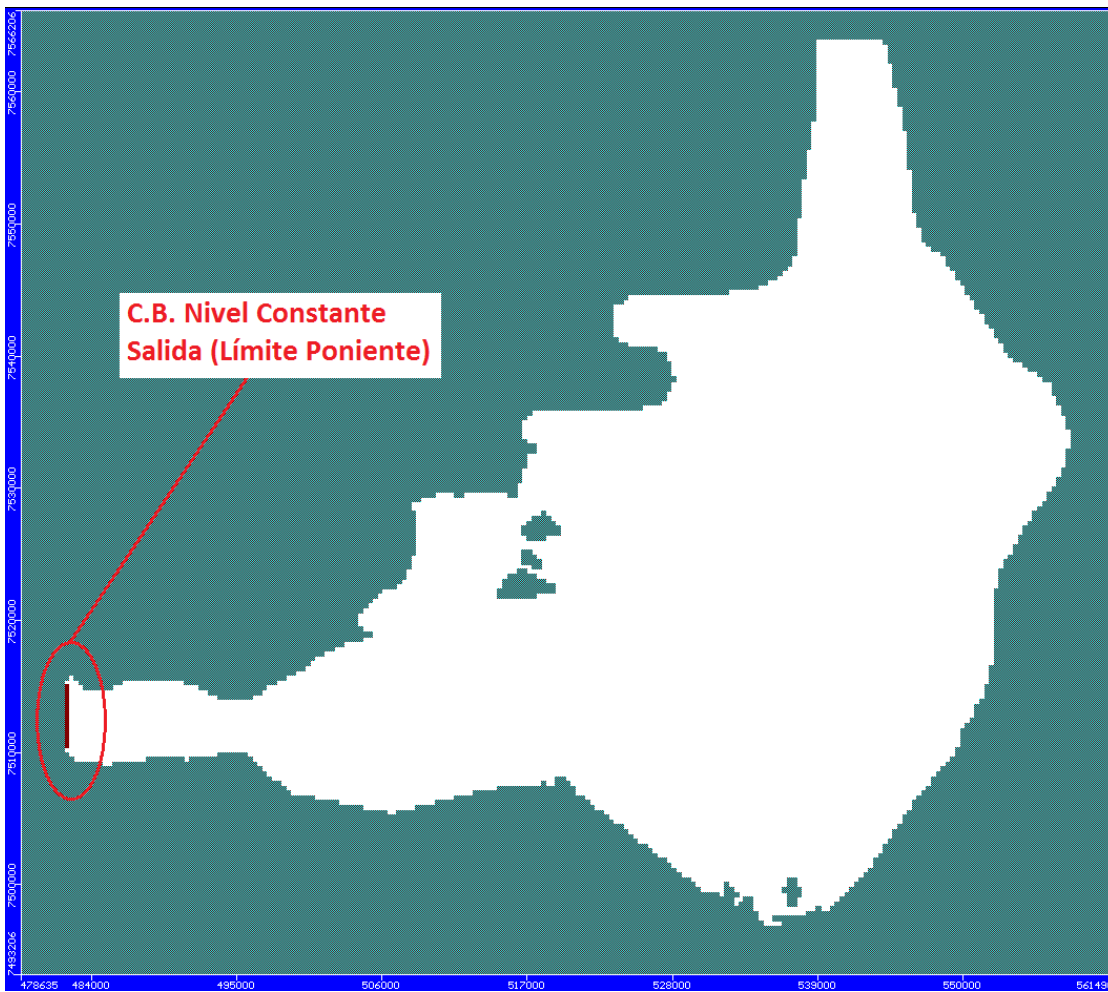
Fuente: Elaboración propia.

Por último, la condición de borde de nivel constante Salida se impuso, tal como indica su nombre, en la salida Oeste del dominio del modelo y se definió en el estrato inferior debido a que la celda superior que representa al cauce del río Loa posee una cota más baja en comparación a las demás celdas adyacentes, a excepción de la celda que representa al cauce del río San Salvador y que se sitúa a una cota aún más baja que la del Loa. Por consiguiente, es el nivel del río Loa quien impone una condición sobre las demás celdas y dada la geometría de las celdas contiguas a ambos cauces, éste nivel se detecta en el estrato inferior. En la Figura 10.2-9 se presenta la condición de borde de nivel constante definida en el límite Poniente (Salida) del modelo.

FIGURA 10.2-9
CONDICIÓN DE BORDE NIVEL CONSTANTE EN LÍMITE PONIENTE DEL MODELO (SALIDA)



Fuente: Elaboración propia.



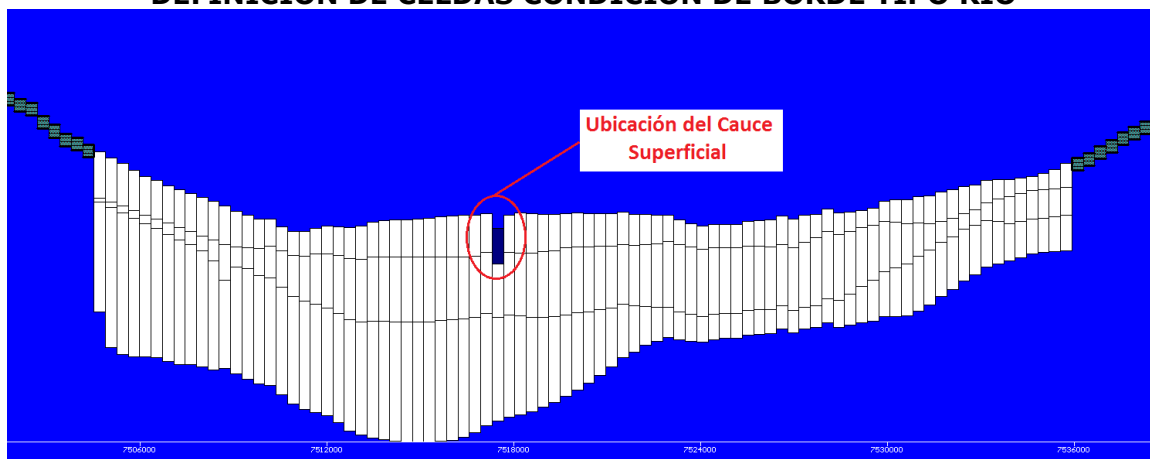
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la condición de borde oriental de Matraz, definida con pozos de inyección, fue cambiada por 2 condiciones de borde de nivel constante en Salado y Llalqui, los cuales entregan flujo subterráneo dependiendo de las características del sistema, sin forzar la entrada de agua. Además, se agregó una condición de borde en el sector de Chuquicamata, de acuerdo a lo observado en el Estudio Talabre.

La condición de borde de río fue modificada en función de los nuevos niveles de terreno ingresados al modelo. Los nuevos niveles de terreno permiten identificar claramente la ubicación del cauce, representado por celdas con una cota de terreno notoriamente menor a las celdas vecinas (ver Figura 10.2-10), debido a que en la mayoría de su recorrido, los cauces se ubican en un cañón, en que su profundidad en algunos sectores es incluso cercana a los 100 m. En el caso del río Loa, éste presenta tramos en su recorrido en el que contacta tanto con el estrato intermedio como con el inferior, aparte de hacerlo en el estrato superior la mayor parte de su recorrido. De esta forma se reproduce lo desarrollado en el modelo del Estudio Talabre, el cual demostró el comportamiento anterior que tiene el río Loa y su implicancia en los procesos de interacción acuífero/río.

Por otra parte, los valores de conductancia impuestos inicialmente para cada una de las celdas con condición de borde de río, fueron en concordancia con lo adoptado en el Estudio Talabre y posteriormente modificados debido al proceso posterior de calibración del modelo.

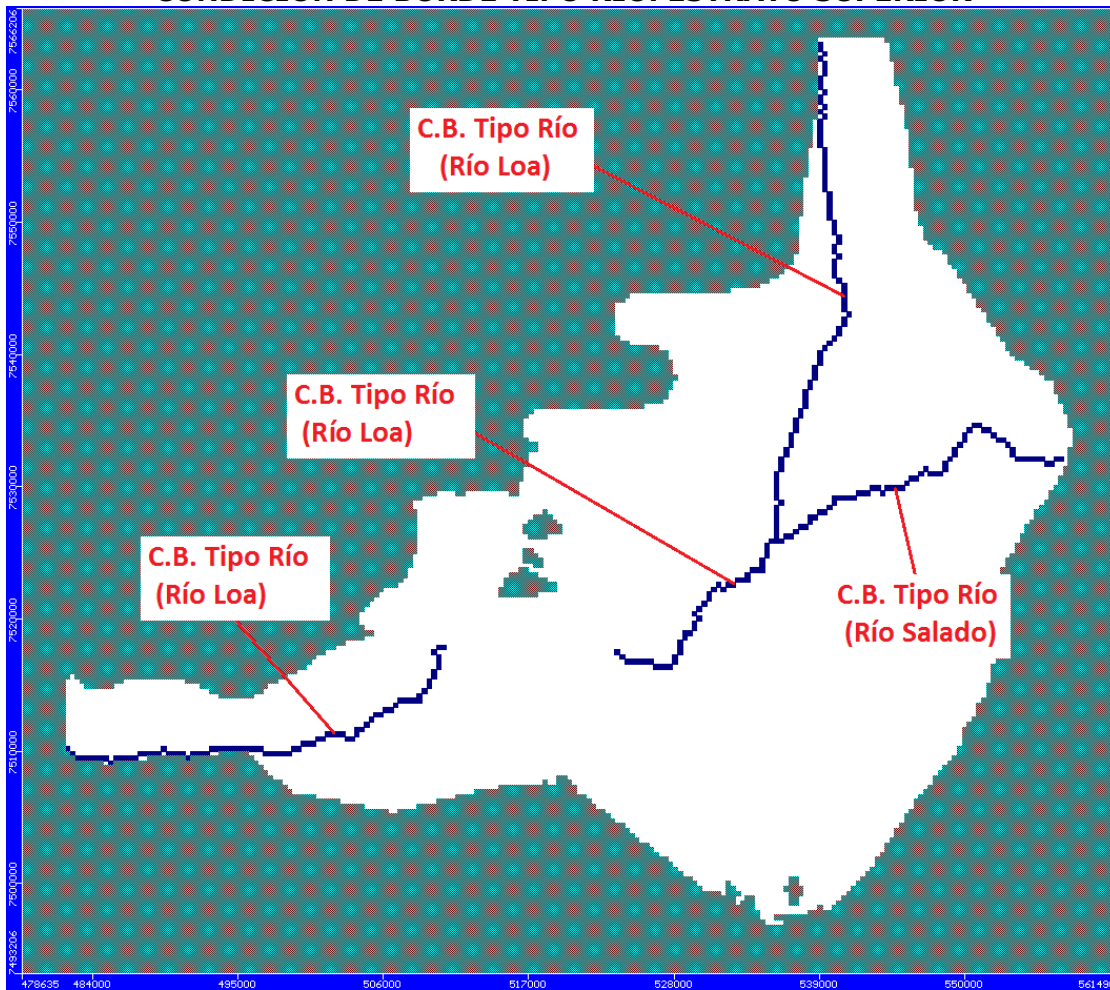
FIGURA 10.2-10
DEFINICIÓN DE CELDAS CONDICIÓN DE BORDE TIPO RÍO



Fuente: Elaboración propia.

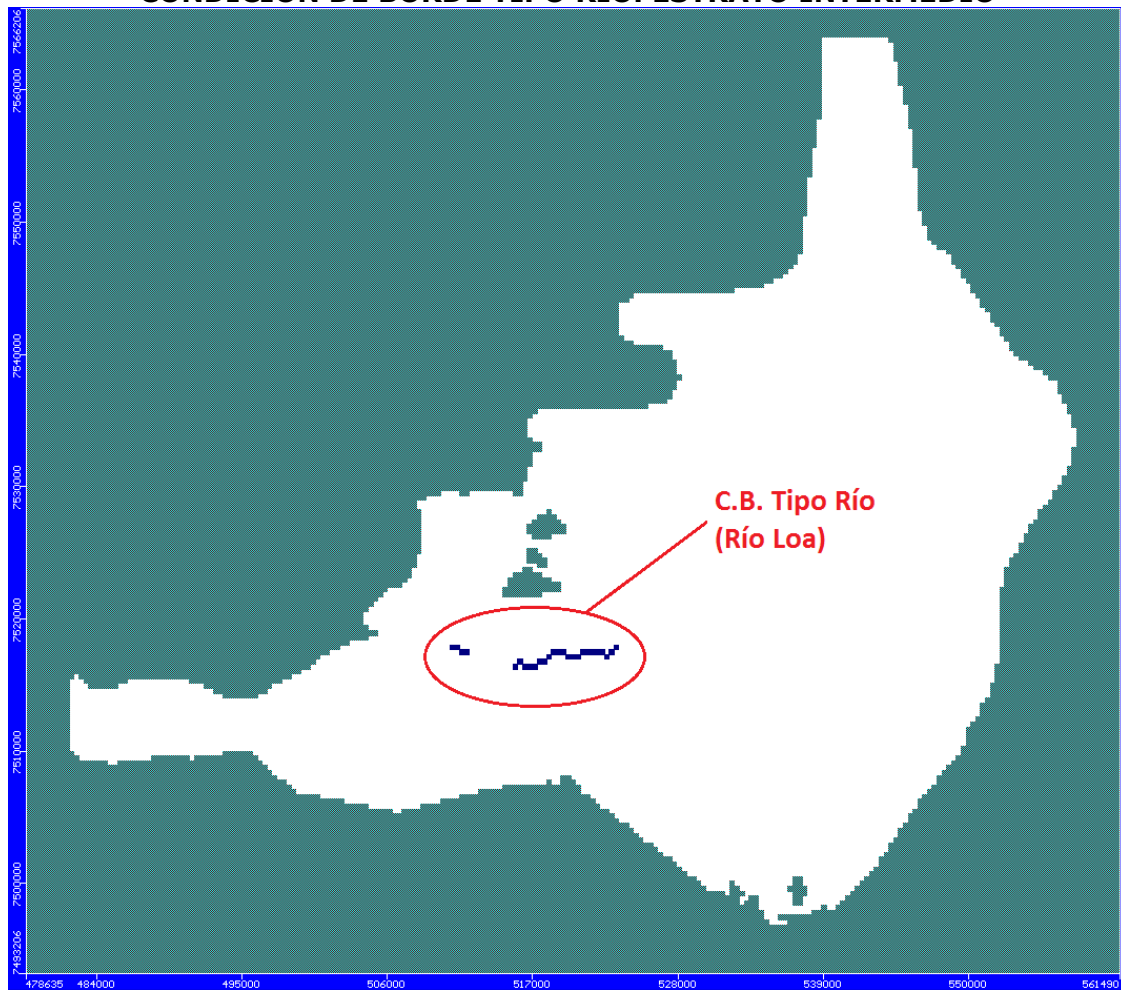
En las Figuras 10.2-11 a 10.2-13, se presenta la definición de la condición de borde tipo río para representar los cauces superficiales río Loa desde Conchi hasta la salida poniente del modelo y río Salado en el tramo que va desde el sector de sifón Ayquina aproximadamente hasta su confluencia con el río Loa.

FIGURA 10.2-11
CONDICIÓN DE BORDE TIPO RÍO. ESTRATO SUPERIOR



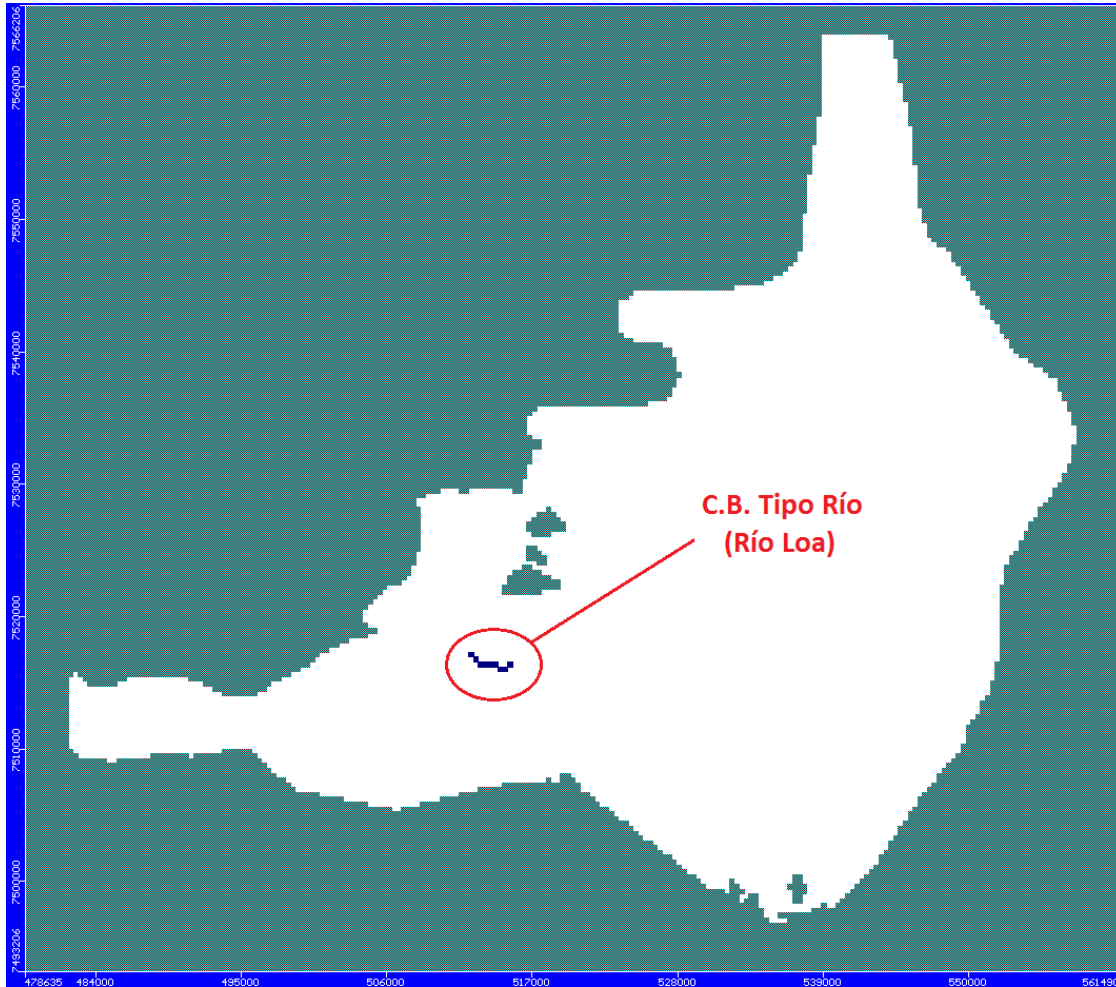
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 10.2-12
CONDICIÓN DE BORDE TIPO RÍO. ESTRATO INTERMEDIO



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 10.2-13
CONDICIÓN DE BORDE TIPO RÍO. ESTRATO INFERIOR



Fuente: Elaboración propia.

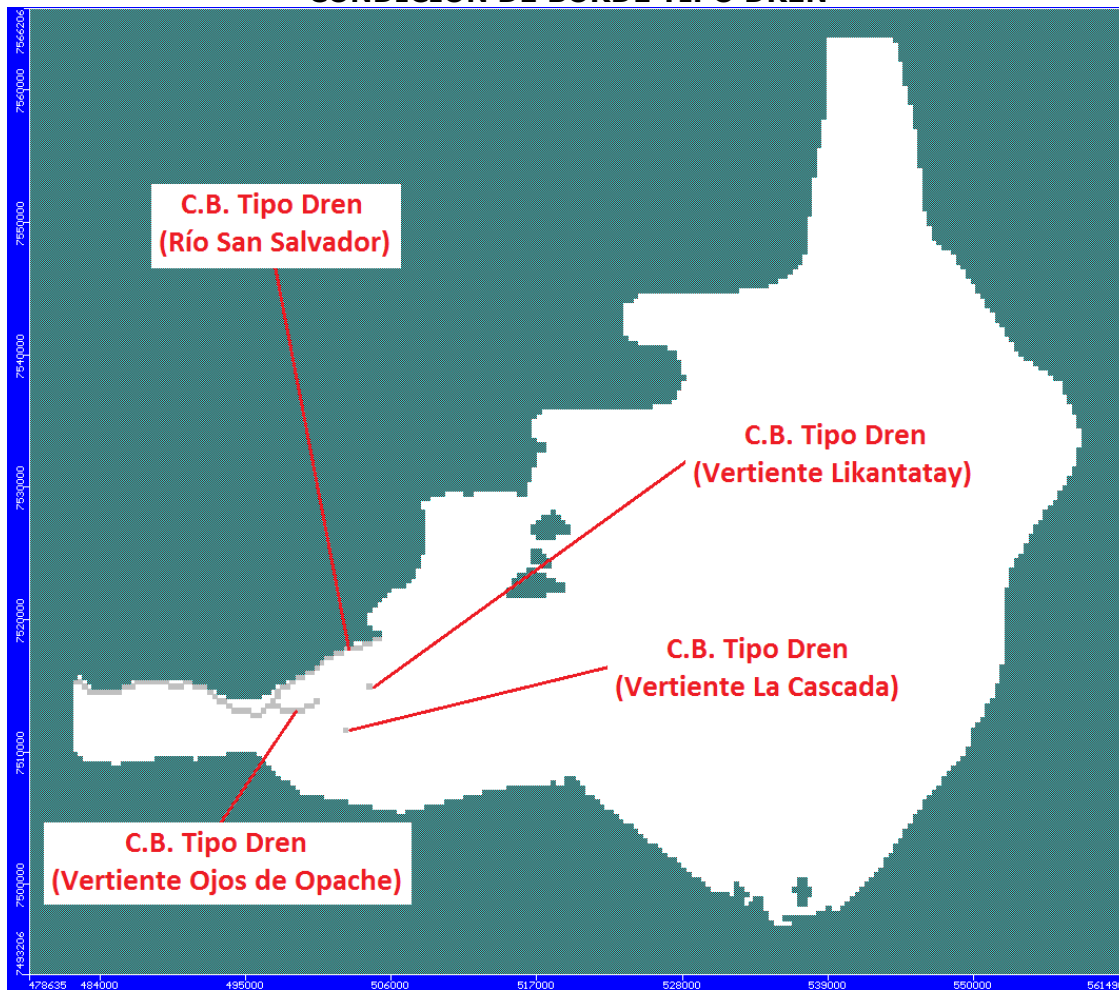
Además de lo anterior, se eliminó el río San Salvador en la condición de río (originalmente en modelo de Matraz), debido a que este cauce se genera debido a los afloramientos del acuífero en el sector poniente de Calama, por lo que su representación se realizó utilizando celdas tipo Dren. Las celdas tipo dren definidas para representar este río presentan cotas variables de acuerdo a la topografía de su cauce y con valores de conductancia inicial de $10 \text{ m}^2/\text{día}$, valor estimado en el estudio DGA (2003)³.

Junto con el río San Salvador, se representaron las vertientes Ojos de Opache, Likantatay y La Cascada utilizando celdas tipo Dren con cotas variables en el caso de la vertiente Ojos de Opache, según la topografía que se dispone de su cauce y cotas de 2166,5 y 2.202 m, para las vertientes La Cascada y Likantatay, respectivamente. En el caso de los valores de conductancia iniciales adoptados fueron 12.000, 1.000 y $75 \text{ m}^2/\text{día}$ para las vertientes Ojos de Opache, La Cascada y Likantatay, respectivamente, de acuerdo al estudio DGA (2003).

³ "Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui. Cuenca Río Loa". SIT N°85, DGA. 2003.

En la Figura 10.2-14, se presenta la condición de borde tipo dren definida en el modelo tanto para las vertientes como para el río San Salvador.

FIGURA 10.2-14
CONDICIÓN DE BORDE TIPO DREN



Fuente: Elaboración propia.

10.2.5. Recargas

Las recargas al sistema subterráneo de Calama se dividen en 6 fuentes distintas: recargas por precipitación, riego, pérdidas del sistema de agua potable, infiltración del tranque Talabre, flujo subterráneo y recarga por infiltración desde los ríos.

La recarga por precipitación fue ingresada a la mayor parte del área activa del modelo y corresponde al porcentaje de la precipitación que no contribuye ni al flujo superficial ni a la evapotranspiración, por lo que percola hacia la napa subterránea. La magnitud total de esta recarga se muestra en el Cuadro 10.2-2, en conjunto con el resto de las recargas.

**CUADRO 10.2-2
RECARGAS DEL MODELO**

RECARGA	RANGO (l/s)
Precipitación	61
Riego	76
Agua Potable	50
Tranque Talabre	21
Subterránea	700-1.000
Río	300-900

Fuente: Elaboración Propia

La recarga producto de la percolación de las zonas de riego fueron obtenidas en función de los resultados del modelo MAGIC. En primer lugar se definieron espacialmente las 3 zonas incluidas en el área modelada, correspondientes a Calama, Chiu Chiu y Lasana. Luego, a cada una de las zonas se le asignó el valor de percolación obtenido del proceso de calibración en MAGIC.

La recarga por filtraciones del sistema de agua potable de Calama fue calculado por Matraz y fue utilizado en la reconstrucción del modelo. Este valor fue chequeado y representa un valor estándar de pérdida en sistemas de distribución de agua potable.

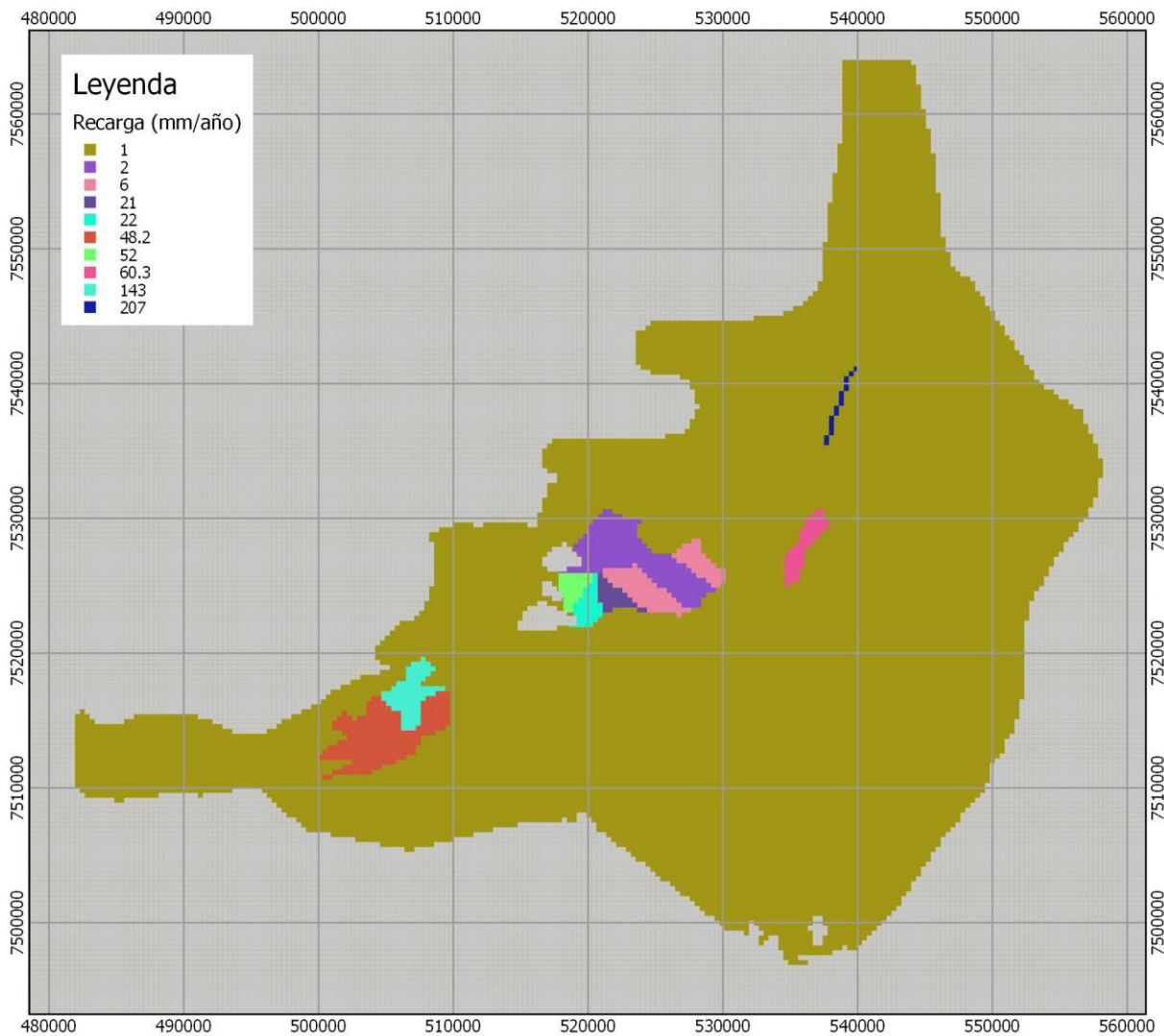
La recarga producto de la infiltración desde el tranque Talabre fue estudiada en detalle en el Estudio Talabre, por lo que se utilizó la misma magnitud y zonificación utilizada en aquel modelo. En dicho estudio, se generaron perfiles donde se obtuvieron flujos por unidad de ancho que al ser multiplicadas por una distancia equivalente entre secciones de control, permitió la estimación de un flujo total por infiltración desde el tranque hacia la unidad acuífera.

La recarga subterránea corresponde al flujo de entrada generado por las condiciones de borde de nivel constante Chuquicamata, Conchi, Salado y Llalqui y fueron calibradas de manera tal de ser capaces de explicar el balance hídrico de la zona de estudio.

Finalmente, la recarga por infiltración desde los cauces corresponde a las pérdidas de agua desde los ríos Loa y Salado en sus diferentes tramos. Estas pérdidas son calculadas por MODFLOW, aunque son ajustadas en el proceso de calibración, de manera tal de representar los flujos de pérdidas que se conocen en los diferentes sectores y que también han sido representados por el modelo MAGIC.

En la Figura 10.2-15, se presenta la zonificación de las recargas adoptadas para el modelo.

FIGURA 10.2-15
ZONIFICACIÓN DE LAS RECARGAS DEFINIDAS EN EL MODELO



Fuente: Elaboración propia.

10.2.6. Descargas

Para la situación en régimen permanente, se producen 3 tipos de descargas desde el acuífero: descargas a través del sistema de drenes descrito en la definición de las condiciones de borde, descargas por afloramiento de los ríos calculada por el modelo y salida subterránea a través de la condición de borde de nivel constante del sector poniente.

Los valores asociados a estas descargas se obtendrán como resultado del proceso de calibración.

10.2.7. Pozos de Observación y Pozos de Bombeo

Se definieron una serie de pozos de observación en base a la información disponible en el Estudio Talabre y Estudio Tesoro, los cuales presentan información de nivel para Enero 2003, tal como se muestra en el Cuadro 10.2-3.

**CUADRO 10.2-3
POZOS DE OBSERVACIÓN CON INFORMACIÓN DE NIVELES PARA ENERO 2003**

Pozo Observación	Coordenadas UTM: WGS-84		Nivel Observado (m s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)	
AEROPUERTO	514.250	7.510.760	2.363,03
ARMH-1	513.800	7.522.108	2.367,92
ARMH-2	514.679	7.524.853	2.398,00
ARMH-3	513.319	7.520.127	2.318,00
ARMH-4	514.158	7.518.368	2.316,02
ARMH-5	511.612	7.521.818	2.323,89
CHU-26B	530.654	7.536.726	2.610,00
CHU-45	509.709	7.525.436	2.390,60
CHU-47	508837	7.525.409	2.387,91
CHU-48	509.484	7.526.712	2.416,90
CHUCA-1	512.044	7.512.625	2.330,75
CHUCA-10B	508.911	7.525.266	2.377,50
CHUCA-13B	508.859	7.525.280	2.381,53
CHUCA-1B	511.996	7.512.638	2.306,64
CHUCA-2	509.591	7.509.647	2.301,83
CHUCA-3	509.347	7.514.415	2.246,77
CHUCA-3B	509.300	7.514.453	2.209,25
CHUCA-5	510.125	7.520.815	2.286,90
CHUCA-6	507.830	7.521.015	2.276,33
CHUCA-6B	507.792	7.520.984	2.249,68
CHUCA-8	509.448	7.524.973	2.371,88
LE-1	502.677	7.516.487	2.171,64
LE-2	503.121	7.516.805	2.175,27
LE-4	502.632	7.515.411	2.190,72
LE-6	503.046	7.515.996	2.195,50
LE-9	505.378	7.515.710	2.221,36
P-21	504.035	7.514.665	2.211,53
PBMM-1	509.536	7.526.713	2.411,03
PBMM-2	509.090	7.525.152	2.377,50
PBMM-3	510.476	7.523.354	2.331,00
PBMM-4	509.055	7.523.032	2.314,00
PBMM-5	513.768	7.519.244	2.318,00

CUADRO 10.2-3
POZOS DE OBSERVACIÓN CON INFORMACIÓN DE NIVELES PARA ENERO 2003

Pozo Observación	Coordenadas UTM: WGS-84		Nivel Observado (m s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)	
PBMM-6	509.163	7.519.920	2.251,00
PBMM-7	511.488	7.521.739	2.323,51
PBMM-8	508.927	7.524.334	2.349,00
PBMM-9	508.511	7.525.010	2.366,00
PPR-1	504.398	7.515.153	2.218,17
PPR-4	503.867	7.514.707	2.210,53
PPR-5	502.588	7.515.488	2.191,49
REC-2	522.889	7.528.679	2.487,00
REC-3	523.902	7.528.992	2.493,00
SE-1	529.267	7.536.455	2.597,66
SE-2	526.492	7.523.388	2.459,01
SE-3	531.026	7.526.845	2.521,30
SE-5	514.248	7.518.275	2.316,46
SE-5B	514.204	7.518.297	2.315,00
SI-10B	513.996	7.524.385	2.400,00
SI-10C	523.599	7.533.239	2.517,13
SI-10E	514.013	7.524.364	2.398,00
SI-11B	514.170	7.525.597	2.406,00
SI-11E	515.254	7.527.219	2.423,00
SI-12C	511.840	7.521.456	2.323,00
SI-12E	516.113	7.526.345	2.411,00
SI-13C	517.951	7.528.299	2.451,00
SI-13E	518.316	7.523.146	2.435,50
SI-14C	514.727	7.525.737	2.406,50
SI-14E	517.894	7.524.628	2.430,00
SI-15C	514.191	7.525.612	2.404,50
SI-15E	511.513	7.526.125	2.404,50
SI-16C	514.252	7.525.239	2.406,50
SI-17C	514.036	7.524.452	2.397,00
SI-17E	513.723	7.526.897	2.419,00
SI-18C	511.818	7.521.442	2.324,00
SI-18E	514.465	7.526.424	2.413,00
SI-19C	516.085	7.526.327	2.413,00
SI-1B	512.620	7.526.213	2.407,50
SI-1E	512.631	7.526.182	2.407,50
SI-20C	517.242	7.524.387	2.429,85

CUADRO 10.2-3
POZOS DE OBSERVACIÓN CON INFORMACIÓN DE NIVELES PARA ENERO 2003

Pozo Observación	Coordenadas UTM: WGS-84		Nivel Observado (m s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)	
SI-20E	516.139	7.527.488	2.434,00
SI-21C	518.013	7.528.341	2.455,00
SI-21E	515.928	7.527.662	2.434,40
SI-22C	519.888	7.529.961	2.484,00
SI-22E	513.127	7.526.975	2.413,00
SI-23C	507.166	7.519.870	2.236,00
SI-23E	514.735	7.525.657	2.407,00
SI-24C	513.366	7.520.134	2.355,52
SI-24E	507.072	7.519.890	2.240,00
SI-25E	519.815	7.533.274	2.492,80
SI-28E	513.397	7.524.652	2.398,00
SI-29E	512.979	7.526.675	2.411,00
SI-2B	513.224	7.526.417	2.409,50
SI-2E	513.230	7.526.341	2.409,00
SI-33E	519.768	7.519.660	2.409,00
SI-3B	513.723	7.526.897	2.412,00
SI-4B	512.560	7.526.861	2.413,60
SI-4E	512.540	7.526.840	2.414,00
SI-5B	510.964	7.528.815	2.423,00
SI-6B	513.759	7.525.167	2.397,00
SI-6C	513.783	7.525.195	2.403,55
SI-6E	513.838	7.524.942	2.400,00
SI-6P	513.765	7.525.157	2.404,69
SI-6PC	513.782	7.525.176	2.401,10
SI-7B	513.402	7.522.853	2.375,91
SI-7B1	513.438	7.522.853	2.379,52
SI-7D	533.252	7.529.542	2.578,31
SI-7PC	513.498	7.522.891	2.378,30
SI-8E	512.294	7.519.152	2.315,18
SI-9C	519.816	7.529.927	2.484,00
SI-9E	513.684	7.517.557	2.313,10
SI-9P	514.764	7.525.609	2.406,00
TB-01	518.199	7.521.000	2.422,00
TB-03	519.101	7.528.222	2.467,00
TL-02C	520.767	7.521.912	2.442,00
TL-03C	524.306	7.522.540	2.455,00

CUADRO 10.2-3
POZOS DE OBSERVACIÓN CON INFORMACIÓN DE NIVELES PARA ENERO 2003

Pozo Observación	Coordenadas UTM: WGS-84		Nivel Observado (m s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)	
TL-04C	520.825	7.519.713	2.473,93
TL-05C	523.548	7.519.937	2.485,34
TL-06C	525.922	7.522.379	2.455,50
TL-07C	527.190	7.520.543	2.470,00
TL-08C	527.670	7.516.763	2.463,00
TL-09C	529.286	7.520.726	2.473,50
TL-10C	528.237	7.522.552	2.472,00
TL-11C	517.910	7.524.003	2.437,79
TL-12C	516.336	7.523.373	2.404,69
TL-13C	514.707	7.522.779	2.387,00
TL-17D	529.243	7.525.095	2.476,10
TL-20D	517.625	7.524.895	2.435,31
TL-21	518.216	7.520.953	2.420,99
TL-23D	527.941	7.523.172	2.470,69
TL-24	523.582	7.517.761	2.422,00
TL-25	531.796	7.523.348	2.481,20
TL-26C	517.047	7.520.093	2.397,70
TL-27C	517.081	7.518.256	2.432,46
TL-28C	514.821	7.518.117	2.390,71
TL-29	525.727	7.523.784	2.451,99
TL-30D	517.818	7.522.929	2.424,00
TL-31C	528.258	7.522.553	2.472,00
TL-31D	519.089	7.528.165	2.466,30
TL-32	522.083	7.531.461	2.493,00
TL-33D	520.265	7.521.783	2.447,00
TL-34	530.180	7.527.347	2.495,00
TL-34C	530.345	7.526.022	2.485,00
TL-36C	528.009	7.515.843	2.469,00
TT-1E	523.403	7.529.635	2.489,97
TT-2D	524.160	7.529.087	2.491,22
TT-2E	523.507	7.528.328	2.478,80
TT-4D	524.158	7.528.617	2.485,00
TT-4E	523.934	7.529.915	2.491,00

Fuente: Elaboración propia en base a información presentada en los Estudios Talabre y Tesoro.

Nota: Todos estos pozos de observación serán usados en la etapa de calibración para el ajuste de los niveles observados con los simulados.

En cuanto a los pozos de bombeo, cabe señalar que se incorporaron al modelo en base a la información que presentó Matraz en su informe preparado para la DGA, en el Capítulo correspondiente al desarrollo del modelo conceptual. En dicho informe se presenta datos tanto de extracciones medias efectivas como de derechos otorgados. Sin embargo, el ingreso de esta información es sólo referencial en cuanto a ubicación, ya que no son utilizados en el proceso de calibración y su caudal ingresado es nulo. En el Cuadro 10.2-4, se presenta la información de los pozos de bombeo ingresados al modelo.

**CUADRO 10.2-4
POZOS DE BOMBEO INGRESADOS AL MODELO**

Pozo de Bombeo	Coordenadas UTM: WGS-84	
	Este (m)	Norte (m)
E1	543.470	7.525.142
E2	530.110	7.512.255
E3	544.879	7.517.919
GA-1	502.869	7.514.667
PPR-1	504.398	7.515.153
PPR-2	505.361	7.515.715
PPR-4	503.867	7.514.707
RT-2	508.861	7.525.280
SI-1B	512.620	7.526.213
SI-2B	513.224	7.526.417
SI-3B	513.723	7.526.897
SI-4B	512.560	7.526.861
SI-6B	513.759	7.525.167
W1	532.456	7.515.000
W5	537.453	7.515.745
SI-5B	510.964	7.528.815
CMG-1	504.586	7.511.886
IES-1	507.116	7.510.326
MP-1	535.244	7.522.943
P-1	539.478	7.520.478
P-10	503.460	7.514.207
P-19	503.707	7.514.507
P-21	504.035	7.514.665
P-24	504.093	7.514.588
P-25	503.711	7.514.146
P-27	503.839	7.513.955
PPR-3	503.039	7.515.995
PPR-5	502.588	7.515.488
PX	542.052	7.522.687
RT-1	507.818	7.520.969

CUADRO 10.2-4
POZOS DE BOMBEO INGRESADOS AL MODELO

Pozo de Bombeo	Coordenadas UTM: WGS-84	
	Este (m)	Norte (m)
W2	537.406	7.518.759
W6	535.202	7.513.815

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Matraz (2012).

10.3. Calibración del Modelo

El proceso de calibración en régimen permanente permitió el ajuste de los niveles estáticos determinados por el modelo numérico con los niveles observados en los pozos con información ubicados en el área de la cuenca hidrogeológica de Calama.

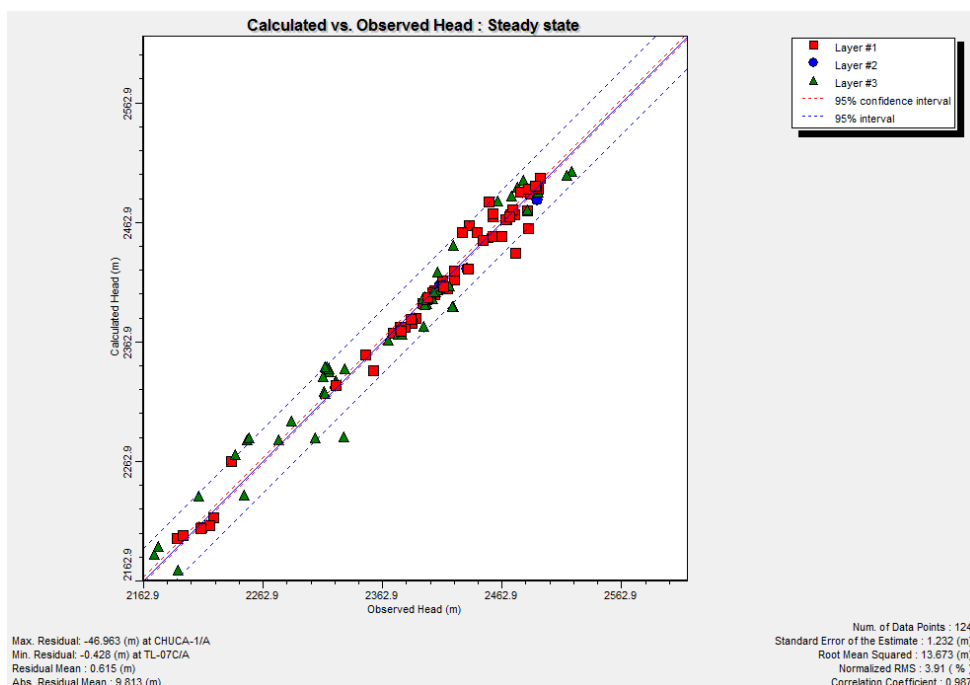
Los ajustes realizados consistieron en la modificación dentro de márgenes razonables los valores y la distribución espacial de los parámetros hidrogeológicos adoptados inicialmente antes de este proceso. En este caso debido a que la modelación se centrará sólo en un estado estacionario, el principal parámetro hidrogeológico que se modificó fue la conductividad hidráulica. Además, fueron ajustados las condiciones de borde de niveles constante, las conductancias de los ríos Salado, San Salvador y Loa, y de las vertientes Ojos de Opache, Likantatay y La Cascada. Todo lo anterior, tratando de acoplar paralelamente los flujos de entrada y salida, las descargas y las interacciones que se producen entre el río-acuífero (afloramientos, recuperaciones y pérdidas en los ríos, etc.).

El período de calibración adoptado fue el correspondiente a Enero de 2003 ya que existen condiciones estacionarias en la zona de estudio de acuerdo a lo planteado en el Estudio Talabre, por lo que no se puede asumir un período de calibración fijado en el año 2013 dado que el sistema no se encontraría en equilibrio.

10.3.1. Niveles Simulados versus Niveles Observados

Tras el proceso de calibración que incorporaron las modificaciones señaladas anteriormente, se obtuvo la siguiente curva de ajuste entre los niveles simulados por el modelo numérico y los niveles observados:

**FIGURA 10.3-1
RESULTADOS GRÁFICOS AJUSTE MODELO NUMÉRICO**



Fuente: Elaboración propia.

**CUADRO 10.3-1
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS Y RESIDUALES OBTENIDOS DE LA CALIBRACIÓN**

Parámetro	Fórmula	Valor
Coefficiente de Correlación (R^2)	$1 - \frac{\sum (N_{OBS} - N_{SIM})^2}{\sum (N_{OBS} - \bar{N}_{OBS})^2}$	0,987
Error Medio (m)	$\frac{1}{n} \cdot \sum r_i$	0,62
Error Absoluto Medio (MAE) (m)	$\frac{1}{n} \cdot \sum r_i $	9,81
Máximo Residual Absoluto (m)	$\max \{ N_{SIM} - N_{OBS} \}$	46,96
Mínimo Residual Absoluto (m)	$\min \{ N_{SIM} - N_{OBS} \}$	0,43
Desviación Estándar (m)	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (r_i - R)^2}$	1,23
RMS (m)	$\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum r_i^2}$	13,67
RMS Normalizado (%)	$\frac{RMS}{\max(N_{OBS}) - \min(N_{OBS})}$	3,91

Fuente: Elaboración propia.

10.3.2. Balance Hídrico en la Zona de Estudio

A partir del modelo numérico finalmente calibrado en régimen permanente, se obtuvo el siguiente balance global de la cuenca hidrogeológica de Calama, desagregado por las principales componentes de entrada y salida del sistema.

Se observa que error de cierre es de 0.41%, lo que se considera aceptable para una modelación numérica (error menor al 1%).

**CUADRO 10.3-2
BALANCE HÍDRICO DEL SISTEMA ACUÍFERO EN EL EL DOMINIO DEL MODELO**

ENTRADAS (I/s)		
Componente		Caudal
Caudal Subterráneo	NE	213
	SE	405
	N	77
	NO	160
Inf. Tranque Talabre		20
Inf. Riego		76
Inf. Agua Potable		50
Pérdida Ríos/ Aporte Acuífero	Loa Tramo 1	12
	Loa Tramo 2	0
	Loa Tramo 3	45
	Loa Tramo 4	331
Recarga por Precipitación		61
TOTAL ENTRADAS (I/s)		1.450

SALIDAS (I/s)		
Componente		Caudal
Caudal Subterráneo	O	363
Afloramiento Acuífero/Recuperación Ríos	Loa Tramo 1	0
	Loa Tramo 2	438
	Loa Tramo 3	0
	Loa Tramo 4	0
	Salado	135
Drenes	Rio Salvador	168
	V. Ojos de Opache	332
	V. La Cascada	0
	V. Likantatay	20
TOTAL SALIDAS (I/s)		1.456

Balance Global (I/s)	-6,0
Error Global (%)	0,41

Fuente: Elaboración propia.

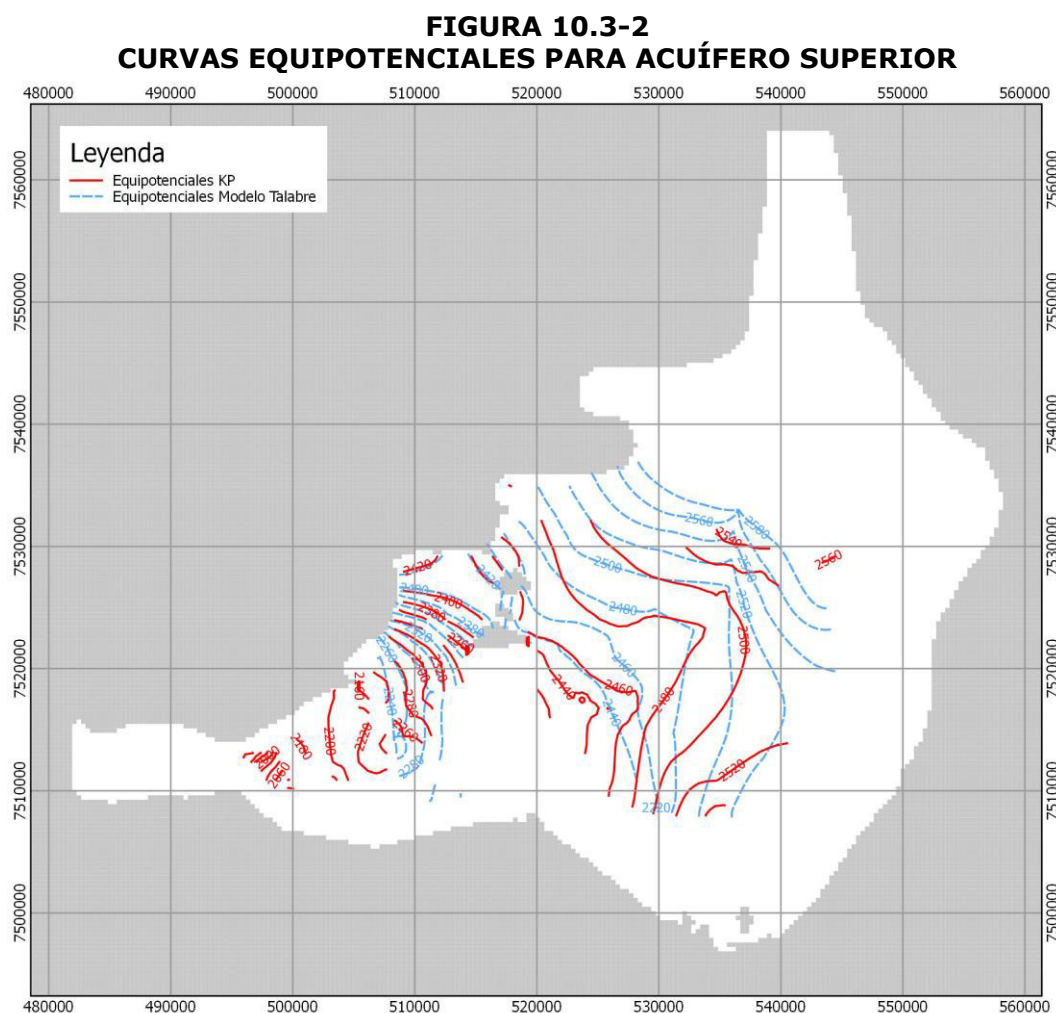
Se observa de manera particular que la entrada subterránea NO (Chuquicamata) corresponde a 160 l/s, valor que se condice con los resultados del Estudio Talabre y con

las estimaciones de este flujo realizadas en el modelo conceptual de aque estudio. Este flujo tiene origen en una cuenca muy alterada y con cotas máximas mayores a los 4,000 m s.n.m., por lo que la magnitud del caudal se estima aceptable.

En el caso de la entrada subterránea SE (Llalqui), ésta es de gran magnitud, lo cual permite explicar el alto nivel de afloramientos observados en el sector de Angostura. Si bien la cuenca aportante a este sector es pequeña, ésta posee cotas cercanas a los 3,500 m s.m., por lo que posee una recarga significativa por precipitación, a lo cual se une un posible aporte desde la cuenca del río Salado, la cual posee niveles de recarga mucho más altos.

10.3.3. Curvas Equipotenciales

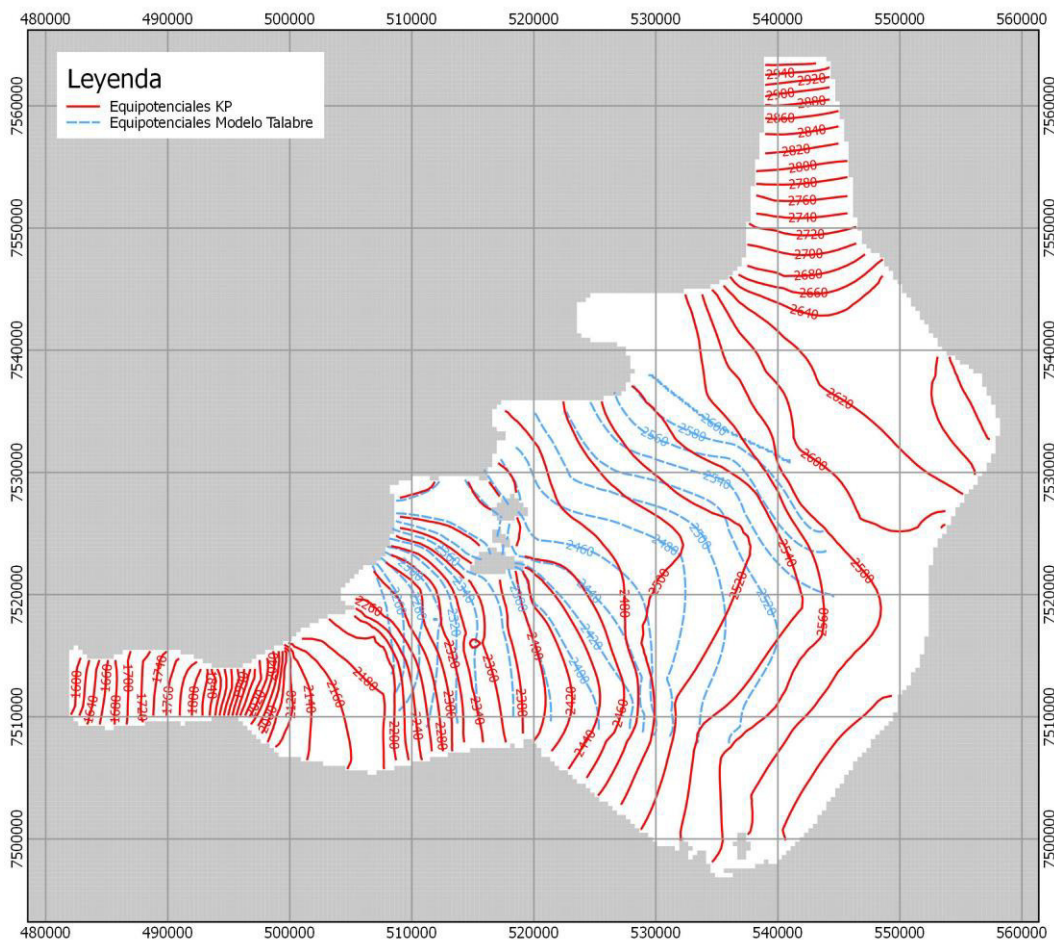
En las Figuras 10.3-2 y 10.3-3, se presentan las curvas equipotenciales obtenidas por el modelo numérico en régimen permanente tanto para la unidad acuífera superior como inferior respectivamente, siendo comparadas con las equipotenciales generadas del modelo Talabre en 2010.



Fuente: Elaboración Propia

Se observa de la figura anterior que las equipotenciales en el sector de Calama y tranque Talabre poseen la misma tendencia y valores similares. Esto se debe a que esa zona posee una gran cantidad de información, pudiéndose representar de mejor manera la realidad del sector. Las equipotenciales ubicadas más al poniente difieren en forma, pero coincidiendo en la zona cercana al cauce. Las diferencias se deben principalmente a la falta de información en esos sectores, asociado a la mayor extensión del modelo actual, con un control de las condiciones de borde mucho más alejado.

**FIGURA 10.3-3
CURVAS EQUIPOTENCIALES PARA ACUÍFERO INFERIOR**



Fuente: Elaboración Propia

La situación observada en esta figura es similar a lo ocurrido en el estrato superior, es decir, las equipotenciales de ambos modelos son similares en los sectores cercanos al tranque Talabre y Calama, donde existe más información, mientras que en el resto del acuífero las diferencias se explican por la ausencia de niveles observados.

11. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

A solicitud de la Dirección General de Aguas (Oficinas Central y Antofagasta), se han elaborado 5 escenarios de simulación de los modelos desarrollados en el presente estudio.

Para la modelación de escenarios en MAGIC, se ha extendido la simulación en un periodo igual al periodo calibrado (en términos hidrológicos), extendiendo la información de entrada hasta el año 2050. Además para este periodo de simulación ya no se consideran los drenes en el río San Pedro, los cuales dejan de estar operativos el año 1990, dando paso a la explotación del acuífero en ese sector solo por pozos de bombeo.

En el caso de la modelación en Visual MODFLOW, se ha desarrollado la simulación en régimen permanente en base a las modificaciones requeridas de los respectivos escenarios.

Los escenarios de simulación se mencionan a continuación, junto a una breve descripción de ellos:

- **Escenario 1 – Derechos Superficiales al 100%:** Corresponde al escenario en que se extrae el total de derechos de agua superficiales de la cuenca.
- **Escenario 2 – Derechos Subterráneos al 100%:** Corresponde al escenario en que se extrae el total de derechos de agua subterráneos de la cuenca.
- **Escenario 3 – Volumen Sustentable del Acuífero:** Corresponde al escenario en que se calcula el caudal máximo de bombeo que permita mantener un volumen sustentable en el acuífero.
- **Escenario 4 – Eliminación de Descarga de Aguas Servidas:** Corresponde al escenario en que las aguas servidas de Calama dejan de ser descargadas al cauce y se dispone de ellas para un uso alternativo.
- **Escenario 5 – Traslado de Derechos de Lasana a Calama:** Corresponde al escenario en que los derechos de agua superficiales asociados a canales de Lasana son trasladados a Calama.

11.1. Escenario 1 – Derechos Superficiales al 100%

En este escenario se utiliza el 100% de los derechos asociados a las captaciones superficiales, observándose una disminución de caudal a la entrada de Calama. El análisis se realizó en el nodo asociado a la estación fluviométrica Río Loa en Yalquincha, pero la estadística base corresponde a caudal calculado en ese punto como resultado de la simulación para el periodo comprendido entre los años 2012 y 2050.

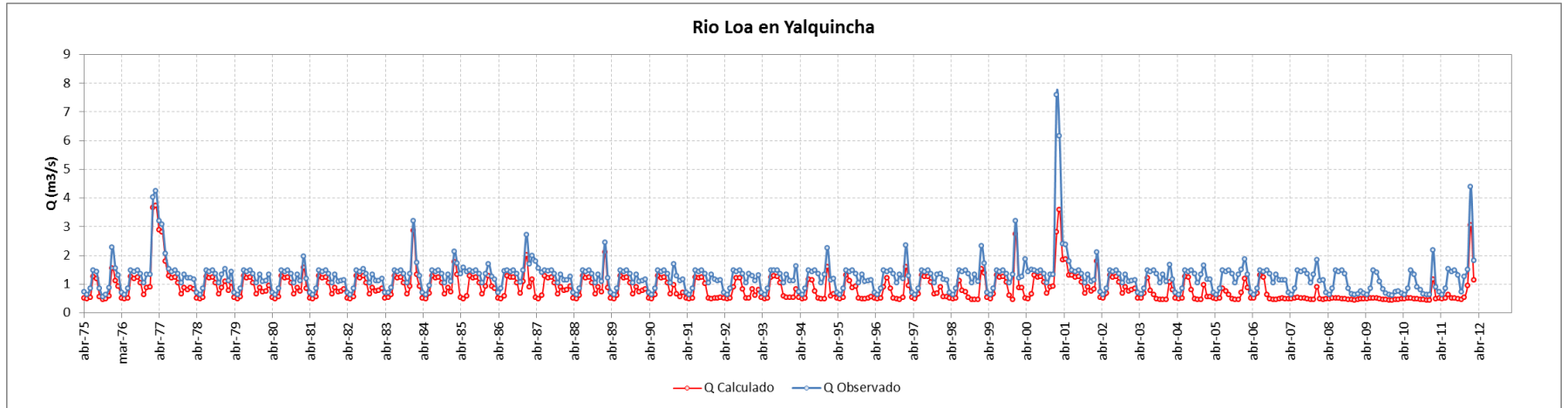
En el nodo de análisis existe influencia de las captaciones existentes en las cuencas del río Salado, río San Pedro y aguas arriba del embalse Conchi. El aumento en el uso de estos derechos se refleja en una variación negativa del flujo superficial a la entrada de la ciudad de Calama correspondiente a un valor medio de 408 l/s. En la Figura 11.1-1 se observa de manera gráfica la variación existente en este punto bajo este supuesto.

11.2. Escenario 2 – Derechos Subterráneos al 100%

Este escenario corresponde al uso del 100% de los derechos subterráneos existentes en la cuenca del río Loa. En este caso también se consideraron pozos que, de acuerdo a la actividad en terreno, se definieron sin uso para el periodo de calibración. El análisis se realizó en el nodo que representa la estación fluviométrica río Loa en Yalquincha, pero la estadística de comparación corresponde al caso base de simulación para el periodo 2012 – 2050 realizado posteriormente a la calibración del modelo.

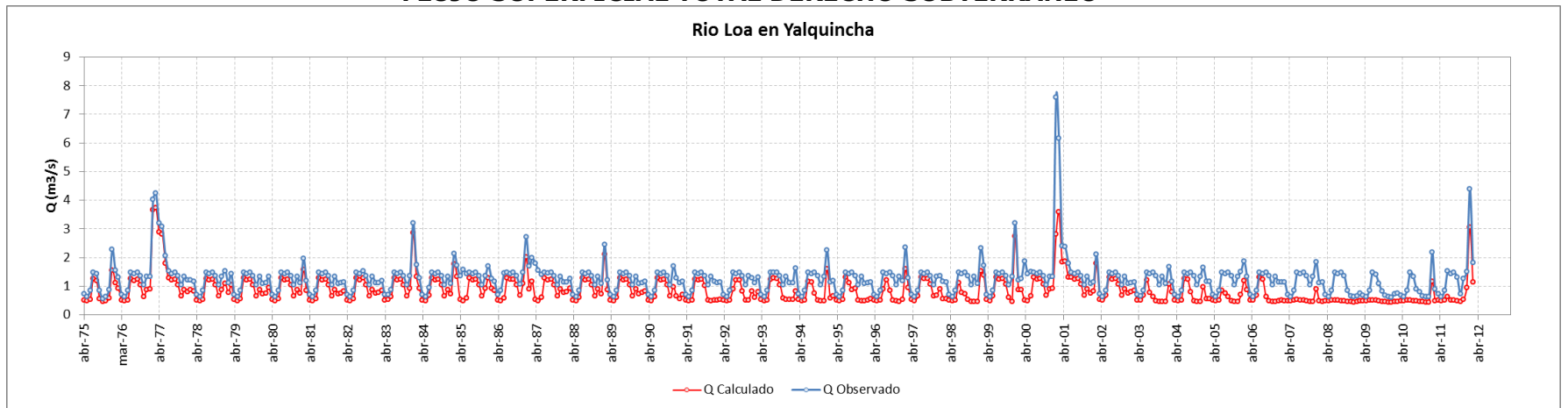
Los pozos de bombeo de mayor influencia en la entrada a la ciudad de Calama corresponden a los ubicados en los acuíferos de Pampa Llalqui y Calama. En el nodo de análisis se observa una disminución del flujo superficial en un valor medio de 655 l/s, la que se justifica en la influencia de los pozos de bombeo sobre los afloramientos existentes en el acuífero de Calama.

FIGURA 11.1-1
FLUJO SUPERFICIAL TOTAL DERECHO CAPTACIONES



Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 11.2-1
FLUJO SUPERFICIAL TOTAL DERECHO SUBTERRÁNEO



Fuente: Elaboración Propia.

11.3. Escenario 3 – Volumen Sustentable del Acuífero

Este escenario consistió en determinar volúmenes sustentables de los principales acuíferos de la cuenca mediante la modelación desarrollada con Visual Modflow para el acuífero de Calama, y los restantes mediante la modelación con MAGIC. Para esto, se consideraron los criterios definidos por la DGA para la otorgación de derechos de agua.

11.3.1. Criterios Definidos por la DGA para Derechos de Agua

Los criterios definidos por la DGA son los siguientes

Criterio 1: Descensos Sostenibles en el Tiempo a Nivel de Acuífero

Los descensos deben estar estabilizados para una operación de 50 años del sistema. Esta estabilización de niveles debe ser respaldada por una recarga suficiente que ingresa al volumen de control (recarga superficial, infiltración desde el río, aporte de flujos de agua subterránea de acuíferos superiores, etc.).

Criterio 2: Afectación sobre Aguas Superficiales

La evaluación de la interacción entre aguas superficiales (ríos, vertientes, etc.) y aguas subterráneas debe ser despreciable, de tal forma de no afectar los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción (recursos inducidos sobre fuentes superficiales comparados con una situación de régimen natural) debe ser menor que el 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, los cuales se evalúan como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

$$\Delta Q = \text{Deja de aflorar} + \text{Aumenta Infiltración}$$

$$\Delta Q < 10\% \cdot Q_{\text{Flujo Pasante } 85\%}$$

Criterio 3: Satisfacción Demanda

Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda.

$$Q_{\text{ACEPTADO}} \geq 95\% \cdot Q_{\text{IMPUESTO}}$$

Criterio 4: Pozos Desconectados en el Modelo

En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

$$\text{Pozos Desconectados} \leq 5\% \text{ Total Pozos}$$

11.3.2. Determinación del Volumen Sustentable del Acuífero de Calama

Para la realización de este análisis se utilizó tanto el modelo hidrogeológico del acuífero como el modelo hidrológico MAGIC de manera independiente. Debido a las limitaciones que posee MAGIC en la representación de acuíferos, sólo se evaluó el Criterio 2 mediante esta herramienta.

11.3.2.1. Evaluación mediante Visual MODFLOW

En primer lugar, se presenta el análisis realizado mediante Visual MODFLOW. Para esto, se dispuso del modelo hidrogeológico en régimen permanente, en el cual se ingresaron los 25 pozos de bombeo con derechos de aprovechamiento otorgados, los cuales se presentan en el Cuadro 11.3-1. Es importante aclarar que no se dispone de la habilitación asociada a cada uno de estos pozos, por lo que el análisis se realizó considerando que todos ellos poseen cribas en los 3 estratos acuíferos.

**CUADRO 11.3-1
POZOS CON DERECHOS ACUÍFERO CALAMA**

Código MAGIC	Norte	Este	Caudal (m³/s)
PO-15	7.522.986	535.302	31
PO-16	7.515.039	504.218	66
PO-21	7.516.370	503.227	45
PO-22	7.515.083	504.057	1
PO-23	7.516.070	505.550	47
PO-24	7.515.864	502.771	50
PO-25	7.515.513	504.530	1
PO-26	7.515.041	503.053	17
PO-29	7.514.962	504.277	47
PO-30	7.514.581	503.644	73
PO-31	7.514.881	503.891	65
PO-32	7.514.520	503.895	70
PO-33	7.514.329	504.023	65
PO-34	7.512.629	530.295	30
PO-35	7.523.061	542.237	40
PO-36	7.514.189	535.387	35
PO-37	7.515.374	532.641	50
PO-38	7.519.133	537.591	20
PO-39	7.516.119	537.638	20
PO-40	7.518.293	545.064	50
PO-41	7.525.516	543.655	40
PO-42	7.520.852	539.663	34
PO-43	7.510.700	507.300	30
PO-44	7.521.343	508.002	30
PO-45	7.525.654	509.045	2

Fuente: Elaboración Propia

Se realizaron 4 simulaciones del modelo para factores de uso de 25%, 50%, 75% y 100% de los derechos otorgados, de manera tal de poder analizar cada uno de los criterios exigidos por la DGA.

Los resultados de la operación de los 4 escenarios mencionados anteriormente fue satisfactoria, por lo que corresponder a simulaciones en régimen permanente, se cumple inmediatamente con el Criterio 1 para todos los factores de uso.

En cuanto al Criterio 2, éste fue evaluado obteniendo los valores de infiltración y afloramiento de los cauces para cada operación del modelo y comparada con el modelo calibrado, de manera tal de obtener el caudal que deja de aflorar el sistema y el caudal que aumenta la infiltración. La suma de esos valores fue comparada con el 10% del caudal superficial de 85% de salida, para lo cual se realizó un análisis de frecuencia a los caudales asociados tanto al río San Salvador como Loa, ya que ambos escurren en el punto de cierre del acuífero. Como resultado de este análisis, se obtuvieron los caudales mostrados en el Cuadro 11.3-2.

**CUADRO 11.3-2
CAUDALES 85%**

Río	Caudal (l/s)
San Salvador	440
Loa	410
TOTAL	850

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a lo mostrado en el Cuadro anterior, el 10% del caudal superficial de 85% corresponde a 85 l/s.

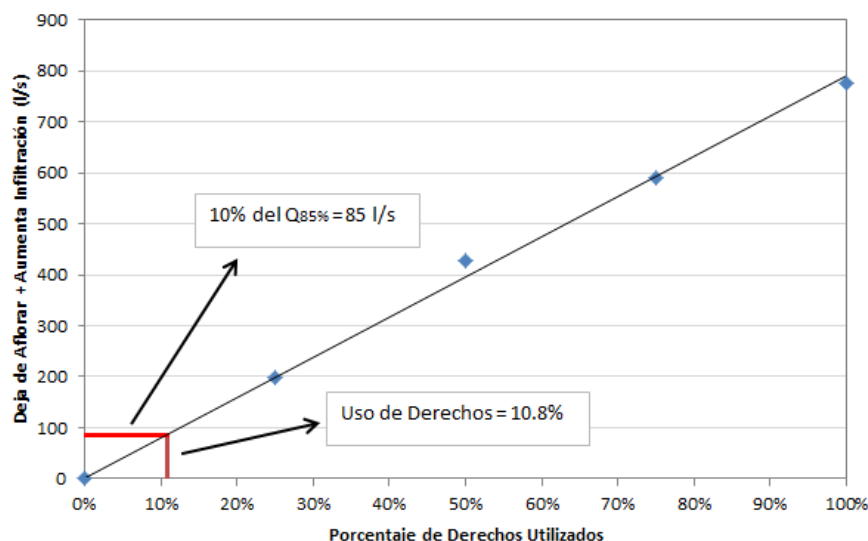
Finalmente, el Cuadro 11.3-3 muestra los resultados de las simulaciones en Visual MODFLOW en términos de la afección de las aguas superficiales. Estos resultados se muestran de manera gráfica en la Figura 11.3-1, donde se obtiene que el máximo uso de los derechos que permite cumplir con el Criterio 2 corresponde a 10,7%, lo que equivale a un caudal total de aproximadamente 103 l/s.

**CUADRO 11.3-3
AFECCIÓN SOBRE AGUAS SUPERFICIALES**

Uso de Derechos	Aumento de Infiltración	Disminución de Afloramiento	Afección Total
0%	0	0	0
25%	99	100	199
50%	165	262	426
75%	272	317	590
100%	352	423	775

Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 11.3-1
AFECCIÓN SOBRE AGUAS SUPERFICIALES



Finalmente, los Criterios 3 y 4 se evaluaron en función del análisis de los pozos que resultaron colgados o completamente secos luego de la simulación. En este sentido, no se observó ningún pozo bajo esa situación, es decir, el total de los pozos fue capaz de extraer el caudal definido en cada uno de los escenarios, por lo que ambos criterios son respetados para todos los porcentajes de extracción. Sin embargo, este análisis sería más exacto al considerar la habilitación real de cada uno de los pozos, lo que podría resultar en alguno de ellos colgado, aunque dadas las condiciones acuíferas, se asume que la mayoría de ellos posee cribado en el estrato inferior, que es el más potente.

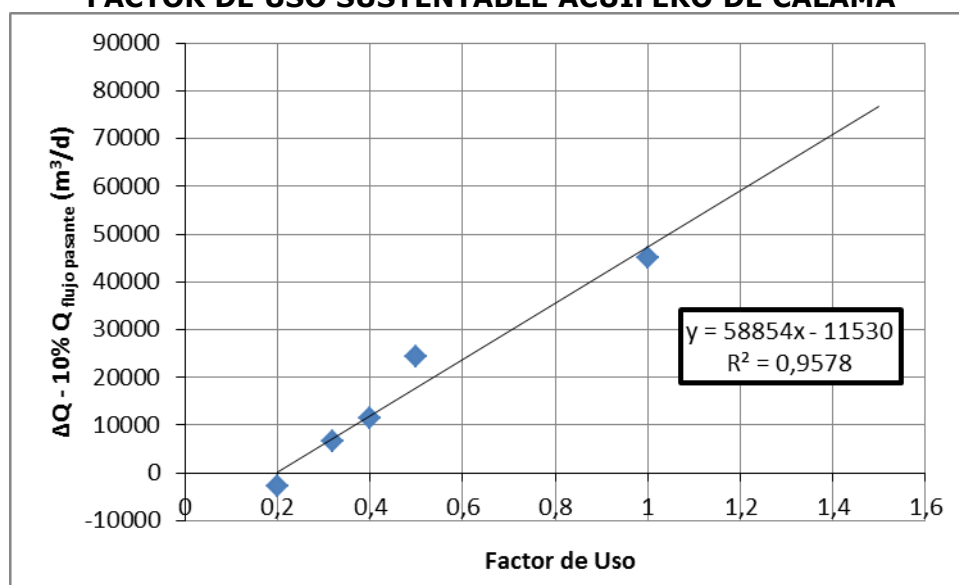
De acuerdo al análisis mostrado, el Criterio 2 es el que limita las extracciones subterráneas en el acuífero de Calama.

11.3.2.2. Evaluación mediante MAGIC

El mismo escenario fue evaluado además mediante la utilización de la herramienta MAGIC, a pesar de que en términos de modelación subterránea Visual MODFLOW proporciona una aproximación mucho más cercana a la realidad.

De acuerdo a los criterios determinados por la DGA para el análisis de la sustentabilidad de los acuíferos se utiliza el criterio 2, pues se ajusta de mejor forma a las capacidades de simulación con el programa MAGIC. Los escenarios a comparar se realizaron en base al periodo de simulación entre los años 2012 y 2050, no para el periodo de calibración 1975 - 2012. Se efectuaron diferentes simulaciones variando el porcentaje de uso de los derechos existentes en la cuenca, con lo que se logró definir de manera gráfica el porcentaje de uso límite de los derechos subterráneos en busca del cumplimiento del criterio DGA. La Figura 11.3-2 presenta los resultados de estas simulaciones.

FIGURA 11.3-2
FACTOR DE USO SUSTENTABLE ACUÍFERO DE CALAMA



Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la información proporcionada por la Figura 11.3-2, se calcula que el factor de uso sustentable para el acuífero de Calama corresponde al 19,6% de los derechos existentes.

El resultado difiere a lo determinado mediante la modelación en Visual Modflow que entregó un 10,8%. La construcción de los acuíferos por medio de MAGIC es simplificada tanto en sus propiedades intrínsecas, por ejemplo utilizando un solo estrato representativo, como en el cálculo de los flujos involucrados, mediante un balance de masa con flujos de entrada y salida sin considerar posibles flujos preferenciales o retardos en su avance y afloramiento. De esta forma, los resultados entregados por MAGIC respecto al sistema subterráneo son considerados como referenciales. A pesar de lo anterior, se determina realizar el mismo análisis para los acuíferos Río San Pedro y Salar de Llamara definidos en el modelo MAGIC.

11.3.3. Determinación del Volumen Sustentable en Otros Acuíferos

En base a la misma metodología de análisis, se repitió el criterio DGA para los acuíferos del río San Pedro y Salar de Llamara. Recordando que MAGIC no es una herramienta que se ajuste al sistema acuífero, si no que entrega resultados más que nada referenciales, se presentan las Figuras 11.3-3 y 11.3-4 con el análisis gráfico del caudal de bombeo sustentable de éstos acuíferos.

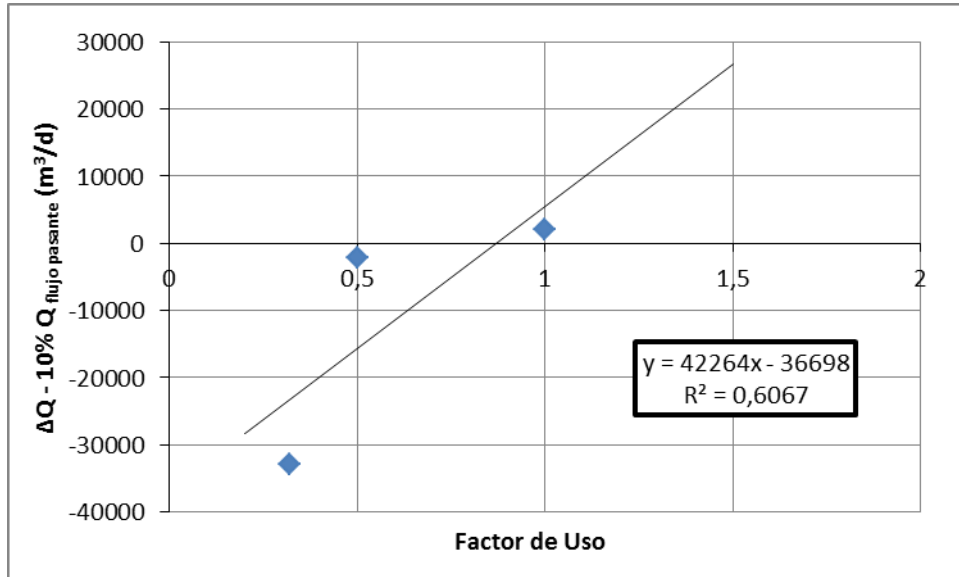
De acuerdo a los valores graficados se calcula el factor de uso sustentable para ambos acuíferos, los que se presentan en el Cuadro 11.3-4.

CUADRO 11.3-4
FACTOR DE USO SUSTENTABLE ACUÍFEROS SALAR DE LLAMARA
Y RÍO SAN PEDRO

Acuífero	Factor de Uso
Río San Pedro	0,87
Salar de Llamara	0,37

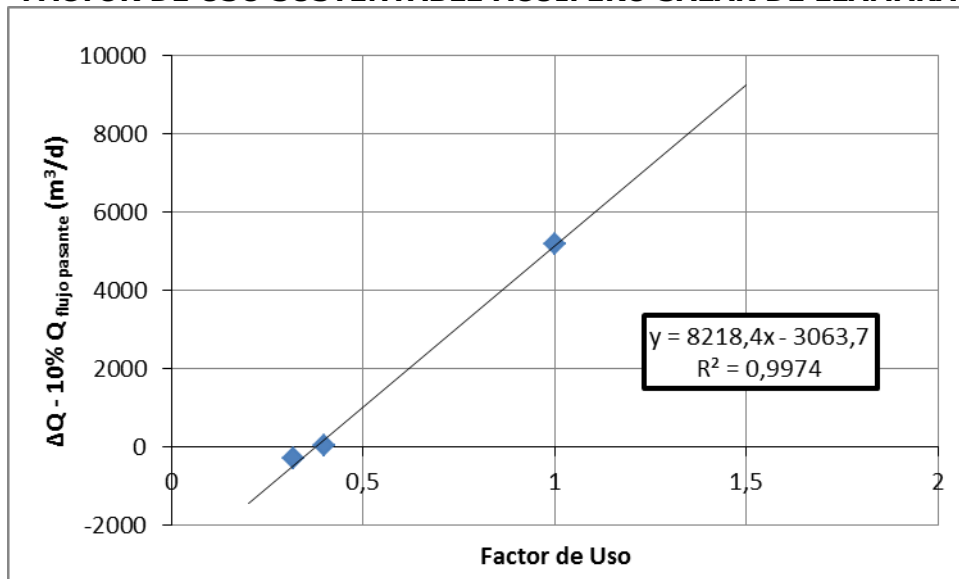
Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 11.3-3
FACTOR DE USO SUSTENTABLE ACUÍFERO RÍO SAN PEDRO



Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 11.3-4
FACTOR DE USO SUSTENTABLE ACUÍFERO SALAR DE LLAMARA



Fuente: Elaboración Propia.

11.4. Escenario 4 – Eliminación de Descarga de Aguas Servidas

Para la simulación de este escenario se asumió que el caudal de aguas servidas ya no es descargado en el cauce a partir del año 2013, y que será utilizado de manera tal que sale de la cuenca de manera definitiva. Debido a las consideraciones anteriores, el procedimiento de simulación consistió en aplicar un caudal de descarga nulo a partir de 2013 y analizar los efectos ocasionados aguas abajo, particularmente en la junta de los ríos Loa y San Salvador y en el poblado de Quillagua. El Cuadro 11.4-1 y el Cuadro 11.4-2 presentan la variación de caudal observada en el sector de confluencia de ambos ríos y a la entrada del sector agrícola del poblado de Quillagua respectivamente.

**CUADRO 11.4-1
VARIACIÓN DE CAUDAL CONFLUENCIA LOA / SAN SALVADOR**

Escenario	Q (m³/s)	ΔQ (m³/s)	ΔQ
Caso Base	0,792	-	-
DP Nula	0,305	0,488	-62%

Fuente: Elaboración Propia.

**CUADRO 11.4-2
VARIACIÓN DE CAUDAL QUILLAGUA**

Escenario	Q (m³/s)	ΔQ (m³/s)	ΔQ
Caso Base	0,496	-	-
DP Nula	0,129	0,367	-74%

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa una importante disminución de caudal en la confluencia, donde la descarga de la planta de tratamiento conforma en gran medida el flujo superficial del río San Salvador. Por otro lado, este efecto se ve reflejado de manera importante en el poblado de Quillagua, el cual ve disminuido un 74% el caudal disponible. Si se compara la variación de caudal en ambos puntos, se tiene que en Quillagua se observa un 75% del efecto ocurrido en la confluencia de los ríos Loa y San Salvador.

11.5. Escenario 5 – Traslado de Derechos de Lasana a Calama

Este escenario se origina ante la posibilidad de venta de los derechos de agua superficiales del sector de Lasana por parte de los regantes a nuevos usuarios en el sector de Calama. Ante el desconocimiento del total de derechos trasladados se han simulado 3 sub-escenarios, considerando el traslado de 20%, 50% y 100% de los derechos de Lasana.

El procedimiento consistió en disminuir la demanda de agua asociada a los canales del sector de Lasana en los porcentajes mencionados anteriormente, pero luego asignar este caudal a una captación puntual ubicada en la entrada de la Ciudad de Calama. Se decidió trasladar el uso de derechos desde una zona agrícola a una captación puntual para considerar el caso crítico, puesto que de esta forma no existen flujos de recuperación y se utiliza el derecho disponible en su totalidad y no de acuerdo a las necesidades hídricas de los cultivos.

Los efectos de este traslado de derechos fueron analizados en 2 nodos, ubicados a la entrada y salida de Calama, en términos de la variación experimentada por el caudal superficial en ambos puntos. En el Cuadro 11.5-1 y el Cuadro 11.5-2 se presenta la variación de caudal, en términos numéricos y porcentuales respectivamente, en ambos puntos de control y de acuerdo al factor de traslado de derechos.

**CUADRO 11.5-1
VARIACIÓN DE CAUDAL ESCENARIO 5**

Nodo	Q Caso Base (l/s)	ΔQ (l/s)		
		20%	50%	100%
Confluencia Loa / Salado	996,3	27,5	71,5	107,9
Entrada Calama	1519,0	12,5	33,6	18,2
Salida Calama	608,6	-28,0	-67,4	-157,5

Fuente: Elaboración Propia.

**CUADRO 11.5-2
VARIACIÓN PORCENTUAL DE CAUDAL ESCENARIO 5**

Nodo	Q Caso Base (l/s)	ΔQ (%)		
		20%	50%	100%
Confluencia Loa / Salado	0,996	3%	7%	11%
Entrada Calama	1,519	1%	2%	1%
Salida Calama	0,609	-5%	-11%	-26%

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa un aumento del caudal existente en la zona de confluencia de los ríos Loa y Salado de acuerdo al traslado de derechos desde la zona de Lasana, previa a este punto, hacia la ciudad de Calama. Esta tendencia se distorsiona a la entrada de la ciudad, lo que se explica en la importancia de los afloramientos en el modelo, donde en vista del Cuadro 11.5-3 se estima que el sector de recuperación existente en la entrada de Calama disminuye el efecto del traslado de derechos.

**CUADRO 11.5-3
VARIACIÓN DE CAUDAL DE AFLORAMIENTO ENTRADA CALAMA ESCENARIO 5**

Escenario	Caso Base	20%	50%	100%
Q (l/s)	771,7	758,9	739,4	688,8
ΔQ (l/s)	-	-12,8	-32,3	-82,9
ΔQ (%)	-	-2%	-5%	-11%

Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, considerando que en los tres escenarios se observa una disminución del flujo superficial en la salida de Calama, se construye el Cuadro 11.5-4 que contiene la seguridad de riego del sector agrícola de la ciudad.

**CUADRO 11.5-4
VARIACIÓN COBERTURA DE RIEGO CALAMA ESCENARIO 5**

Parámetro	Caso Base	20%	50%	100%
Q Demandado (l/s)	751,9	751,9	751,9	751,9
Q Afluyente (l/s)	746,6	745,3	742,6	723,5
Cobertura Riego	99,3%	99,1%	98,8%	96,2%
Δ Cobertura de Riego	-	-0,2%	-0,5%	-3,1%
Demanda No Satisfecha (%)	53,1%	53,8%	54,4%	58,6%
Δ Demanda No Satisfecha	-	0,7%	1,4%	5,5%

Fuente: Elaboración Propia.

La seguridad de riego disminuye de acuerdo aumenta el porcentaje de traslado de derechos. No se observa un decrecimiento lineal debido a que la captación utiliza en cada momento el máximo de derechos asignados. Las zonas de riego demandan caudal en base a las necesidades netas mensuales de los cultivos, caudal que puede ser menor al de derecho, y que no cuenta con pérdidas como percolación o derrame que vuelven al sistema ya sea como afloramiento o flujo superficial respectivamente.

Junto a la disminución de la cobertura de riego producida por el aumento del traslado de derechos desde Lasana, crece el número de veces en que el caudal afluyente no es suficiente para suplir completamente la demanda de riego. Esta situación se ve reflejada en el porcentaje de la demanda no satisfecha.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1. Conclusiones Generales

La cuenca de Río Loa es una de las fuentes hídricas más importantes del Norte Grande de Chile, la cual permite satisfacer la demanda de agua potable no sólo de pequeñas localidades, sino que de grandes urbes como Calama y Antofagasta. Sin embargo, el uso más importante dentro de la cuenca corresponde al minero, tanto desde fuentes superficiales como subterráneas. Esta gran demanda hídrica es satisfecha principalmente por las precipitaciones generadas en la sub-cuenca denominada Loa Alto, la cual genera la oferta hídrica superficial y subterránea, que se manifiesta durante los meses de verano, y en menor medida durante el invierno.

Debido a la importancia estratégica de esta cuenca, el objetivo principal de este estudio consistió en desarrollar una herramienta flexible de análisis y planificación, que permitiera evaluar situaciones de manejo del recurso hídrico en la cuenca y que sirviera de ayuda en la toma de decisiones relacionadas con la gestión y el aprovechamiento integral y multisectorial de los recursos hídricos de la cuenca, tanto superficial como subterráneo. Este objetivo se cumplió mediante la utilización del programa MAGIC, el cual permitió realizar una representación de la totalidad del sistema superficial de la cuenca del río Loa y su interacción con el sistema subterráneo en el sector de la ciudad de Calama por medio del programa Visual Modflow, tomando en cuenta todas las variables relevantes. Esta herramienta fue utilizada para simular el periodo 1974 - 2013, el cual corresponde al periodo con información más completa.

El desarrollo del modelo en MAGIC comenzó con una actividad en terreno para recolectar información necesaria en el uso del programa como es la demanda hídrica desde las zonas de riego. De acuerdo a esto se recorrió gran parte de la cuenca del río Loa y la totalidad de los poblados con algún grado de producción agrícola, donde se encuestó a los regantes y se generaron observaciones respecto a los tipos de cultivo, métodos de riego, calidad de la infraestructura agrícola, entre otras. En general se observa un decaimiento de la actividad agrícola en la zona, con amplios terrenos abandonados debido al déficit hídrico que permita el cultivo de la tierra de manera lucrativa. De igual forma se visitaron los pozos y aducciones presentes en la cuenca, información que fue analizada e interpretada para generar una demanda más realista en la cuenca.

El modelo MAGIC se complementó con un modelo de generación de caudal de escorrentía realizado de manera externa a éste, el cual permitió disponer de información de flujo de las cabeceras de las cuencas. Esta información resultó importante en el ajuste a las crecidas producidas durante el periodo de modelación.

Luego el modelo se ajustó calibrando aquellos parámetros que poseen mayor incertidumbre tales como filtraciones desde ríos, recargas al acuífero desde las zonas de riego, características geométricas de los acuíferos, entre otras. Los resultados se confrontaron a los registros históricos de estaciones fluviométricas de la DGA, donde en general se apreció un buen ajuste. Existen periodos de modelación donde el caudal modelado no se ajusta debido a una disminución del flujo base registrado por la estación, por lo que se estima que pudieran haber existido captaciones no reguladas. De acuerdo a esto se decidió dar preferencia al ajuste desde el año 1997 en adelante, periodo donde la incertidumbre de las demandas tanto agrícolas como mineras disminuye. Además, se efectuó un análisis de sensibilidad del modelo en base a los parámetros de mayor incertidumbre y que controlan las propiedades e interacciones de las zonas de riego y

acuíferos, tales como los coeficientes de percolación y de almacenamiento respectivamente. Se generó una variación del 10% sobre el coeficiente de percolación y se analizó la variación generada en la estación fluviométrica Río Loa en Finca, utilizada para la calibración del modelo y que se ubica aguas abajo de la zona agrícola de Calama. No se observó variaciones importantes en la calibración del modelo que sugirieran inestabilidad de los resultados frente a este parámetro. Para el análisis del coeficiente de almacenamiento se decidió duplicar y disminuir a la mitad su valor. En base a los resultados en la estación de cierre del modelo, Río Loa en Desembocadura, no se registraron variaciones de consideración en la calibración. Si bien existe un aumento en el caudal de afloramiento neto del 4,8%, éste no es de importancia frente al orden de magnitud de variación del coeficiente de almacenamiento.

En cuanto al desarrollo del modelo hidrogeológico, fue necesario su construcción prácticamente desde el principio debido a una serie de problemas presentados en el modelo proporcionado por la autoridad (modelo hidrogeológico de la cuenca de Calama desarrollado el año 2012 en Visual MODFLOW por Matraz). Algunos de estos problemas, que impedían el correcto funcionamiento del modelo, corresponden a errores en la topografía superficial, diferencias significativas entre las cotas reales y modeladas del río Loa y Salado, inestabilidades asociadas a la definición de estratos, ausencia de zonificación de parámetros, entre otros.

Además del ajuste y calibración, el modelo subterráneo fue compatibilizado con los resultados del modelo superficial, de tal modo que sus principales flujos concordaran entre sí (caudales de afloramiento, recargas en zonas de riego, flujos subterráneos y otros).

La re-construcción del modelo se inició definiendo el nivel de terreno, para luego realizar la estratificación del modelo en base a una combinación de información obtenida del modelo asociado al Estudio Talabre, Estudio Tesoro y Estudio Matraz. Luego se definió la condición de río considerando la existencia de cajones profundos en diversos sectores del área de estudio. En el caso del río San Salvador y diversas vertientes del sector, se simuló mediante el uso de celdas tipo Dren. En cuanto a las condiciones de borde, se consideraron sólo condiciones de nivel constante tanto en la entrada como en la salida. Las recargas areales consideradas correspondieron a recarga por precipitación, recarga desde zonas de riego de acuerdo a la modelación en MAGIC, recarga desde sector urbano de Calama de acuerdo a Matraz y recarga desde el Tranque Talabre. Finalmente, los parámetros de permeabilidad y almacenamiento se incluyeron según la zonificación presentada en los Estudios Talabre y Tesoro, siendo la permeabilidad sometida a un proceso de calibración.

La calibración se realizó, en primer lugar, compatibilizando los flujos de interacción río-acuífero con aquellos simulados en el modelo MAGIC, de modo que recargas y afloramientos se asemejaran entre ambos modelos. Luego de esto, se realizó la calibración de niveles mediante la modificación de zonas y valores de permeabilidad, cuyo resultado final entregó un error de cierre de balance del 0,4%, mientras que el error RMS de niveles resultó de 3,91%. Estos ajustes son considerados satisfactorios, dada la complejidad de la cuenca.

Posterior a la calibración de ambos modelos, se generó en MAGIC una simulación que fuera el punto de comparación de análisis escenarios futuros. Éste escenario consideró la información del último año de calibración y se extendió en un periodo posterior de 38 años. De acuerdo a esta nueva estadística base, se analizaron diferentes escenarios:

Derechos Superficiales al 100%: De acuerdo al uso total de los derechos superficiales de la cuenca, se verificó una disminución de 408 l/s en el caudal medio a la entrada de Calama.

Derechos Subterráneos al 100%: En base al uso total de los derechos subterráneos otorgados, se verificó una disminución de 655 l/s en el flujo superficial a la entrada de la ciudad de Calama debido a la importancia de los afloramientos en este sistema.

Volumen Sustentable del Acuífero: Si bien MAGIC presenta limitaciones en la representación del sistema acuífero, sus resultados se pueden considerar como referencia. De acuerdo al criterio 2 de la DGA para determinar la sustentabilidad de los acuíferos, se determinó el factor de uso de los derechos subterráneos en los acuíferos de Calama (0,20), río San Pedro (0,87) y Salar de Llamara (0,37). El mismo análisis se realizó para el acuífero de Calama utilizando el modelo calibrado en Visual MODFLOW, el cual entregó un factor de uso máximo de 10,7% de los derechos subterráneos otorgados, de manera tal de no afectar significativamente el caudal superficial saliente.

Eliminación Descarga Puntual Calama: Se definió un caudal nulo para la planta de tratamiento de aguas servidas de Calama, registrándose una disminución de caudal en la confluencia de los ríos Loa y San Salvador del 72%, afectando en un 64% lo calculado en el poblado de Quillagua.

Traslado de Derechos Lasana: Se trasladaron un 20, 50 y 100% de los derechos del sector de Lasana a una captación puntual de Calama, registrándose una disminución del caudal medio a la salida del sector agrícola de Calama del 5, 11 y 26% respectivamente.

12.2. Recomendaciones

A continuación se incluyen recomendaciones para realizar acciones que permitan disminuir la incertidumbre sobre la información que se maneja de la cuenca del río Loa tanto del sistema superficial como subterráneo.

12.2.1. Componente Hídrica Superficial

Se describe que los afluentes más importantes al río Loa corresponden a los ríos San Pedro, Salado y San Salvador, junto a la quebrada Amarga. El río San Pedro se encuentra intervenido y captado en su totalidad, por lo que en la actualidad su aporte es nulo. Por lo tanto para una adecuada caracterización de los aportes al río Loa debe existir una estadística acorde en los otros 3 afluentes antes de cada confluencia, lo que no se verifica para el río Salado y la quebrada Amarga. En el primer caso existe la estación fluviométrica Río Salado antes junta con Río Loa, la cual se observó en la actividad de inspección en terreno que no presenta las condiciones para medir todo el flujo pasante por el sector, transformando su estadística en poco confiable. La estación aguas arriba utilizada en la calibración del modelo MAGIC, Río Salado en Sifón Ayquina, se encuentra a una distancia cercana a los 40 Km de la confluencia y no considera sectores de recuperación de caudal como los de las Vegas de Turi. Por otra parte, para la quebrada Amarga simplemente no existe información, lo que hace necesario generar un control de su caudal aportante.

Del mismo modo, no existe control fluviométrico confiable del río Loa antes de la junta con el río Salado a pesar de existir una fuerte demanda hídrica por parte de la actividad agrícola existente en el poblado de Lasana.

No obstante lo anterior, durante el recorrido de la cuenca fue posible observar la existencia de estaciones fluviométricas en muchos de los canales, algunas de ellas en muy mal estado. A pesar de esto, no se encontró información asociada a estas estaciones, por lo que se recomienda la reparación de ellas para comenzar a generar un registro de caudales asociados a los diferentes canales, de manera tal de poder tener una visión global de los usos de agua de la cuenca.

En base a este estudio se ha observado que las captaciones superficiales de Codelco, SQM y Aguas Antofagasta representan las mayores extracciones de agua en la cuenca, superando varias veces las extracciones de riego. Debido a esto, se recomienda mantener las mediciones de caudal de estas captaciones de manera estable a través del tiempo, de manera tal de mantener un control de las extracciones más relevantes y permitir futuras modelaciones de la cuenca con información más completa.

En cuanto a la red de canales, los trabajos de este estudio se vieron dificultados debido a la ausencia de una Junta de Vigilancia que dispusiera de información completa asociada al sistema de canales en la cuenca. En este sentido, se recomienda tener un acercamiento con los diferentes usuarios del agua en la cuenca, de manera tal de incentivar la creación de una entidad que permita la centralización de la información, favoreciendo tanto a usuarios del agua como al desarrollo de futuros estudios en la cuenca.

12.2.2. Componente Hídrica Subterránea

Se recomienda contar con nuevos pozos de monitoreo exclusivo de la DGA en aquellos sectores con escasa información de niveles subterráneos, como por ejemplo en la cuenca de San Pedro de Inacaliri, donde los únicos registros corresponden a mediciones puntuales realizados para estudios antiguos y que no reflejan la situación hidrogeológica actual. Situación similar, ocurre en el área comprendida entre el río Loa aguas abajo de la junta con el río San Salvador y Quillagua, donde no existe ninguna información ni registro histórico referente a niveles subterráneos.

Asimismo en el caso del sector de Calama en donde la DGA cuenta con un solo pozo de observación de niveles (Aeropuerto), se sugiere ampliar la red de medición incorporando más pozos, dado que gran parte de los registros de niveles que se disponen en la actualidad para esta zona, corresponden a sondajes de propiedad de privados (empresas mineras, particulares, etc.).

Resultaría conveniente también, disponer de un registro de niveles en los sectores cabecera de la cuenca del Loa, tales como Pampa Puno y Polapi, ya que la información que se maneja es de carácter puntual.

Por otra parte, se recomienda efectuar trabajos geofísicos particularmente de TEMs y ensayos gravimétricos en sectores con escasa información hidrogeológica y que resultaría relevante de caracterizar, como por ejemplo, las cuencas de los ríos Salado y San Pedro de Inacaliri y el sector comprendido desde el río Loa aguas abajo de la junta con el río San Salvador hasta Quillagua o quebrada Amarga.

Todo lo anterior, podría permitir de aquí a un tiempo más, la construcción y operación de un modelo subterráneo específico a nivel cuenca que se extienda tanto hacia los sectores más altos como hacia los sectores ubicados aguas abajo del acuífero de Calama (María Elena y Quillagua), donde no existe mayor información hidrogeológica disponible.