

REPUBLICA DE CHILE MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS DIRECCION GENERAL DE AGUAS

LEVANTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA EL DESARROLLO DE NUEVAS FUENTES DE AGUA EN ÁREAS PRIORITARIAS DE LA ZONA NORTE DE CHILE, REGIONES XV, I, II Y III

ETAPA 2

INFORME FINAL PARTE VIII

Sistema Piloto I Región: Salar del Huasco

REALIZADO POR:

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile

S.I.T. Nº 195

Santiago, Noviembre de 2009

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar C.

Director General de Aguas

Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

Departamento de Estudios y Planificación

Ingeniero Civil Sr. Pedro Rivera I.

Inspector Fiscal

Ingeniero Civil Sr. Luis Rojas B.

EQUIPO TÉCNICO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Director de Proyecto

Ing. Sr. José Muñoz P.

Jefe de Proyecto

Ing. Sr. Pablo Rengifo O.

Ingeniero a Cargo

Ing. Sr. José Yáñez L.

Especialistas y Profesionales

Sr. Bonifacio Fernández	Especialista en Hidrología (PhD)
Sr. José Francisco Muñoz	Especialista en Hidrogeología (PhD)
Sra. Laura Vitoria	Especialista en Hidrogeoquímica (PhD)
Sr. Pablo Rengifo	Especialista en Hidrogeología (MSc)
Sr. José Yáñez	Ing. de Proyecto, Hidrogeología
Sr. Gustavo Calle	Ing. de Proyecto, Hidrología (PhD)
Sr. Marcelo Solari	Geol. de Proyecto, Geología
Sr. Axel Herzog	Geol. de Proyecto, Hidrogeoquímica
Srta. Victoria Flores	Ing. de Proyecto, Hidrogeología
Srta. Milena Calvo	Ing. de Proyecto, Hidrogeoquímica
Sr. Victor Pérez	Ing. de Proyecto, Hidrología

EQUIPO TÉCNICO – CONTINUACIÓN DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Tesistas, Memoristas y Ayudantes

Sr. Juan Johnson	Ing. Tesista MSc, Hidrogeología
Srta. Mariana Cervetto	Geol. Memorista, Hidrogeología
Sra. Isidora Arriagada	Geol. Memorista, Hidrogeología
Srta. Yohana Ahumada	Ayudante Ingeniero, Cartografía
Sr. Eduardo Wunderlich	Ayudante Ingeniero, Hidrología
Sr. Cristóbal Valderrama	Ayudante Ingeniero, Hidrología
Sr. Pedro Reinoso	Ayudante Terreno
Sr. Francisco del Solar	Ayudante Terreno
Sr. Sebastián Rojas	Ayudante Terreno
Sr. Fernando Díaz	Ayudante Terreno
Sr. Tomás Latorre	Ayudante Terreno



Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Católica



"LEVANTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA EL DESARROLLO DE NUEVAS FUENTES DE AGUA EN ÁREAS PRIORITARIAS DE LA ZONA NORTE DE CHILE, REGIONES XV, I, II y III"

INFORME N^a: 460625

FECHA: 25 DE NOVIEMBRE 2009

"DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS"

DICTUC, Dirección de Investigaciónes Científicas y Tecnológicas, Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile Vicuña Mackenna 4860, Correo 22, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 686 4281 • 686 4284 • 686 4274 686 4293 Fax: (56-2) 552 2563 / www.ing.puc.d • www.dictuc.cl



Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Católica



1. Tipo Informe	2. Cuerpo del Informe
Informe Técnico Final	404 páginas
	(incluye portada)
3. Título del Proyecto	4. Fecha Informe
LEVANTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA EL DESARROLLO	25 de Noviembre 2009
DE NUEVAS FUENTES DE AGUA EN ÁREAS PRIORITARIAS DE LA	
ZONA NORTE DE CHILE, REGIONES XV, I, II Y III	
5. Autor (es)	6. Contrato
Director de Proyecto: José Francisco Muñoz Pardo	MOP – DGA N ^a 235
Jefe de Proyecto: Pablo Rengifo Oyarce	
Ingeniero a Cargo: José Yáñez López	
6. Nombre y Dirección de la Organización Investigadora	7. Período de Investigación
DICTUC; Pontificia Universidad Católica de Chile	Julio 2008 – Noviembre 2009
Vicuña Mackenna Nº 4860, Casilla 306 – Correo 22,	
Macul - Santiago	
8. Antecedentes de la Institución Mandante	9. Contraparte Técnica
Nombre: Dirección General de Aguas, MOP.	
Dirección: Morande 59, 8º Piso	Nombre: Luis Rojas Badilla
RUT: 61.202.200-0	Cargo: Inspector Fiscal
Teléfono: (02) 633 9940	
10 Desumer	

10. Resumen

El estudio de los recursos hídricos del altiplano chileno consideró los aspectos hidrográficos, hidrológicos, hidrogeoquímicos, isotópicos e hidrogeológicos de las cuencas cerradas que se ubican en esta franja del norte de Chile.

El levantamiento de información sumado a trabajos de terreno y de gabinete orientados a complementar aquellos temas considerados más relevantes son reportados en los 10 tomos de documentos.

Sr. José Francisco Muñoz P. Director de Proyecto Jaime Retamal DICTUC

Nota: "La información contenida en el presente informe no podrá ser reproducida total o parcialmente, para fines publicitarios, sin la autorización previa y por escrito de Dictuc S.A.

DICTUC, Dirección de Investigaciónes Científicas y Tecnológicas, Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile Vicuña Mackenna 4860, Correo 22, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 686 4281 • 686 4284 • 686 4274 686 4293 Fax: (56-2) 552 2563 / www.ing.puc.d • www.dictuc.cl

PRESENTACIÓN

El presente estudio, realizado entre los años 2007 y 2009, se enmarca en un convenio de cooperación e investigación científica aplicada entre la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA) de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC).

La investigación o acción de apoyo tuvo como objetivo fundamental el levantamiento, generación y análisis de información hidrogeológica para avanzar en el estudio de los recursos hídricos del sector chileno del Altiplano. En este contexto, este estudio pretende ser un apoyo concreto para el desarrollo de nuevas fuentes de agua subterránea en áreas prioritarias del norte de Chile.

El estudio consistió en el desarrollo de una serie de trabajos de terreno y gabinete, tanto a nivel regional como local. Los resultados obtenidos se presentan en 10 informes o partes independientes, cuyos contenidos son los siguientes:

- **Parte I** Hidrografía Regional del Altiplano de Chile.
- **Parte II** Geología Regional del Altiplano de Chile.
- **Parte III** Hidrología Regional del Altiplano de Chile.
- **Parte IV** Hidrogeoquímica e Isotopía Regional del Altiplano de Chile.
- **Parte V** Implementación de Estaciones Meteorológicas.
- Parte VI Campañas de Muestreo Geoquímicos e Isotópicos.
- Parte VII Medición de la Evaporación Mediante Método del "Domo".
- Parte VIII Sistema Piloto I Región: Salar del Huasco.
- **Parte IX** Sistema Piloto II Región: Salares El Laco y Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Pampas Puntas Negras, Las Tecas y Colorada.
- **Parte X** Sistema Piloto III Región: Salares de Maricunga y Pedernales.

Cada parte está estructurada de manera de ser autocontenida y poder ser utilizada para fines y materias específicas. Sin perjuicio de lo anterior, las Parte VIII, IX y X que consideran el estudio de sistemas pilotos, hacen referencias y utilizan resultados de los estudios a nivel regional (Partes I, II, III y IV) y de los trabajos de terreno (Partes V, VI y VII).

La información y resultados de este estudio, junto a las actividades de difusión y formación que se realizaron en el marco de su desarrollo, se encuentran disponibles en el sitio web <u>www.recursoshidricosaltiplano.cl</u>.

El presente informe corresponde a la **Parte VIII** del estudio, denominada **"Sistema Piloto I Región: Salar del Huasco"**.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer en especial a las distintas instituciones y personas que contribuyeron al desarrollo de este estudio, en la forma de aportes de información, apoyo en trabajos de terreno y logística, aportes para la realización de actividades de difusión y formación, y sugerencias para el avance de esta investigación. En especial se agradece a:

- Oficinas DGA Regiones de Tarapacá, Antofagasta y Copiapó.
- Carabineros de Chile.
- Servicio Agrícola y Ganadero.
- Policía de Investigaciones.
- Servicios de Aduana.
- GeoAguas Consultores.
- Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.
- SQM.
- Profesores Uwe Tröger (U. Técnica de Berlín), Michel Vauclin (LTHE-CNRS Grenoble, Francia) y Scott Tyler (U. de Reno Nevada, USA).
- Los siguientes profesionales que aportaron en el comienzo del presente estudio: Luciano Achurra (Geología), Francisca Chadwick (Hidrología).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	MA	RCO GENERAL DEL ESTUDIO	1
2	INT	RODUCCIÓN	
	2.1	Propósitos y alcances	
	2.2	Descripción general del área de estudio	
3	REV	VISIÓN DE ANTECEDENTES	7
	3.1	Estudios y Antecedentes Recopilados	7
	3.2	Síntesis de Estudios y Antecedentes Recopilados	10
	3.3	Trabajos de Terreno	50
4	CAF	RACTERIZACIÓN FISIOGRÁFICA	51
	4.1	Geomorfología Región de Tarapacá	51
	4.2	Cuenca Piloto Salar del Huasco	54
5	CAF	RACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	71
	5.1	Marco Geológico	71
	5.2	Unidades Geológicas	75
	5.3	Geología Estructural	80
	5.4	Estratigrafía de Pozos Profundos	84
	5.5	Unidades de Subsuperficie	86
6	CAF	RACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	
	6.1	Climatología de la zona	
	6.2	Análisis de Precipitaciones	
	6.3	Análisis de Escurrimientos	130
	6.4	Análisis de Temperatura y Evaporación de Tanque	137
7	CAF	RACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA	155
	7.1	Datos Disponibles y Tratamiento de la Información	156
	7.2	Química General de las Aguas de la Cuenca	160
	7.3	Datos Isotópicos y Relación con la Química	212
8	CAF	RACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	225

8.1	(Geometría Acuífera y Unidades Hidrogeológicas	226
8.2	I	Piezometría del Acuífero	228
8.3	(Constantes Elásticas	246
8.4	(Conexión con otras cuencas	254
8.5	ł	Estimación de la Recarga	259
8.6	Ι	Descarga del sistema	277
8.7	I	Balance Hídrico	295
9 I	RESU	JMEN Y CONCLUSIONES	304
10 \$	SUGE	ERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS	314
10.	1 I	Necesidad de Estudios	314
10.	2 N	Mediciones de evaporación	315
10.	3]	Toma de muestras y análisis químicos e isotópicos	316
10.	4 I	Fiscalización de usos y control de fuentes	317
10.	5 I	Instrumentación y recolección de datos	318
11 H	REFE	RENCIAS	322
ANEX	KO I	ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS	334
AI. Est	1 H ados j	Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado (S=seco, P=Lluvia) y de Transición Ent para el Modelo de Markov Diario	re . 334
AI.	2 I	Probabilidades de Permanencia en un Estado (S = seco, P = Lluvia) Durante k Días	340
AI.	3 I	Probabilidad de Lluvia a una Determinada Hora	351
ANEX	KO II	RESULTADOS DE ANÁLISIS PRUEBAS DE BOMBEO EN ANTECEDENTES	360
ANEX	KO III 368	I CATASTRO DE POZOS, COBERTURAS SIG Y BASE DE DATOS HIDROQUÍM	ICA
ANEX	KO IV	MAPA TOPONIMIA SALAR DEL HUASCO	372
ANEX	KO V	MAPAS GEOLÓGICOS SALAR DEL HUASCO	376

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ubicación del Sistema Piloto cuenca del Salar del Huasco	. 4
Figura 2.2 : Vías de acceso a la cuenca del Salar del Huasco	. 6
Figura 3.1: Cuencas del Balance Hídrico de Chile y las del presente estudio	12
Figura 3.2: Mapa geológico de Huasco con ubicación de perfiles transversales y longitudinal	17
Figura 3.3: Perfil geológico longitudinal de la cuenca	18
Figura 3.4: Perfiles geológicos transversales de la cuenca	19
Figura 3.5: Diagrama trilinear de iones principales.	20
Figura 3.6: Sectores descritos en el estudio de la cuenca Salar del Huasco	23
Figura 3.7: Esquema simplificado del funcionamiento hídrico del sistema acuífero del Salar d Huasco	lel 27
Figura 3.8: Interacción río – acuífero en cuenca Salar del Huasco	28
Figura 3.9: Niveles freáticos y manantiales orilla oeste del salar.	31
Figura 3.10: Teoría de funcionamiento hidráulico de surgencia dentro del salar	32
Figura 3.11: Situación hidrogeológica entre Horst de Pica y Graven de Huasco.	33
Figura 3.12: Interpretación de flujos superficiales y subterráneos en cuenca Salar del Huasco	34
Figura 3.13: Componentes del balance realizado en el modelo tipo HEC-HMS	36
Figura 3.14: Mapa de isoyetas de la zona de estudio (precipitación media anual en mm)	37
Figura 3.15: Ubicación de perfiles TEM cortando algunas estructuras NNE- SSW	39
Figura 3.16: Fallas y lineamientos que podrían observarse en los perfiles geofísicos	40
Figura 3.17: Resitividades relacionadas con las distintas estructuras.	41
Figura 3.18: Ubicación de pozos de producción en la cuenca Lagunillas	42
Figura 3.19: Hidrograma del pozo LA1 en la cuenca Lagunillas	43
Figura 3.20: Niveles piezométricos obtenidos desde punteras 4, 5, 6 y 7 ubicadas en el sector de bofedal	lel 45
Figura 3.21: Geología estructural del área de estudio	47
Figura 4.1: Zonas geomorfológicas de la región septentrional de las pampas desérticas y cordiller prealtiplánicas.	as 52
Figura 4.2: Perfil Región de Tarapacá (20º 15' S).	53
Figura 4.3: Toponimia de la cuenca Salar del Huasco para descripción fisiográfica	55

Figura 4.4: Mapa geomorfológico de la cuenca Salar del Huasco
Figura 4.5: Red hidrográfica y patrones de drenaje cuenca Salar del Huasco
Figura 4.6: Curva hipsográfica cuenca del Salar del Huasco
Figura 4.7: Cuenca y subcuencas (ID) Salar del Huasco, Región de Tarapacá
Figura 4.8: Lagunas en el Salar del Huasco
Figura 5.1: Columna Estratigráfica Generalizada, desde el Jurásico superior hasta el Cuaternario superior. En colores, las unidades que afloran en la cuenca del Salar del Huasco
Figura 5.2: Geología superficial de la cuenca Salar del Huasco
Figura 5.3: Fallas reconocidas en la cuenca Salar del Huasco
Figura 5.4: Principales lineamientos reconocidos en la cuenca Salar del Huasco
Figura 5.5: Diaclasas, fracturas y relleno de fracturas en diferentes afloramientos de la Ignimbrita Huasco
Figura 5.6. Ubicación de perfiles estratigráficos en cuenca Salar del Huasco (proyección sobre imagen LANDSAT)
Figura 6.1: Climas de las Regiones XV, I, II y III de Chile
Figura 6.2: Estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región
Figura 6.3: Disponibilidad de datos de precipitación de la serie original y rellenada en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la I Región
Figura 6.4: Disponibilidad de datos de precipitación mensual en las estaciones PUC-DGA del sistema piloto de la I Región
Figura 6.5: Series de precipitación media anual (año hidrológico) en las estaciones DGA seleccionadas para el sistema piloto de la I Región
Figura 6.6: Series de precipitación media anual en las estaciones CMDIC seleccionadas para el sistema piloto de la I Región
Figura 6.7: Precipitación media anual en las estaciones seleccionadas. El valor presentado para las estaciones PUC-DGA corresponde al año hidrológico (2007-2008)
Figura 6.8: Series de precipitación mensual para el período Noviembre 2007 – Octubre 2008, ordenada para el año hidrológico (Oct-Sep), en las estación Huasco el Sillillica (PUC-DGA) de la I Región 104
Figura 6.9: Series de precipitación media mensual y probabilidades de excedencia empíricas del 15% y 85% en las estaciones DGA seleccionadas
Figura 6.10: Series de precipitación media mensual en las estaciones CMDIC
Figura 6.11: Esquema del modelo de Markov para la precipitación diaria. El estado 1 corresponde a Seco (S) y el 2 a Lluvia (P)

Figura 6.12: Hietogramas en las estaciones seleccionadas de la I Región para el período Nov. 2007 – Feb. 2009
Figura 6.13: Registro simultáneo de la magnitud de precipitación diaria en las estaciones seleccionadas (ordenadas de norte a sur) para el período Nov. 2007 – Feb. 2009
Figura 6.14: Probabilidades de estar en estado seco (S) y lluvia (P), y probabilidades de transición entre estados para la estación Huasco en Sillillica
Figura 6.15: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Huasco en Altos del Huasco
Figura 6.16: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Huasco en Diablo Marca
Figura 6.17: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Collacagua
Figura 6.18: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Huasco en Sillillica
Figura 6.19: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Huasco en Alto del Huasco
Figura 6.20: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Huasco en Diablo Marca
Figura 6.21: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Collacagua
Figura 6.22: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Huasco en Sillillica
Figura 6.23: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Huasco en Alto del Huasco
Figura 6.24: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Huasco en Diablo Marca 125
Figura 6.25: Comparación de la variación de la precipitación media anual con la altitud en las estaciones DGA de la I Región y en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto
Figura 6.26: Mapa de isoyetas en la zona del sistema piloto de la I Región 128
Figura 6.27: Valores clasificados de q_{ij} para la precipitación anual en las estaciones DGA ordenadas de norte a sur
Figura 6.28: Estaciones fluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región 131
Figura 6.29: Disponibilidad de datos de caudal en las estaciones seleccionadas para el año hidrológico en el sistema piloto de la I Región
Figura 6.30: Series de caudal medio anual para l año hidrológico (Oct-Sep) en las estaciones fluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región

Figura 6.31: Caudal medio mensual y caudales asociados a probabilidades de excedencia de 15% y 85% (m ³ /s) en las estaciones seleccionadas
Figura 6.32: Cuartiles (Q_1 , Q_2 y Q_3) de los caudales medios diarios en las estaciones seleccionadas. 136
Figura 6.33: Valores clasificados de q_{ij} para el caudal medio anual en las estaciones seleccionadas ordenadas de norte a sur
Figura 6.34: Estaciones meteorológicas de temperatura seleccionadas para el sistema piloto de la I Región
Figura 6.35: Disponibilidad de datos anuales de temperatura en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la I Región
Figura 6.36: Disponibilidad de datos mensuales de temperatura en las estaciones PUC-DGA del sistema piloto de la I Región
Figura 6.37: Series anuales de temperatura mínima absoluta y promedio, media absoluta, máxima promedio y absoluta en las estaciones DGA y CMDIC
Figura 6.38: Cuartiles (Q ₁ , Q ₂ y Q ₃) de la temperatura registrada cada 10 minutos en las estaciones PUC-DGA
Figura 6.39: Series mensuales de temperatura mínima absoluta y promedio, media absoluta, máxima promedio y absoluta en las estaciones PUC-DGA
Figura 6.40: Series mensuales de temperatura mínima absoluta y promedio, media absoluta, máxima promedio y absoluta en las estaciones DGA y CMDIC
Figura 6.41: Variación de la temperatura media absoluta con la latitud en las estaciones seleccionadas.
Figura 6.42: Gradiente de la temperatura media absoluta en las estaciones DGA seleccionadas de la XV, I, II y III Región, y en las estaciones del sistema piloto de la I Región
Figura 6.43: Mapa de isotermas en la zona del sistema piloto de la I Región
Figura 6.44: Disponibilidad de información histórica de evaporación media (año hidrológico) 150
Figura 6.45: Disponibilidad de información histórica de evaporación total (año hidrológico)150
Figura 6.46: Serie de evaporación anual (mm) en la estación Collacagua (I Región) 151
Figura 6.47: Evaporación media mensual en la estación Collacagua (I Región)
Figura 6.48: Variación de evaporación media anual con la latitud en las estaciones seleccionadas 152
Figura 6.49: Gradiente de la evaporación media anual en las estaciones seleccionadas de la XV, I, II y III Región
Figura 7.1: Distribución de muestras químicas en la cuenca del Salar del Huasco
Figura 7.2: Distribución de muestras isotópicas en cuencas del Salar del Huasco

Figura 7.3: Distribución de los parámetros físico-químicos
Figura 7.4: Distribución de los parámetros físico-químicos de las aguas en la cuenca del Salar del Huasco. Izquierda: aguas superficiales. Derecha: aguas subterráneas
Figura 7.5: Relación de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales 164
Figura 7.6: Distribución de los elementos mayoritarios 165
Figura 7.7: Distribución de los elementos mayoritarios de las aguas superficiales
Figura 7.8: Distribución de los elementos mayoritarios de las aguas subterráneas
Figura 7.9: Composición química de las muestras recopiladas en la cuenca Salar del Huasco. Izquierda: todas las muestras. Derecha: muestras separadas por tipo de fuente principal
Figura 7.10: Composición química de las muestras de acuerdo a la fuente de muestreo 169
Figura 7.11: Toponimia de la cuenca y puntos de muestreo Salar del Huasco 170
Figura 7.12: Composición química de muestras en los sectores de Collacagua, Pampas Porquesa y Piga, y Quebrada Chislaca
Figura 7.13: Composición química de muestras en el sector de Pampa Batea y Río Batea 172
Figura 7.14: Composición química de muestras en el Sector de Pampa Peña Blanca 173
Figura 7.15: Composición química de muestras en el Sector de Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto
Figura 7.16: Composición química de muestras en los sectores Pampa Huasco y Salar del Huasco. 175
Figura 7.17: Composición química de muestras de aguas subterráneas en el Sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco
Figura 7.18: Composición química de muestras de aguas superficiales en el sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco
Figura 7.19: Composición química de muestras en el sector de Pampa Rinconada
Figura 7.20: Diagramas de Stiff que representan variaciones en la composición y concentración de los elementos mayoritarios en la cuenca del Salar del Huasco
Figura 7.21: Diagrama de Schoeller de puntos HUAF.108 (Izquierda), HUA.F107 (Centro) y HUA.F017 (Derecha) correspondientes a muestras de ríos
Figura 7.22: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de vertientes: HUA.F136 (Izquierda) y HUA.F031 (Derecha)
Figura 7.23: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de vertientes: HUA.F016.3 (Izquierda) y HUA.F016.5 (Derecha)
Figura 7.24: Diagrama de Schoeller de puntos HUA.T008 (Izquierda) y HUA.T040 (Derecha) correspondientes a muestras de pozos del sector Pampa Peña Blanca

Figura 7.25: Diagrama de Schoeller de puntos HUA.T021 (Izquierda) y HUA.T043 (Derecha), correspondientes a muestras de pozos del sector Pampa Sillillica Norte
Figura 7.26: Diagrama de Schoeller de puntos HUA.T045 (Izquierda) y HUA.T046 (Derecha), correspondientes a muestras de pozos en el sector Pampa Sillillica
Figura 7.27: Diagrama de Schoeller de punto HUA.T069 correspondiente a muestra de puntera en el Salar del Huasco
Figura 7.28: Distribución de los elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco 196
Figura 7.29: Distribución de los elementos minoritarios y trazas de las aguas superficiales 199
Figura 7.30: Distribución de los elementos minoritarios y trazas de las aguas subterráneas
Figura 7.31: Distribución de concentraciones de Arsénico y Boro en relación con la conductividad eléctrica para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco
Figura 7.32: Distribución de concentraciones de Litio y Carbonato en relación con la conductividad eléctrica para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco
Figura 7.33: Distribución de concentraciones de Hierro y Manganeso en relación con la conductividad eléctrica para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco
Figura 7.34: Distribución de concentraciones de Dióxido de Silicio y Silicio en relación con la conductividad eléctrica para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco
Figura 7.35: Concentraciones totales de boro y arsénico para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco
Figura 7.36: Concentraciones totales de carbonato y litio para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco
Figura 7.37: Concentraciones totales de dióxido de silicio y silicio para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco
Figura 7.38: Concentraciones totales de manganeso y hierro para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco
Figura 7.39: Relación $\delta^2 H/\delta^{18}O$ de las aguas subterráneas y precipitación en la cuenca del Salar del Huasco
Figura 7.40: Relación δ^2 H/ δ^{18} O de las aguas superficiales en la cuenca del Salar del Huasco 213
Figura 7.41: Relación $\delta^2 H/\delta^{18}$ O de las aguas en los sectores de la Cuenca del Salar del Huasco 214
Figura 7.42: Relación $\delta^2 H/\delta^{18}O$ de las aguas de pozos en el sector Pampa Sillillica Norte 215
Figura 7.43: Relación δ^2 H/ δ^{18} O de las aguas de cauces superficiales en la cuenca del Salar del Huasco.
Figura 7.44: Relación δ^2 H/ δ^{18} O de aguas de punteras en Pampa Huasco y Salar del Huasco

Figura 7.45: Relación $\delta^2 H / \delta^{18} O$ de aguas de punteras en función de ubicación en el salar 217
Figura 7.46: Relación δ2H/ δ18O de los afloramientos de aguas subterráneas en el sector del Salar del Huasco
Figura 7.47: Relación δ2H/ δ18O de los afloramientos de aguas subterráneas en relación a su ubicación en el Salar del Huasco
Figura 7.48: Relación $\delta^2 H/\delta^{18} O$ de las aguas superficiales el sector del Salar del Huasco 220
Figura 7.49: Relación δ^2 H/ δ^{18} O de las aguas superficiales en relación a su ubicación del Salar del Huasco
Figura 7.50: Correlación entre δ^{18} O y Cond. Eléctrica en aguas subterráneas del sector Salar del Huasco
Figura 7.51: Correlación entre δ^{18} O y Cond. Eléctrica de los afloramientos de aguas subterráneas del sector Salar del Huasco. 222
Figura 7.52: Correlación entre δ^{18} O y Cond. Eléctrica de las aguas superficiales en el sector del Salar del Huasco
Figura 8.1: Pozos y cotas de nivel del agua subterránea en la cuenca Salar del Huasco
Figura 8.2: Superficie equipotencial de las aguas subterráneas en la cuenca del Salar del Huasco 237
Figura 8.3: Punteras instaladas en Salar del Huasco
Figura 8.4: Ubicación de pozos de exploración y producción en la cuenca del Salar del Huasco 252
Figura 8.5: Relación espacial entre los salares del Altiplano y los tipos de agua zonificados en la cuenca del Salar de Pintados por Risacher et al., 1999. Las flechas indican la dirección que seguiría el flujo de acuerdo a la composición química de las aguas
Figura 8.6: Vista regional donde se destacan las estructuras de la Hoja Collacagua y las quebradas que desembocan en la Pampa del Tamarugal. La flecha con orientación aproximada norte-sur indica la eventual dirección de un flujo captado por la zona de drenaje poniente de la cuenca. El cuadro en la confluencia de las quebradas Chara y Caya se presenta en detalle en la Figura 8.7
Figura 8.7: Zonas con vegetación en las nacientes de la Quebrada de Alona
Figura 8.8: Esquema conceptual del balance hídrico en las unidades litológicas para estimar la recarga en el sistema piloto (a) Recarga directa. (b) Recarga lateral
Figura 8.9: Unidades litológicas y características hidráulicas presentes en la cuenca del sistema piloto de la I Región
Figura 8.10: Estaciones de evaporación de tanque consideradas en cuenca Salar del Huasco
Figura 8.11: Puntos de medición evaporación III Región
Figura 8.12: Curva evaporación-profundidad de la napa ajustada en la cuenca Salar del Huasco 283
Figura 8.13: Curvas de isoprofundidad de la napa en el Salar del Huasco

Figura 8.14: Áreas por banda de isoprofundidad Salar del Huasco	. 285
Figura 8.15: Descargas a través de vertientes naturales en el Salar del Huasco.	. 290
Figura 8.16: Vertientes ubicadas en Salar del Huasco	. 293
Figura 8.17: Patrones de flujo superficial y subterráneo en la cuenca Salar del Huasco.	. 298
Figura 11.1. Ubicación de perfiles estratigráficos en cuenca Salar del Huasco (proyección sobre im LANDSAT).	agen . 378

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Estaciones utilizadas en el Salar del Huasco para la confección del BHCh de 198710
Tabla 3.2: Valores de parámetros hidrometeorológicos medios anuales estaciones del BHCh 10
Tabla 3.3: Componentes del balance hídrico de las cuencas según Balance Hídrico de Chile
Tabla 3.4: Valores medios de salida del balance general de aguas subterráneas del Salar del Huasco. 29
Tabla 3.5: Precipitación estacional en estación Coyacagua 35
Tabla 3.6: Propiedades hidrológicas de estaciones fluviométricas con información actualizada
Tabla 3.7: Extracción anual desde la cuenca Lagunillas. 42
Tabla 3.8: Niveles estáticos y dinámicos de los pozos P-1, P-2, P-3 y P-4 en Lagunillas 44
Tabla 3.9: Identificación puntos de instalación de punteras en cuenca Lagunillas
Tabla 3.10: Resultados de últimos levantamientos topográficos realizados en laguna Huantija
Tabla 4.1: Características morfométricas del Salar del Huasco 63
Tabla 4.2: Subcuencas Salar del Huasco
Tabla 5.1: Pozos profundos en cuenca Salar del Huasco. 85
Tabla 6.1: Estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región. 96
Tabla 6.2: Vigencia y años de registro en las estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región. 98
Tabla 6.3: Propiedades estadísticas de las series de precipitación media anual (mm) para el año hidrológico (Oct-Sep) en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la I Región
Tabla 6.4: Precipitación estacional en las estaciones seleccionadas de la I Región
Tabla 6.5: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en las estaciones PUC-DGA
Tabla 6.6: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en las estaciones CMDIC. 121
Tabla 6.7. Estaciones fluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región 130
Tabla 6.8: Vigencia y años de registro en las estaciones fluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región. 132
Tabla 6.9: Disponibilidad de datos de caudal medio diario en las estaciones seleccionadas
Tabla 6.10: Propiedades estadísticas de las series de caudales anuales (m³/s) para el año hidrológico en las estaciones seleccionadas. 134
Tabla 6.11: Estaciones meteorológicas con registros de temperatura seleccionadas para el sistema piloto de la I Región

Tabla 6.12: Vigencia y años de registro en las estaciones meteorológicas con registros de temperatura seleccionadas para el sistema piloto de la I Región. 140
Tabla 6.13: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura mínima absoluta (°C) en las estaciones DGA y CMDIC. 142
Tabla 6.14: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura mínima promedio (°C) en las estaciones DGA y CMDIC. 143
Tabla 6.15: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura media absoluta (°C) en las estaciones DGA y CMDIC. 143
Tabla 6.16: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura máxima promedio (°C) en las estaciones DGA y CMDIC. 143
Tabla 6.17: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura máxima absoluta (°C) en las estaciones DGA y CMDIC. 144
Tabla 6.18: Estaciones meteorológicas con registros de evaporación en el sistema piloto de la I Región.
Tabla 6.19: Propiedades estadísticas de las series de evaporación anual (mm) en las estaciones seleccionadas. 151
Tabla 7.1: Datos hidrogeoquímicos disponibles por tipo de agua
Tabla 7.2: Datos isotópicos disponibles por fuente. 157
Tabla 7.3: Distribución de los parámetros físico-químicos. 160
Tabla 7.4: Distribución de los parámetros físico-químicos de las aguas superficiales y subterráneas. 162
Tabla 7.5: Distribución de los elementos mayoritarios. 165
Tabla 7.6: Distribución de los elementos mayoritarios de las aguas superficiales
Tabla 7.7: Distribución de los elementos mayoritarios de las aguas subterráneas
Tabla 7.8: Distribución de los elementos minoritarios y trazas. 197
Tabla 7.9: Distribución de los elementos minoritarios y trazas de las aguas superficiales
Tabla 7.10: Distribución de los elementos minoritarios y trazas de las aguas subterráneas
Tabla 8.1: Listado de puntos de medición de niveles de agua subterránea en la cuenca Salar del Huasco. 228
Tabla 8.2: Mediciones de nivel estático (NE) de agua subterránea en la Cuenca del Salar del Huasco.
Tabla 8.3: Gradientes Hidráulicos calculados en Salar del Huasco. 238
Tabla 8.4: Listado de punteras instaladas en el Salar del Huasco. 238

Tabla 8.5: Mediciones de niveles de agua subterránea en punteras instaladas dentro del Salar del Huasco. 242
Tabla 8.6: Características de sondajes construidos en la cuenca del Salar del Huasco
Tabla 8.7: Propiedades hidráulicas del acuífero de la cuenca Salar del Huasco. 253
Tabla 8.8: Valores del coeficiente de infiltración (C_I) en función de la permeabilidad cualitativa de lasunidades litológicas.262
Tabla 8.9: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en Río Piga en Collacagua. 265
Tabla 8.10: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en Río Collacagua en Peñablanca
Tabla 8.11. Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Piga en Collacagua. 266
Tabla 8.12. Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Collacagua en Peñablanca
Tabla 8.13. Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en la cuenca del Salar del Huasco. 272
Tabla 8.14. Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar del Huasco. 273
Tabla 8.15: Evaporación desde superficies de agua libre (L/s). 279
Tabla 8.16: Evaporación desde vegas y bofedales en el entorno del Salar del Huasco
Tabla 8.17: Descargas por evaporación Salar del Huasco. 286
Tabla 8.18: Evaporación desde los suelos del salar. 287
Tabla 8.19: Descargas por evaporación Salar del Huasco estimadas en el presente estudio
Tabla 8.20: Área lagunas del Salar del Huasco en hectáreas (ha). 289
Tabla 8.21: Estimación de caudales en vertientes aportantes a lagunas del Salar del Huasco
Tabla 8.22: Derechos de agua superficial solicitados en la cuenca Salar del Huasco por la AsociaciónIndigena Aymará (AIA) Laguna del Huasco. Las coordenadas están en datum PSAD 56, Huso 19 Sur.Todos corresponden al expediente NR-0103-789.294
Tabla 8.23: Entradas y salidas de toda la cuenca Salar del Huasco. 297
Tabla 11.1: Resultados de transmisividad en análisis pruebas de bombeo con anterioridad al presente estudio DGA – PUC (DIHA). 360
Tabla 11.2: Resultados de conductividad hidráulica en análisis pruebas de bombeo con anterioridad al presente estudio DGA – PUC (DIHA). 362
Tabla 11.3: Resultados de coeficiente de almacenamiento en análisis pruebas de bombeo con anterioridad al presente estudio DGA – PUC (DIHA). 364

1 MARCO GENERAL DEL ESTUDIO

El Altiplano o Puna es una región de América del Sur que comprende el norte de Chile, el centro y sur del Perú, la parte occidental de Bolivia y el noroeste de Argentina. Básicamente son cuencas sedimentarias formadas en altura, en su mayoría sobre los 3.500 msnm, debido al tectonismo y a la actividad volcánica existente en estas latitudes.

Debido a la morfología de la zona (cuencas endorreicas en un clima de bastante aridez) se han formado numerosas lagunas y salares. Las precipitaciones en estas cuencas son de origen tropical, y ocurren durante el verano del hemisferio sur, lo que es conocido como el 'Invierno Boliviano' o 'Invierno Altiplánico'. Estas precipitaciones son de carácter convectivo, con una alta variabilidad espacial, y se concentran en los meses de enero y febrero. Este fenómeno desaparece más al sur, teniendo una mínima influencia en la Región de Atacama.

Las condiciones extremas sólo permiten que subsista una vegetación especializada, con pocos requerimientos hídricos y capaces de soportar amplias oscilaciones térmicas. Los bofedales conforman sistemas adaptados a estas condiciones, conocidas como vegetación de estepa o esteparia, que minimizan la transpiración debido a la reducida superficie de sus hojas, algunas de las cuales han evolucionado transformándose en espinas.

En Chile, las principales actividades que se desarrollan en la zona de interés son la minería y el turismo, así como también la ganadería y agricultura por parte de los pueblos originarios.

El estudio surge de la necesidad de satisfacer la demanda de agua existente y proyectada para los próximos 20 años en esta zona del norte del país. Esta demanda se refleja en actuales solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, solicitudes de áreas de exploración y de regularizaciones.

Dada la etapa de desarrollo en que se encuentra la zona de estudio, ésta presenta una oportunidad casi única para la elaboración y evaluación de planes de gestión y aprovechamiento del agua de manera sustentable.

En este contexto, el objetivo general del estudio es implementar un programa de investigación que permita establecer el estado actual del conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas altoandinos. La información levantada y analizada ha sido complementada con trabajos de terreno y gabinete.

El estudio considera un análisis a escala regional y otro a nivel local o sistemas pilotos. En ambas escalas de trabajo se abordan, fundamentalmente, aspectos geológicos, hidrológicos,

hidrogeoquímicos e hidrogeológicos. Los sistemas piloto son unidades seleccionadas a nivel de cuencas hidrográficas en conjunto con personal de la DGA, actores locales e instituciones de la zona, en base a criterios de carácter ambiental, demanda comprometida e información disponible.

Como parte de los trabajos de terreno, en estas zonas se han efectuado campañas de reconocimiento, instalación de estaciones meteorológicas, muestreos de agua para análisis químicos e isotópicos y mediciones de evaporación desde el agua subterránea somera.

Las campañas de reconocimiento estuvieron orientadas a recorrer el terreno a través de sus principales rutas de acceso y caminos que conectan las cuencas del Altiplano, además de seleccionar potenciales lugares para la instalación de estaciones meteorológicas.

Uno de los aspectos fundamentales de esta investigación lo constituye la instalación de 12 estaciones meteorológicas en el Altiplano entre la I y III Región, las que miden precipitación y en algunos casos otras variables como temperatura y humedad del aire y del suelo.

Adicionalmente, se realizaron en todos los sistemas, mediciones in-situ de evaporación desde la napa, utilizando la metodología del domo o semiesfera acrílica propuesta por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Estos datos son importantes para realizar el balance hídrico de los sistemas y de especial relevancia para la estimación de la recarga en cuencas cerradas.

Las campañas de muestreo de aguas, tanto superficial como subterránea, permitieron complementar la información existente en reparticiones fiscales, estudios y publicaciones científicas, en particular en los sistemas pilotos estudiados.

Finalmente, cabe señalar que el uso de los recursos hídricos en el Altiplano debe considerar por una parte su importancia para el desarrollo económico y social del país y las Regiones y por otra, la protección y cuidado de los sistemas ambientales sensibles que allí existen. En este sentido, es fundamental entender la extracción de aguas subterráneas y la gestión misma de los acuíferos como un proceso dinámico, tanto espacial como temporalmente. Asimismo, se deben considerar adecuados planes de monitoreo y contingencia.

Por lo mismo, el uso sustentable del agua, la explotación, y en particular la exploración de los recursos hídricos, debe vincularse desde su origen a variables de interés ambiental y cultural de la zona.

2 INTRODUCCIÓN

La cuenca del Salar del Huasco se encuentra situada en la Comuna de Pica, Provincia de Iquique, Primera Región de Tarapacá (Figura 2.1). Esta cuenca presenta un clima adverso para ser habitada, como la mayoría de las unidades del Altiplano, sin embargo, en su vecindad existen actividades productivas como la minería que requieren emplear agua para sus operaciones. La importancia medioambiental de los sistemas altoandinos está fuertemente vinculada al agua en sus diversas fuentes, que sostienen importantes humedales donde se desarrolla una flora y fauna específica.

La Dirección General de Aguas ha buscado contar con una apropiada caracterización de los recursos hídricos de esta cuenca, a través del conocimiento alcanzado en estudios de solicitudes de derechos de aprovechamiento, como también de aquellos que se desarrollan en el marco de la presente investigación. El objetivo es avanzar hacia una explotación sustentable en el largo plazo que proteja tanto la cantidad como la calidad.

2.1 Propósitos y alcances

El presente informe tiene como propósito el presentar una caracterización hidrogeológica de la cuenca piloto de la Región de Tarapacá, a través del análisis y síntesis de la información disponible. Se busca cuantificar con esta información los flujos de entrada y salida de la cuenca e identificar datos y tareas adicionales que se requieren para definir adecuadamente la geometría y propiedades de él o los acuíferos.

Se presenta en los contenidos una descripción de la hidrografía y geomorfología, hidrología, geología, hidrogeoquímica e hidrogeología de la(s) cuenca(s), además de los balances hídricos de recarga y descarga.

2.2 Descripción general del área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca superficial y subterránea del salar del Huasco. Esta cuenca se encuentra en la franja del Altiplano – Puna de Chile, inserta en la Cordillera de Los Andes de la Región de Tarapacá (Figura 2.1). Los límites de la zona de estudio se encuentran entre las siguientes coordenadas UTM (Datum Provisional Sudamericano 56, PSAD 56):

Límite norte	:	7.805.000
Límite sur	:	7.734.000
Límite oeste	:	495.000
Límite este	:	540.000



Figura 2.1: Ubicación del Sistema Piloto cuenca del Salar del Huasco.

2.2.1 Características generales de la cuenca

La cuenca del Salar del Huasco es una depresión geológica estructural de forma ovoide elongada hacia el norte y hacia el sur, localizada en el Altiplano Andino. Corresponde a una cuenca endorreica de altura media de 4.165 msnm, limitada por cordones montañosos que rondan los 5.000 msnm, desembocando sus aguas al salar del Huasco, punto más bajo de la cuenca con 3.770 msnm. Su superficie es de 1.471 km².

La mayor parte de la superficie de la cuenca tiene una altitud superior a 4.000 m, donde el valle central donde se ubica el salar corresponde a una planicie situada a elevaciones entre unos 3.700 y 4.100 msnm. Está constituido por terrenos suaves de una gran depresión longitudinal, recorrida en parte por el curso del Río Collacagua. Este valle endorreico se abre hacia el sur, terminando en el sector del salar, que es el sumidero final del sistema hidrogeológico.

Una característica que hace particularmente interesante a esta cuenca es que fue declarada como sitio Ramsar (1996), que resguarda específicamente el ecosistema del salar (6.000 ha). Este sustenta un ecosistema que alberga a importantes especies endémicas, como flamencos y gansos andinos, siendo además un sitio crucial para el descanso y anidación de aves migratorias del hemisferio norte. Así también, la Dirección General de Aguas (DGA) en el año 1996, ha reconocido su importancia al incluirla dentro de los sitios protegidos que otorga el Código de Aguas en algunas áreas con presencia de vegas y bofedales.

La principal actividad que se viene desarrollando en la cuenca corresponde a la ganadería de camélidos (llamas y alpacas) con sistema de pastoreo extensivo de bajo impacto ecológico. Específicamente en la cuenca del Salar del Huasco sólo un par de familias se dedican a esta labor por lo que la zona ha sido considerada despoblada. No obstante, algunas campañas de exploración minera y de agua subterránea han sido realizadas con el fin de ejecutar estudios sobre el potencial aprovechamiento del agua subterránea.

2.2.2 Vías de acceso

La cuenca de Huasco se encuentra a unos 150 km al este de la ciudad de Iquique y a 110 km al este de la localidad de Pozo Almonte. Desde Iquique y Pozo Almonte el acceso es mediante caminos asfaltados en buen estado, por las rutas A-687 y A-685. La ruta A-687 une Pozo Almonte y el Salar del Huasco, mientras que la ruta A-685 es un camino secundario que permite acceder al área de estudio desde el Oasis de Pica, ubicado a 60 km al suroeste del Salar, a través de una pista de tierra de regular estado.





Figura 2.2 : Vías de acceso a la cuenca del Salar del Huasco

Fuente: [Turistel]
3 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Este capítulo presenta una revisión de los estudios realizados en la cuenca Salar del Huasco para distintos fines, entre los que se cuenta la caracterización de sus recursos hídricos. Entre estos estudios se encuentran aquellos desarrollados para solicitar derechos de aprovechamiento a la Dirección General de Aguas, otros de carácter científico persiguen ahondar en el conocimiento de ciertos temas en relación al agua en sus diversas fuentes.

La revisión efectuada se tradujo en resúmenes de las referencias, que involucran tanto los recursos de carácter superficial como subterráneo. A continuación se presenta un listado de los antecedentes y luego una síntesis de los aspectos considerados más relevantes para los efectos de este estudio.

3.1 Estudios y Antecedentes Recopilados

Los estudios revisados, se encuentran disponibles principalmente en la Dirección General de Aguas (DGA), y corresponden a informes para evaluar la disponibilidad en acuíferos, solicitudes de derechos de aprovechamiento, expedientes e informes técnicos del Departamento de Estudios y Planificación (DEP) de la DGA. Otros estudios relevantes han sido desarrollados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), así como Estudios de Impacto Ambiental (SEIA) presentados en la zona y aportes de empresas privadas.

La recopilación y revisión se complementó con documentos científicos publicados en libros y revistas, estudios universitarios en la forma de memorias de título y tesis de magíster y doctorado. En general, la bibliografía en estas zonas de la cordillera donde se emplaza el Altiplano – Puna es limitada y se restringe a algunas áreas de mayor interés para la explotación.

De esta forma, se han colectado, revisado y sintetizado documentos que hacen referencia a las características hidrográficas, geológicas, hidrológicas, hidrogeoquímicas e hidrogeológicas, tanto a nivel regional como local. Los presentados a continuación son los más relevantes para el Sistema Piloto seleccionado en la Región de Atacama.

- Ref. 1 Balance Hídrico de Chile, Dirección General de Aguas, 1987.
- Ref. 2 Modelos de Elevación Digital, (DEM), (<u>http://seamless.usgs.gov</u>).
- Ref. 3 Imágenes Saterlitales Landsat ETM+, NASA (1999).

- Ref. 4 Cartografía de Chile, escala 1:250.000. Instituto Geográfico Militar, 1987.
- Ref. 5 Coberturas digitales SIG, Dirección General de Aguas, 2007.
- Ref. 6 Geografía de Chile, Tomo VIII, Hidrografía. Niemeyer y Cereceda, Instituto Geográfico Militar (IGM), 1984.
- Ref. 7 Mapa Hidrográfico de Chile, Departamento de Recursos Hidráulicos, CORFO, 1971.
- Ref. 8 Mapa Geológico del Norte Grande de Chile, Escala 1:1.000.000, del Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003.
- Ref. 9 Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones de Chile, Volumen I, Síntesis. S.I.T Nº 51, de los autores Risacher, Alonso y Salazar, Convenio de Cooperación DGA – UCN – IRD, 1999.
- Ref. 10 Impacto de las Extracciones de Agua Subterránea en el Salar del Huasco. Tesis de Máster Universidad Politécnica de Cataluña. Orlando Acosta L., 2004.
- Ref. 11 Delimitación de Acuíferos de Vegas y Bofedales de las Regiones de Tarapacá y Antofagasta, DGA (1996).
- Ref. 12 The Development of Water Resources in Northern Chile. Japan International Cooperation Agency (JICA), Dirección General de Aguas (DGA) y Pacific Consultants International (1995).
- Ref. 13 Modelo Hidrológico Distribuido para la Estimación de Recursos Hídricos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile, Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Poblete, D. N. (2008).
- Ref. 14 Informe Técnico "Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica". Asesoría Experta, SDT Nº 174, Convenio DGA – CONADI. Tröger, U., Gerstner, D. (2004).
- Ref. 15 Carta Geológica de Chile, Hoja Collacagua, Nº 59, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería. Vergara, H. y Thomas, A. (1984).

- Ref. 16 Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la Cuenca del Salar de Coposa. Informe preparado para Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM por DICTUC S.A. (2005).
- Ref. 17 Información generada por GP Consultores y proporcionada por la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.
- Ref. 18 Gestión Integrada de Cuencas Áridas y Semiáridas. Acta del Seminario y Taller Internacional, 29 y 30 de Octubre de 2003. Conservación de la Biodiversidad y Manejo Sustentable del Salar del Huasco, en el marco del Proyecto CHI/01/G36. Centro de Estudios para el Desarrollo (CED).
- Ref. 19 Antecedentes Levantamiento Geofísico TEM Salar del Huasco. Informe preparado para Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi CMDIC por GP Consultores Ltda. (2006).
- Ref. 20 Informe Semestral Cuenca de Lagunillas, enero junio 2007. Preparado por Compañía Minera Cerro Colorado operada por BHP Billiton para la DGA.
- Ref. 21 Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal, I Región. S. I. T Nº 48, Convenio DGA CCHEN, Julio 1998.
- Ref. 22 Catastro de obras de captación a partir de revisión bibliográfica.

3.2 Síntesis de Estudios y Antecedentes Recopilados

3.2.1 Balance Hídrico de Chile (BHCh, DGA, 1987)

Este estudio tuvo el propósito de cuantificar las distintas componentes del ciclo hidrológico en las cuencas del país. Para el caso de la cuenca del Sistema Piloto de esta Región se contó con estaciones fluviométricas y pluviométricas en la zona, así como también con registros de temperatura ni evaporación. Las estaciones utilizadas en esta cuenca fueron las mostradas en la siguiente tabla.

Tipo Estación	Nombre	ROL	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)
Fluviométrica	Piga en Collacagua	010-50-002	20° 03'	68° 51'	4.170
Pluviométrica	Collacagua	010-50-050	20° 03'	68° 50'	3.990
Temperatura*	Collacagua	010-50-050	20° 03'	68° 50'	3.990
Evaporación**	Collacagua	010-50-050	20° 03'	68° 50'	3.990
Evaporación †	Salar Huasco	010-51-050	20° 17'	68° 54'	3.720

Tabla 3.1: Estaciones utilizadas en el Salar del Huasco para la confección del BHCh de 1987.

* Operativa entre 1980 y 1984 ** Operativa entre 1964 y 1984 [†] Operativa entre 1981 y 1982

Fuente: [Balance Hídrico de Chile, 1987]

Usando los valores registrados por las estaciones de la Tabla 3.1, además del resto de las estaciones del estudio, se entregaron mapas de isolíneas para los parámetros hidrometeorológicos, a través de interpolación espacial con los datos existentes a la fecha de su elaboración. En la Tabla 3.2 se presenta el valor de los parámetros medios anuales de las estaciones presentadas en la Tabla 3.1. Los valores de evaporación corresponden a sus valores medios de tanque.

Tabla 3.2: Valores de parámetros hidron	neteorológicos medios	anuales estaciones del BHCh.
---	-----------------------	------------------------------

Nombre Estación	Parámetro	Valor medio anual
Piga en Collacagua	Caudal	$0,12 \text{ m}^{3}/\text{s}$
Collacagua	Precipitación	159,3 mm
Collacagua	Temperatura	4,6° C
Collacagua	Evaporación	2.291 mm
Salar Huasco	Evaporación	1.935 mm

Fuente: [Balance Hídrico de Chile, 1987]

Por otra parte, la hoya hidrográfica del Salar del Huasco se encuentra inserta en el área de 'Cuencas Altiplánicas' de la I Región (ROL 010) y a su vez dentro de las 'Cuencas entre Perú-Bolivia y R. Lauca' (ROL 0100). De acuerdo a la definición establecida en el presente estudio (ver Parte I: Hidrografía Regional del Altiplano), las cuencas de Huasco y Lagunillas ocupan el área definida en las subcuencas del Balance Hídrico de Chile como 'Salar de Huasco' (ROL 0105). La Figura 3.1 muestra la ubicación de las subcuencas de la DGA, así como las de este estudio.

Usando los límites anteriormente descritos, la DGA estableció los valores presentados en la Tabla 3.3 para las componentes del balance hídrico. Allí también se muestra el área de drenaje de la subcuenca Salar del Huasco.

Subcuenca	Área (Km²)	Precipitación (mm/año)	Evapo- transpiración (mm/año)	Evaporación Lag. – Salares (mm/año)	Escorrentía (mm/año)
Salar del Huasco	1.374	175	160	15	0

Tabla 3.3: Componentes del balance hídrico de las cuencas según Balance Hídrico de Chile

Fuente: [Balance Hídrico de Chile, 1987]

Como en general no se dispone de antecedentes cuantitativos de caudales afluentes y efluentes, en particular en cuencas cerradas, la escorrentía es obtenida restando a la precipitación la evapotranspiración y la evaporación desde lagunas y salares.

Este estudio constituye información oficial ampliamente reconocida acerca de los componentes del ciclo hidrológico en las distintas zonas del país. Los valores aquí publicados son una referencia y fuente de información tanto para el comportamiento de los recursos hídricos como por las metodologías aplicadas en el análisis.

3.2.2 Geografía de Chile, Tomo VIII, Hidrografía. Niemeyer y Cereceda, Instituto Geográfico Militar (IGM), 1984.

Este tomo de la colección Geografía de Chile del IGM hace una división de todo el país en las hoyas hidrográficas que lo componen, para hacer una descripción de éstas a través de una clasificación en zonas. A excepción de algunas cuencas costeras y Chiloé, las demás unidades hidrográficas superficiales fueron divididas usando la carta 1:250.000, en que los límites se determinaron usando el planímetro y el compás.

460625 COPIA



Figura 3.1: Cuencas del Balance Hídrico de Chile y las del presente estudio.

La clasificación de las zonas adoptada respeta la división establecida por CORFO con anterioridad, donde la hoya del Salar del Huasco está clasificada dentro de los 'Ríos de Régimen Esporádico de la Zona Árida de Chile'. Asimismo, la cuenca tratada en este informe se definió en 'Cuencas Endorreicas' en la subclasificación 'Cerradas de la Alta Puna'.

De acuerdo a Niemeyer y Cereceda, el salar del Huasco tiene una altura de 3.760 msnm, emplazado en el valle de Collacagua cuya principal alimentación es el Río Piga, con aguas de muy buena calidad. El Río Collacagua nace en El Tojo, donde se juntan el Río Chaquina, de escaso caudal y pendiente suave, y el Río Piga, de pendiente fuerte (superior al 3%). Desde ahí el Río Collacagua corre de norte a sur y se infiltra antes de llegar al salar, alimentándolo subterráneamente.

3.2.3 Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones (Risacher et al., 1999).

Este estudio presenta datos y análisis del funcionamiento geoquímico de las aguas en cuencas cerradas, los que permiten caracterizar y profundizar el funcionamiento de las mismas y los fenómenos a que están siendo sometidas. En síntesis, se plantea que las cuatro primeras Regiones del norte de Chile (incluyendo la XV Región de Arica y Parinacota) cumplen con los dos requisitos fundamentales para el establecimiento de ambientes evaporíticos: (i) la evaporación potencial es superior a la pluviosidad y (ii) la presencia de cuencas cerradas.

La precipitación media anual en estas zonas pasa de algunos milímetros en la costa y el Valle Central hasta cerca de 300 mm/año en la Cordillera de Los Andes. La evaporación potencial varía de 100 a 2500 mm/año, esencialmente en función de la altura. Debido a este gradiente de aridez, existen dos grandes grupos de salares y lagos salados:

- Salares de la costa y del valle central y que no son de interés en el presente estudio.
- Lagos salados y salares de la Cordillera de los Andes que están activos en la actualidad, y reciben aportes de su cuenca de drenaje y se concentran por evaporación en lagunas superficiales donde precipitan las sales evaporíticas.

Los lagos salados y salares se constituyen en la base de equilibrio de las cuencas cerradas. Las napas subterráneas de las cuencas de drenaje se descargan preferentemente en estas depresiones topográficas a través de manantiales o vertientes que nacen en el piedemonte adyacente a las depresiones. Esta agua de aporte se contaminaría al mezclarse con la que se encuentra en las pozas de evaporación o en los propios salares.

Las vertientes o manantiales surgen frecuentemente en varios puntos, o pueden ser difusos a lo largo de decenas o cientos de metros de la orilla, condición que dificulta cuantificar los flujos

aportados. Cuando alimentan una laguna superficial y salada permanente, la determinación del volumen de sus aportes se establece a través del balance hídrico de la laguna.

Las lagunas en los salares constituyen verdaderos oasis que albergan ecosistemas complejos y variados, desde microorganismos que sirven de alimento a los flamencos y otras aves, hasta mamíferos como vicuñas, guanacos y zorros, para los cuales los manantiales constituyen la única fuente de agua.

Los componentes disueltos en las aguas de aporte tienen un doble origen:

- alteración de rocas volcánicas o sedimentarias de la cuenca de drenaje por aguas meteóricas o hidrotermales, y
- redisolución de sales evaporíticas y salmueras residuales de antiguos salares recubiertos por formaciones volcánicas más recientes.

Salar del Huasco: La mayor parte de la superficie del salar está constituida por limos y costras salinas. Las lagunas superficiales son de extensión variable y de poca profundidad (unos decímetros). Las principales características morfométricas y climatológicas del salar según el estudio son:

- Altura del salar: 3.778 msnm
- Superficie de la cuenca: 1.572 km²
- Superficie del salar: 51 km²
- Superficie de las lagunas: 2 3 km²
- Precipitaciones: 150 mm/año
- Evaporación potencial: 1.260 mm/año
- Temperatura: 5° C (salar)

El salar es alimentado por dos tipos de agua. Por el oeste predomina la lixiviación de ignimbritas, con aguas de tipo Na-Ca-Mg / HCO_3 , mientras por el este la alteración de andesitas produce aguas del tipo Ca-Mg / SO4-(HCO3).

En las aguas de aporte no se nota influencia de evaporitas antiguas, y las sales disueltas provienen de la alteración de rocas volcánicas en la cuenca de drenaje. Las aguas encontradas en los análisis son de calidad aceptable para riego y consumo humano, sin embargo, tienen algún grado de contaminación con arsénico y boro. El aporte de la vertiente sur (Huasco-Lipez) resulta fundamental para mantener el equilibrio químico actual de la laguna. Su alteración (en forma de extracciones) afectaría negativamente la flora y fauna del frágil salar.

3.2.4 The Development of Water Resources in Northern Chile. Japan International Cooperation Agency (JICA), Dirección General de Aguas (DGA) y Pacific Consultants International (1995).

El estudio fue desarrollado durante una visita de expertos de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, donde se avanzó en la caracterización de los recursos hídricos del norte de Chile.

La cuenca hidrográfica Salar del Huasco se estimó de una superficie total de drenaje de 1.712 km^2 , lo que incluye a la cuenca de Laguna Lagunillas. La cuenca del río propiamente tal fue definida hasta aguas abajo de Peña Blanca, con una superficie de 1.112 km^2 .

Para caracterizar las condiciones climáticas se contó con los registros de las estaciones meteorológicas Collacagua y Salar del Huasco, operativas la primera desde el año 1961, con un promedio de 130,16 mm/año, y la segunda los años 1981 y 1982, con un promedio de 32,15 mm/año. Las estaciones fluviométricas con que se trabajó fueron Piga en Collacagua, Piga en Ojos de Agua, Batea en Confluencia y Collacagua en Peña Blanca. El gasto medio anual en la estación Collacagua en Peña Blanca fue determinado en 197 L/s, que dado la estabilidad de los niveles de agua medidos por la DGA en la cuenca durante los años previos al estudio, se estimó igual a la recarga.

Al considerar el cálculo de un coeficiente de escorrentía, se utilizaron las isoyetas del Balance Hídrico de Chile (1987) para estimar la cantidad de agua entrante a la cuenca, mientras el caudal fue considerado de la estación Collacagua en Peña Blanca, el principal escurrimiento con registro. Así se determinó un valor de 4,2% para un área aportante (a la estación fluviométrica) de 825 km². Considerando toda la cuenca, el agua entrante es de 855 L/s.

En las lagunas al interior del salar se registró una profundidad máxima de 16 cm y promedio de 4 cm. El salar también es somero, con una profundidad de 20 cm. Al analizar la superficie de las lagunas con imágenes satelitales tomadas durante los años 1966 y 1967, se estimó en 2 km², mientras que la superficie de la zona húmeda del salar en 27 km². Con esto, la superficie del conjunto salar y lagunas alcanza 29 km².

La geología fue descrita con la interpretación de imágenes LANDSAT y fotografías aéreas, el uso de las referencias existentes de SERNAGEOMIN y los resultados de los pozos perforados a esa fecha. Con la información disponible se trazaron perfiles longitudinales y transversales de la cuenca, como se muestra en la Figura 3.3 y Figura 3.4.

Aquí se plantea que la Ignimbrita Huasco tiene un potencial de transmisión de agua, constituyendo un acuífero en roca fracturada. De acuerdo a esto, existiría una posibilidad de

que parte de los flujos subterráneos de la cuenca escurrieran hacia la Pampa del Tamarugal a través de diaclasas, fisuras y fallas (citado de Margaritz, M., 1985).

Como parte de los trabajos realizados por la JICA se cuentan: un perfil electromagnético (5 puntos), perforación de un pozo de prueba, perforación de un pozo de observación, 2 pruebas de bombeo, análisis químico de agua en los 2 pozos JICA, análisis de C-14 de agua en 1 pozo JICA. Los trabajos realizados indican que el principal acuífero se aloja en los depósitos aluviales y bajo la formación Altos de Pica, con una cuenca en equilibrio dinámico. Los estudios del equipo JICA señalan que un potencial acuífero estaría en la Formación Collacagua, con una distribución restringida por las fallas a este y oeste, por las rocas volcánicas Terciarias y Cuaternarias por el norte y el sur.

Los acuíferos se extienden desde el salar hasta aproximadamente 6 km al norte de Peña Blanca, en una distancia de unos 30 km. Sin embargo, el salar no sería un buen acuífero, dado su contenido de arcillas y la mala calidad de sus aguas. Descontando esta superficie, el área potencial de acuífero es de alrededor de 126 km2; 20 km de largo y 4,5 a 7 km de ancho. El espesor va de 130 a 210 m, con un promedio de 70 m. Los Depósitos Aluviales, en particular, son de poca importancia hidrogeológica, pues es una capa delgada de sedimentos. La Formación Collacagua sería el acuífero con mayor potencial, que está compuesto principalmente por arenas y gravas. El volumen total de agua subterránea almacenada entre la zona del salar y Peña Blanca se estimó en 465 x 10^6 m³, usando los perfiles geológicos trazados y mostrados en la Figura 3.3 y Figura 3.4. La porosidad efectiva que se consideró fue de 30%, basándose en los materiales observados en la cuenca.



Figura 3.2: Mapa geológico de Huasco con ubicación de perfiles transversales y longitudinal.



Figura 3.3: Perfil geológico longitudinal de la cuenca.

460625 COPIA



Figura 3.4: Perfiles geológicos transversales de la cuenca.

460625 COPIA Para conocer la calidad de las aguas se muestrearon aguas superficiales y subterráneas. En estas últimas se contempló los dos pozos JICA más dos manantiales en el borde oeste del salar. La mayor parte de los iones (TDS, Mg, Na, SO4, Cl, Cd, Cr, Pb, Cu y Al) cumplen estándares de agua apta para beber, sin embargo, salvo en uno de los manantiales las demás muestras superan el estándar de Arsénico. Un diagrama con los resultados de las muestras se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5: Diagrama trilinear de iones principales.

Este estudio aportó antecedentes valiosos en su momento, tanto en la síntesis como en el análisis de la información, que han sido utilizados de forma posterior por algunos estudios hidrogeológicos en la cuenca. En particular se realizaron análisis químicos de las lagunas, pozos y vertientes, construcción de pozos y descripción de perfiles geológicos usando la información de éstos más una campaña geofísica.

3.2.5 Impacto de las Extracciones de Agua Subterránea en el Salar del Huasco. Tesis de Master, Universidad Politécnica de Cataluña. Orlando Acosta L., 2004.

Este estudio realiza una evaluación de los impactos ambientales que tendrían las extracciones de agua subterránea en la cuenca del Salar del Huasco, solicitadas por una empresa minera para su aprovechamiento en las labores de una faena cercana. La caracterización hidrogeológica de la cuenca permitió al autor evaluar los descensos de la napa y la afección que éstos tendrían sobre los sistemas lagunares y el salar en la depresión de esta hoya hidrográfica emplazada en la alta puna. Junto con el informe revisado bajo este título se revisó la Separata publicada con el mismo nombre en el Boletín Geológico y Minero del Instituto Geológico y Minero de España, Volumen 119, Número 1, Enero – Marzo 2008.

Geología: La cuenca es descrita geológicamente como una depresión geológica estructural de forma ovoide, elongada hacia el norte y hacia el sur, bordeada por montañas compuestas por un complejo de rocas sedimentarias e ígneas. La cuenca se habría formado en el Terciario medio. Se distinguen las siguientes unidades geológicas, de más joven a más antigua: Depósitos Recientes (Qs, Qf, Qe, Qa), Formación Pastillos (Qp), Formación Collacagua, Formación Sillillica (Qv, TPv, TMv, TMv'), Formación Altos de Pica (Tap) y Formación Cerro Empexa (Ke).

En el marco geológico, la caracterización por formaciones no entrega una descripción en detalle, ni distingue de manera clara cuales son los diferentes afloramientos en superficie. Un detalle por unidad de roca es más adecuado para la escala con que se puede caracterizar la cuenca para un posterior modelamiento hidrogeológico. Siguiendo en la misma línea, contar con una visión más nítida de lo expuesto en superficie incluye conocer las características mineralógicas y sedimentológicas, el grado de consolidación, las potencias de los estratos y relaciones de contacto, entre otros aspectos relevantes de la geología del sector.

Hidrogeología: Hidrogeológicamente la cuenca fue definida con tres unidades básicas que componen el sistema acuífero del Salar del Huasco. Un acuífero superior formado por los Depósitos Recientes y la Unidad Superior de la Fm. Collacagua, un acuífero medio situado en las unidades Media e Inferior de la Fm. Collacagua, y un acuífero inferior formado en la Ignimbrita Huasco y los estratovolcanes de la Fm. Sillillica.

El acuífero superior está formado por una parte por los Depósitos Fluviales a lo largo de la red de drenaje principal y el abanico fluvial que desemboca en el salar, a los Depósitos de Salar abarcando toda el área del salar propiamente tal y probablemente por parte de los Depósitos Aluviales en la parte baja de Pampa Rinconada. También pertenecen a este acuífero la Unidad Superior de la Fm. Collacagua, donde ésta se encuentra saturada. El espesor saturado mínimo

de esta parte del acuífero es de unos 20 m en la zona del humedal, con un máximo de 70 m en el sector bajo de Pampa Batea y en el área de la Quebrada Quechagual.

El acuífero medio está formado por los depósitos gruesos de las unidades Media e Inferior de la Fm. Collacagua. Su permeabilidad es alta y es el acuífero principal, aún cuando su parte inferior tiene una permeabilidad menor comparativamente con la Unidad Media, ya que presenta piroclastos y se encuentra totalmente compactada. Su espesor varía entre 80 y 200 metros y está separada del acuífero superior por una capa de unos 20 m de arcilla arenosa, menos permeable, distribuida en toda la cuenca actuando como acuitardo.

El acuífero inferior está compuesto por la Ignimbrita Huasco y los estratovolcanes de la Fm. Sillilica, que hace de límite inferior y lateral de la cuenca sedimentaria. Este es un medio fracturado en el que se desarrolla un acuífero volcánico, donde además de la variabilidad espacial de las fracturas, su heterogeneidad está dada por intercalaciones de lavas, tobas y zonas de alteración.

Evaluación de la recarga: Se evaluaron las propiedades del suelo como la conductividad hidráulica saturada usando test de infiltración, así como la porosidad, capacidad de campo y punto de marchitez permanente de forma indirecta a través de ensayos granulométricos de los suelos. De este modo se definieron 22 zonas edáficas, donde casi todos los suelos son de textura gruesa, esencialmente arena gruesa e incluso grava fina y media.

Se utilizaron Unidades Territoriales de Recarga (UTR) y los datos de la estación Collacagua con más de 40 años de registro para hacer balances a nivel diario. El código utilizado fue HELP, contenido en la interfaz UnSat Suite, que considera una profundidad de extinción de la evaporación (Z) a la que resulta muy sensible. El valor medio efectivo de recarga calculado para toda la cuenca fue de 1.600 L/s, sin embargo, al variar Z entre 40 y 55 cm, el rango estimado fue entre 1.140 L/s y 2.050 L/s (14% y 25% de la precipitación media, respectivamente).

De acuerdo a la división en UTR realizada en el estudio, se utilizó información geomorfológica, geológica y climática, además de las observaciones de campo. Sin embargo, no queda claro cuáles fueron los criterios utilizados para tal sectorización, pues no se especifica la metodología. Por su parte, los puntos de medición se realizaron en ciertas unidades geológicas que tenían la característica de ser accesibles y de baja pendiente, asumiendo homogeneidad en toda el área de la UTR. Se recomienda tener en considerar que los modos de depositación dependen de factores como la gravedad, los mecanismos de transporte y el ambiente de depositación, entre otras variables, lo que tiene una influencia en el comportamiento tanto vertical como horizontal de las propiedades del suelo.

460625 COPIA



Fuente: [Modificado de Acosta, O., 2004]

Figura 3.6: Sectores descritos en el estudio de la cuenca Salar del Huasco.

Por otra parte, el método del cilindro infiltrómetro parece no ser el más apropiado para determinar la conductividad hidráulica del tipo de suelo descrito. Para suelos no uniformes y anisotrópicos, los ajustes de este método no son buenos, sobreestimándose los valores y presentando problemas en la implementación (Luna et al., 2005).

Las desventajas del código HELP para los propósitos que se utilizó, es que éste fue desarrollado para ayudar a diseñadores y fiscalizadores de vertederos de residuos peligrosos a evaluar el comportamiento hidrológico de diversos diseños propuestos. Se construyó para la evaluación de áreas pequeñas, rellenos con suelos bien desarrollados, donde se conoce el perfil típico de un depósito de vertedero, características que no siempre se cumplen en la cuenca del Salar del Huasco. En áreas grandes, la medición y/o evaluación de los parámetros de entrada del modelo es compleja, lo que aumenta la incertidumbre de los resultados obtenidos.

Catastro de pozos y piezometría: Se catastraron 47 puntos con presencia de agua subterránea, entre los que se cuentan pozos de producción, sondeos de exploración, manantiales y pozos construidos durante el desarrollo del convenio JICA – DGA. Aun cuando este es un número pequeño para la magnitud de la cuenca, se trazaron isopiezas para los acuíferos medio e inferior. Por los niveles medidos se observó un flujo entre los acuíferos medios y superior, a través de materiales saturados y de alta permeabilidad.

A diferencia del acuífero medio, que casi no tiene variaciones interanuales en su nivel piezométrico, el acuífero superior presenta variaciones asociadas al régimen de precipitación y al de caudales del Río Collacagua y sus afluentes. De acuerdo a los niveles recopilados, el agua subterránea se mueve de norte a sur desde el Caserío Collacagua hasta el sector Sillillica Norte con un gradiente de 6×10^{-3} ; de ahí hacia el salar, con una orientación SO, el gradiente disminuye a 3×10^{-3} . Desde el sector de Pampa Rinconada hacia el salar también existe un gradiente hidráulico bajo, lo que hace suponer una baja recarga o una alta permeabilidad en este sector.

El acuífero medio sería alimentado por el acuífero superior, que a su vez recibe los aportes de infiltración del Río Collacagua, que ocurren a la altura de Sillillica en su viaje de norte a sur. Las lagunas por su parte tienen una extensión y existencia variable, vinculadas más con el régimen de precipitaciones que con la alimentación del acuífero más superficial. La laguna principal de existencia permanente y tamaño variable recibe el aporte de tres vertientes principales (Huasco Norte, Ermitaño y Huasco Lípez), además de otras vertientes de menor importancia y un considerable aporte subterráneo difuso. La evaporación estimada desde la zona del salar se determinó como 60% a partir de fuentes subterráneas y 40% a partir de fuentes superficiales, lo que explicaría el carácter mixto hipogénico-epigénico de las lagunas y su conexión con el acuífero.

Constantes elásticas: Con el análisis de las pruebas de bombeo se estimó la conductividad hidráulica y coeficientes de almacenamiento en las distintas zonas de la cuenca. A continuación se describen los valores reportados:

Acuífero superior

•	Sector Sillillica (k) :	10 m/d
•	Margen nordeste acuífero superior (Batea)(k):	40 m/d
•	Depósitos Fluviales (k):	13,4 m/d
•	Depósitos de Salar (k):	6,5 m/d
•	Pampa Rinconada (k):	0,27 – 2,1 m/d
•	Coeficiente de Almacenamiento (S):	$3 \cdot 10^{-3}$

Acuífero medio

- Variaciones de k entre 1,5 y 68 m/d
- En Caserío Collacagua (k): 0,05 m/d
 Coeficientes de Almacenamiento (S): 10⁻⁴ 10⁻³

Acuífero inferior

- Variaciones de k entre 0,3 y 13 m/d
- Coeficiente de Almacenamiento (S) alrededor de 10⁻⁴
- Formación Sillillica (andesitas) (k): 0,3 0,9 m/d
- Fuera del sistema de fallas (k): 0,1-0,01 m/d

Caracterización hidrogeoquímica e isotópica: En la cuenca se distinguen dos grupos de aguas, uno sulfatado (predominan en la mitad sur de la cuenca, aguas abajo de Sillillica Norte a excepción de los manantiales al oeste del salar) y otro bicarbonatado (predominan en la mitad norte de la cuenca). Los datos isotópicos (δ^{18} O y δ^{2} H) indican que la recarga se origina en altura y no de las pérdidas por infiltración del Río Collacagua.

Las aguas superficiales tienen como característica una relación molar Na/Cl entre 3,6 y 11, las del acuífero superior-medio al igual que los manantiales de 1,4 a 3,8 y las del acuífero medioinferior menor que 1,05. Estos datos indican que el sistema acuífero está estratificado dos partes, un acuífero inferior de lenta renovación (acuífero medio e inferior) y un acuífero superior más dinámico (sobre el anterior). Por las concentraciones de SiO_2 en el acuífero, hay evidencia de que la mitad sur de este está teniendo actualmente una renovación lenta.

Los contenidos isotópicos de las aguas de recarga presentan amplias variaciones, asociados a los más de 1.000 m de diferencia entre la cota mínima y máxima de la cuenca y los aportes que provienen de estas zonas. El Río Collacagua se va enriqueciendo aguas abajo del Caserío Collacagua, lo que se explicaría porque no recibe aportes (al menos no identificados a la fecha), así como también por la evaporación que se produce en su recorrido. También hay una posibilidad de que reciba aportes subterráneos modificados por procesos hidrotermales que justifiquen dicho enriquecimiento.

Modelo conceptual hidrogeológico: Para la elaboración de éste se contó con variados antecedentes nuevos aportados por el autor y otras fuentes no incorporadas en una herramienta de este tipo a la fecha de elaboración. Entre estos se cuentan columnas litológicas, perfiles gravimétricos, cotas topográficas, regulares controles piezométricos y datos hidroquímicos. Un esquema simplificado sobre el funcionamiento es presentado por el autor y citado en la Figura 3.7.

Las formaciones volcánicas Altos de Pica y Sillillica resultan ser importantes reservorios de agua debido a su fracturamiento, aunque con baja transmisividad. De las zonas en la ladera oeste brotan los manantiales más importantes que alimentan el salar, cuyo nivel piezométrico es mayor al de la superficie de las lagunas que allí se encuentran y fluyen subterráneamente por este gradiente. Estas lagunas se dividen en permanentes y temporales, donde las primeras reciben el aporte constante de al menos 6 manantiales y de un nivel freático somero, mientras las segundas reciben aportes de la escorrentía generada en los meses lluviosos.

El acuífero superior, que recarga al acuífero medio, recibe su alimentación desde aguas subterráneas provenientes del norte, así como también de la infiltración del Río Collacagua en su recorrido norte-sur hacia el salar. Los ríos reciben aportes subterráneos desde su nacimiento hasta el sector de Peña Blanca, aguas abajo del cual entregan agua al acuífero. La Figura 3.8 muestra varios cortes transversales que permiten concluir la relación existente entre los niveles de los escurrimientos superficiales y el acuífero.

En la Tabla 3.4 se muestra los valores medios de salida en el balance agua subterránea.

Se puede mencionar que en términos gruesos existe un acuífero libre (acuífero superior) en la parte central baja de la cuenca, en la vecindad del Río Collacagua y en la depresión de Pampa Rinconada. La parte restante de la cuenca son niveles confinados (acuífero medio e inferior) de distinto grado, dependiendo de la presencia y características de la arcilla.



Fuente: [Acosta, O. 2004]

Figura 3.7: Esquema simplificado del funcionamiento hídrico del sistema acuífero del Salar del Huasco.

Simulación numérica del flujo subterráneo: El modelo numérico (MODFLOW) consideró los límites de la cuenca hidrográfica y los acuíferos volcánico y sedimentario. La recarga del acuífero se estimó con las Unidades Territoriales de Recarga (UTR) y los valores obtenidos con el código HELP. Las descargas por evaporación se obtuvieron usando la estación Collacagua (DGA) para la máxima potencial y la profundidad de extinción fue calibrada, con un valor resultante de 3 m. Este valor debe ser tomado como referencial, dado que no existen mayores antecedentes de calidad para definirlo con certeza, especialmente por su importancia en la sensibilidad del modelo a este dato.

De la calibración del modelo se desprendió una recarga acotada a valores entre 1.100 y 1.200 L/s, con una variación muy pequeña de las conductividades propuestas inicialmente. Para la simulación en régimen transiente se consideraron escenarios de explotación de 955, 650, 500 y 300 L/s, donde el análisis de sensibilidad posterior incluyó la reducción de los coeficientes de almacenamiento (aumento de difusividad hidráulica), dado que es el parámetro de mayor incertidumbre en el modelo, especialmente en el largo plazo. La simulación consideró un escenario pesimista, dado por los mínimos valores del coeficiente de almacenamiento en acuífero confinado (S) y libre (m_e).



Fuente: [Acosta, O. 2004]

Figura 3.8: Interacción río – acuífero en cuenca Salar del Huasco.

Sector	Área	Tasa de Evaporación	Evaporación Total	
motion with Toky of the State	(km^2)	(m/año)	hm³/año	L/s
Lagunas				
Lagunas permanentes salar	2,50	2,246	5,62	178
Lagunas efimeras de altura	0,50	2,063	1,03	33
Salar				211
Suelo húmedo salar (NE=0,2m)	27,00	0,569	15,38	488
Suelo húmedo salar (NE=0,4m)	14,70	0,296	4,36	138
Suelo húmedo perímetro (NE=0,6m)	12,31	0,156	1,92	61
Cauces superficiales				687
Tramo permanente en superficie libre	0,37	2,07	0,78	25
Perímetro húmedo tramo permanente	0,74	0,81	0,60	19
Tramo intermitente en superficie libre	0,07	1,19	0,09	- 3
Perímetro húmedo tramo intermitente	0,07	0,47	0,03	1
Bofedales y vegas				48
Bofedales sector salar	2,52	1,23	3,09	98
Vegas sector salar ⁽¹⁾	4,52	1,00	2,26	72
Bofedales resto cuenca	2,62	1,23	3,22	102
	24/ 1			272
TOTAL	67,92	0,65	44,42	1.218

Tabla 3.4: Valores medios de salida del balance general de aguas subterráneas del Salar del Huasco.

(1): en los cálculos de la ET total se considera sólo un 50% de cobertura vegetal

Fuente: [Acosta, O., 2004]

Evaluación del impacto ambiental: En la cuenca existen 18 sitios de interés medioambiental (SIMA) y al simular con los parámetros restrictivos (conservadores) mencionados más arriba, ni siquiera el escenario con caudal de explotación de 300 L/s alcanza un impacto cero. El caudal que cumple este requisito es denominado caudal sostenible conservador y fue buscado iterativamente con diferentes configuraciones de explotación. Las zonas que se recomiendan para conseguir este objetivo son Sillillica y Sillillica Norte. Bajo un escenario de explotación continua durante 25 años, y usando la configuración de pozos actual, los impactos aceptables mínimos se producirían con un caudal de 200 L/s. Impactos moderados y tolerables se alcanzarían con una explotación en el orden de los 500 L/s.

Los descensos del acuífero medio alcanzarían valores entre 0,5 y 8 m después de 25 años de explotación para un caudal de 200 L/s. En este escenario, las zonas de interés ambiental se verían levemente afectadas, en particular la curva de isodescenso de 0,1 m alcanza el bofedal de Peña Blanca por el norte y el borde noreste del salar por el sur. Luego de 25 años sin

bombear (posteriores a la etapa de bombeo) las depresiones se mantendrían constantes en estos lugares SIMA, mientras en Sillillica, la zona más afectada, se encontraría con depresiones residuales de 2 m. Por su parte, los 4 manantiales más importantes que afloran en los contornos del salar se verían apenas afectados, con disminuciones de su caudal inferiores al 4%. El tramo aguas arriba de Peña Blanca mantiene su condición de ganador (recibe aportes subterráneos), mientras que aguas abajo de esta zona se induce una recarga de 25 L/s al acuífero dados los descensos señalados. No se estudió un cambio en la salinidad.

3.2.6 Informe Técnico "Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica". Asesoría Experta, SDT Nº 174, Convenio DGA – CONADI. Tröger, U., Gerstner, D. (2004).

El trabajo consistió en una visita del profesor de la Technische Universität Berlin para dar una opinión del marco hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal y el acuífero de Pica. El trabajo contempló visitas a terreno entre el 15 y el 19 de junio de 2004, además del trabajo de gabinete entre los días 20 y 22 del mismo mes, para presentar el resultado de la evaluación el día 23. El Salar del Huasco en particular fue visitado el día 17 de junio.

Las preguntas planteadas por la comunidad, que definieron el enfoque del trabajo, fueron referentes a la potencial afección de los manantiales de Pica y del ecosistema del salar frente a una eventual explotación de los recursos hídricos de la cuenca Salar del Huasco.

En principio, el área de la cuenca es dividida en tres grandes sectores, que de oeste a este son:

- El sector occidental representado en su mayor parte por la Ignimbrita Huasco, miembro 4 de la Formación Altos de Pica del Terciario. Estos depósitos son muy heterogéneos y presentan un alto grado de diaclasamiento en toda su extensión. Hacia el norte aflora el Cretácico.
- La depresión central, con presencia de una cubierta sedimentaria con intercalaciones de depósitos de arenas, limos y gravas.
- Hacia el área más oriental destaca la presencia del cordón volcánico del Terciario superior.

Siguiendo los estudios realizados por JICA, se planteó la posibilidad de definir una importante falla en el límite oeste del salar, que conectarían las Ignimbritas con los sedimentos cuaternarios en la cuenca, que se corresponde con un Graben.

De acuerdo a los antecedentes disponibles a la fecha de elaboración del estudio, la cuenca alberga tres acuíferos, descritos como:

- Acuífero Superior, constituido por arenas y gravas.
- Acuífero Medio, compuesto principalmente por intercalaciones de arcillas, limos y gravas. En la cuenca media presenta una mayor homogeneidad con respecto a la zona de cabecera y la zona terminal.
- Acuífero Inferior, compuesto por la Ignimbritas de Huasco y de la secuencia de estratovolcanes situados hacia el Este.

Al observar los niveles registrados en el acuífero medio con el pozo H1 del perfil A-A' (Figura 3.9), se dedujo por una parte que la falla que limita el Graben al oeste actúa como barrera hidráulica, dado que los niveles en la laguna y el acuífero son diferentes (Figura 3.9, derecha) y, por otra parte, que el acuífero medio se encuentra desconectado de las Ignimbritas al oeste, dada la presencia de los afloramientos. De acuerdo al planteamiento hecho por el autor, el acuífero superior debiese alimentar los manantiales que surgen dentro de la laguna al suroeste del salar, dado que el acuífero medio tiene un nivel piezométrico inferior. Para la construcción de la base de datos del presente estudio DGA – PUC, no se encontró información del pozo H1 reportado en el informe elaborado por Tröger y Gerstner (2004) (Ref. 12).



Fuente: [Modificado de Tröger y Gerstner, 2004]

Figura 3.9: Niveles freáticos y manantiales orilla oeste del salar.

460625 COPIA

La hipótesis para el surgimiento alimentado por el acuífero superior se basó en la suposición de antiguos meandros preexistentes, que dejaron zonas de alta permeabilidad, que estarían conectadas verticalmente con sectores preferenciales, como se muestra en el esquema de la Figura 3.10.



Fuente: [Tröger y Gerstner, 2004]

Figura 3.10: Teoría de funcionamiento hidráulico de surgencia dentro del salar

Por otra parte, la situación hidrogeológica entre el Horst de Pica y el Graben de Huasco, como fue descrito por Zeil (1979), se describe tal como se muestra en la Figura 3.11. Allí se esquematizó como, basados en la edad y temperatura de las aguas, los manantiales de Pica aflorarían debido a que la falla marginal del Horst actuaría como barrera hidráulica. Por otra parte, las Ignimbritas del Graben de Huasco no presentarían conexión con la cuenca sedimentaria, dado que los manantiales están situados sobre la falla marginal del Graben, que actúa como barrera y la presencia de los niveles piezométricos explicados más arriba. De acuerdo a la explicación planteada, la cuenca sedimentaria no coincide con la cuenca superficial, con lo que parte de la recarga del sector oeste (Ignimbrita) fluiría hacia la Pampa del Tamarugal. Finalmente, debido a la edad de las aguas de los afloramientos en Pica, es improbable que estos provengan de la cuenca sedimentaria del Salar del Huasco. Las pruebas de isótopos indican que la recarga de esta zona proviene de una altura aproximada de 3.500 msnm.

A partir de las evidencias presentadas, el estudio concluye que la recarga a los manantiales de Pica se origina en la zona de los Altos de Pica, mientras que una conexión de dichos manantiales con la cuenca sedimentaria de Huasco es improbable. Esta cuenca de depósitos cuaternarios estaría alimentada por una cuenca subterránea de mucho menor tamaño al de la cuenca superficial. El modelo de flujo planteado es el que se presenta en el esquema de la Figura 3.12.

El acuífero inferior con su agua fósil estaría inactivo y se atribuye el funcionamiento del salar a las condiciones de agua superficial, que infiltra durante el periodo de precipitaciones. La preservación del ecosistema del salar requiere estudios más detallados para descartar o confirmar algunas hipótesis de su funcionamiento. En este sentido se plantea la medición continua del caudal de los manantiales, la instalación de piezómetros en la Ignimbrita Huasco, la utilización de isótopos adicionales como Kr⁸⁵ y estudios geofísicos y tectónicos detallados.



Fuente: [Tröger y Gerstner, 2004]

Figura 3.11: Situación hidrogeológica entre Horst de Pica y Graven de Huasco.



Figura 3.12: Interpretación de flujos superficiales y subterráneos en cuenca Salar del Huasco.

3.2.7 Carta Geológica de Chile, Hoja Collacagua, Nº 59, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería. Vergara, H. y Thomas, A. (1984).

Para efectos de análisis de la geología superficial de la cuenca Salar del Huasco se utilizó la Carta Geológica de Chile, Hoja Collacagua. De este documento se extrayeron descripciones litológicas de las diferentes unidades que afloran en la cuenca, relaciones cronoestratigráficas, mineralogía y grado de consolidación de las rocas, entre otras. Además, se utilizó este documento, a escala 1:250.000, para generar el mapa geológico de la cuenca Salar del Huasco.

3.2.8 Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la Cuenca del Salar de Coposa. Informe preparado para Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM por DICTUC S.A. (2005).

Este estudio tuvo como propósito la actualización del modelo conceptual y numérico que permitiera describir y predecir el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca del Salar de Coposa. Para tal efecto, se estudió la geología, hidrología e hidrogeología de la cuenca, entre otros.

El objetivo del estudio geológico fue definir un modelo conceptual de la cuenca. Este se realizó en función de antecedentes bibliográficos existentes, ejecución de campañas de terreno, revisión y análisis de imágenes satelitales y re-mapeo de los testigos de una gran cantidad de sondajes que han sido perforados en la cuenca, entre otras actividades.

El estudio hidrológico tuvo como objetivo realizar una estimación actualizada de la recarga del sistema acuífero debido a la precipitación, que incluyera su variación temporal y espacial. Para ello se realizó una caracterización geográfica, climática e hidrológica de la zona, se presentaron y analizaron las condiciones climáticas generales del Altiplano y su relación con sectores de Bolivia y Argentina, se revisaron los antecedentes disponibles de precipitación y de escurrimientos superficiales y se implementó un modelo para simular el proceso lluvia-escorrentía a nivel diario, entre otras actividades. Este modelo se basó en el modelo HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2000) y consideró relaciones para estimar la escorrentía directa y el flujo base generado por una cuenca, así como también el almacenamiento en el suelo y los acuíferos.

El trato de la información meteorológica se hizo a partir de la estación Coyacagua de la DGA, cuyos datos faltantes se rellenaron para analizarse a nivel mensual y anual. Del análisis realizado se desprende que en dicha estación más del 90% de la precipitación cae entre los meses de diciembre y marzo (Tabla 3.5), con un valor medio anual de 139 mm. Otras estaciones se utilizaron en el análisis regional para el trazado de isolíneas de precipitación (ver Figura 3.14).

Nombro	Altitud	Periodo	Dic-Mar	Periodo Abr-Nov	
Nombre	(msnm)	(mm)	%	(mm)	%
Coyacagua	3.990	125,3	90,5	13,2	9,5

Tabla 3.5: Precipitación estacional en estación Coyacagua

Fuente: [DICTUC, 2005]

Por su parte, la información fluviométrica se trató a partir de las estaciones Piga en Collacagua y Collacagua en Peña Blanca. Según el estudio, las propiedades de las estaciones son las que se presentan en la Tabla 3.6.

Estación	Superficie (km ²)	Gasto medio (m ³ /s)	Prod. Específica (L/s/km ²)	Precipitación efectiva (mm/año)
Río Piga en Collacagua	215	0,132	0,614	19,36
Río Collacagua en Peña Blanca	495	0,181	0,366	11,50

Tabla 3.6: Propiedades hidrológicas de estaciones fluviométricas con información actualizada

Fuente: [DICTUC, 2005]

El modelo del tipo HEC-HMS considera relaciones para la determinación del flujo directo y el flujo base en una cuenca, que fueron analizados utilizando hidrogramas para determinar sus valores medios anuales y mensuales, además de la recarga. También se estimó el almacenamiento en el suelo y los acuíferos, como se muestra de forma conceptual en la Figura 3.13.



Fuente: [DICTUC, 2005]

Figura 3.13: Componentes del balance realizado en el modelo tipo HEC-HMS.

La recarga media anual estimada varió entre 344 L/s y 792 L/s, con una media de 601 L/s para el periodo 1974 – 2005. Las series anuales generadas para este cálculo presentaron grandes variaciones a nivel mensual y anual, dependiendo principalmente de la precipitación efectiva.

Los máximos de recarga alcanzados fueron de 5.000 L/s en años húmedos (1976, 1994) y los mínimos de entre 100 y 300 L/s en años secos (1981 – 1983 y 2000 – 2004). Para la modelación de este tipo de comportamientos se recomienda una escala temporal diaria, dado que a nivel anual, por ejemplo, las tasas de recarga son notablemente menores, al no captar la importancia del fenómeno de humedecimiento del suelo y percolación que producen las tormentas convectivas del Altiplano.



Figura 3.14: Mapa de isoyetas de la zona de estudio (precipitación media anual en mm).

Los resultados mostraron que el ciclo de recarga máxima-mínima podría ser del orden de 20 años. Sin embargo, la estadística disponible (30 años) sólo permitió identificar un ciclo, por lo que se estima que no existen antecedentes suficientes para validar la estimación de la duración de los ciclos de recarga y de su variación en el largo plazo. De ser correcta la estimación, estaría terminando un ciclo de agotamiento (baja recarga).

El objetivo del estudio hidrogeológico por su parte, fue caracterizar el sistema acuífero y definir un modelo conceptual de su funcionamiento, aspecto fundamental para la posterior construcción y calibración del modelo numérico que lo representa. Este estudio incluyó la integración de los estudios geológicos e hidrológicos que se ejecutaron, así como también de los antecedentes disponibles en los estudios previos realizados en la zona.

La caracterización del acuífero consideró los siguientes componentes del sistema: geometría acuífera y unidades hidrogeológicas, análisis e interpretación de pruebas de bombeo, análisis del funcionamiento histórico de la piezometría de la cuenca, piezometría del acuífero previo al bombeo, conexión con otras cuencas, recarga del sistema producto de la precipitación, recarga desde Michincha, descarga por evaporación, descarga hacia Empexa, y descarga a través de vertientes naturales.

Se consideró la conexión de Coposa con sus cuencas vecinas un tema complejo de resolver, debido a las características geológicas de los límites y la ausencia de investigaciones orientadas a determinar sus particularidades. A pesar de esto, se cree que existe una conexión con la cuenca de Michincha, al sur, a través de algunas estructuras recientes en la zona que alguna vez bloquearon los rellenos volcánicos. El valor estimado desde Michincha a Coposa fue del orden de 200 L/s. Del mismo modo, se determinó una descarga por similares mecanismos desde Coposa a Empexa, en Bolivia, con un caudal que varía en el rango de 10 y 50 L/s. La conexión con las cuencas La Laguna y Salar del Huasco fue desestimada en el estudio.

3.2.9 Antecedentes Levantamiento Geofísico TEM Salar del Huasco. Informe preparado para Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC) por GP Consultores Ltda. (2006).

Minuta técnica enfocada en el comportamiento de la recarga subterránea que alimenta al salar desde el oeste. Responde al cuestionamiento planteado por la DGA sobre el obstáculo que pudiera representar el sistema de fallas NNE-SSW, para el flujo de agua subterránea proveniente de la ladera occidental hacia el salar. Incorpora tres perfiles TEM realizados por Quantec Geoscience Chile Ltda. en el margen occidental del salar (Figura 3.15).

460625 COPIA



Figura 3.15: Ubicación de perfiles TEM cortando algunas estructuras NNE- SSW.

Como conclusión se señala que no existen evidencias en la información geofísica recolectada de que las estructuras geológicas actúen como una barrera que obstruya la circulación de las aguas. Esto se basa en que no existe una relación entre las fallas y zonas de mayor resistividad, que podrían ser interpretadas como planos impermeables.

No obstante, lo más probable es que la distribución heterogénea de la resistividad sí guarde relación con la tectónica, ya que litológicamente no hay cambios laterales. Por lo tanto es factible asociar una permeabilidad distinta a zonas de la ignimbrita que coincidan con el sistema de fallas definidas en la Hoja Collacagua (Vergara y Thomas, 1984) y lineamientos asociados a ellas (Figura 3.16).



Figura 3.16: Fallas y lineamientos que podrían observarse en los perfiles geofísicos.

Al sobreponer los perfiles TEM a las estructuras, es posible relacionar espacialmente las estructuras con las variaciones en la resistividad de la roca. Considerando que el sistema de fallas corresponde a las ramificaciones de una estructura mayor, cuya traza se ubica hacia el oeste, se espera que las fracturas se vayan abriendo al alejarse de él adquiriendo menores resistividades. Otras estructuras menores, que actúan como planos NW-SE de transferencia de esfuerzo, son representadas por valores elevados de resistividad que podrían derivar de la compresión a la que se ven sometidas (Figura 3.17).



Figura 3.17: Resitividades relacionadas con las distintas estructuras.

3.2.10 Informe Semestral Cuenca de Lagunillas, enero – junio 2007. Preparado por Compañía Minera Cerro Colorado operada por BHP Billiton para la DGA.

El informe corresponde a un reporte semestral presentado por Compañía Minera Cerro Colorado (CMC) en octubre de 2007, acerca de la operación de los pozos y los requerimientos hídricos en la cuenca Lagunillas en el periodo enero – junio de 2007. Allí se reporta que desde el año 1994 se encuentran en operación 3 pozos, P-1, P-3 y P-4 (Figura 3.18).

La extracción de agua en la cuenca ha ido en aumento, conforme a las necesidades de expansión de la producción que ha tenido la mina durante poco más de una década que lleva de operación. La Tabla 3.7 resume los caudales y volúmenes extraídos hasta la fecha del reporte, donde se observa un aumento progresivo de la extracción hasta el año 2004, donde se produjo una caída que ha mantenido la explotación en el rango de los 100 – 120 L/s.



Figura 3.18: Ubicación de pozos de producción en la cuenca Lagunillas.

Año	Volumen Total Bombeado (m ³)	Caudal Promedio Anual Bombeado (L/s)	Volumen Acumulado Bombeado (m ³)
1995	1.525.801	48,38	1.525.801
1996	1.418.812	45,25	2.944.613
1997	1.401.314	44,00	4.345.927
1998	2.344.243	74,34	6.690.170
1999	2.882.280	91,01	9.572.450
2000	2.867.070	90,62	12.439.520
2001	3.282.960	103,98	15.722.480

Tabla 3.7: Extracción anual desde la cuenca Lagunillas.
Año	Volumen Total Bombeado (m ³)	Caudal Promedio Anual Bombeado (L/s)	Volumen Acumulado Bombeado (m ³)
2002	3.415.074	108,31	19.137.554
2003	3.437.592	108,99	22.575.146
2004	3.841.261	121,64	26.416.407
2005	3.184.265	101,39	29.600.672
2006	3.507.935	111,19	33.108.607
2007*	3.003.170	126,79	36.111.777

Tabla 3.7: Extracción anual desde la cuenca Lagunillas.

* Comprende desde enero a septiembre de 2007

Para el monitoreo de los niveles del agua subterránea del área de extracción, se estableció un control de 10 pozos en el área de Pampa Lagunillas: LA1, LA2, LA3, LA4, LA5, LA6 y LA7 (estaciones de monitoreo), y P1, P3 y P4 (estaciones de bombeo). En la Figura 3.19 se muestra el abatimiento de unos de los pozos de monitoreo desde el inicio del bombeo hasta la fecha de entrega del reporte.

Los pozos P-1 a P-4 fueron construidos para el establecimiento de la línea base del estudio en la cuenca que actualmente es explotada. El pozo P-2 no tiene instalada una bomba hasta ahora. Los niveles que se han registrado en estas estaciones de bombeo se presentan en la Tabla 3.8.



Figura 3.19: Hidrograma del pozo LA1 en la cuenca Lagunillas.

	Pozos						
	Р	ʻ1	P2	P3		P4	
Fecha	N.E (m)	N.D (m)	N.E (m)	N.E (m)	N.D (m)	N.E (m)	N.D (m)
jul-05	21,14	29,83		10,52	15,19	8,79	13,94
ago-05	20,08	29,05		12,93	18,66	9,30	14,35
sep-05	19,61	26,00		12,80	19,84	8,75	14,34
oct-05	20,85	30,93		13,75	22,05	7,66	
nov-05	19,11	26,80		12,86	19,10	8,48	13,40
dic-05	19,70	27,77		13,74	19,69	9,26	13,52
Ene-06	19,98	25,44		13,16	18,66	8,99	13,57
Feb-06	19,96	26,33		13,22	19,25	9,25	13,50
Mar-06	19,44	24,71	12,63	13,54	19,90	9,46	13,86
Abr-06	19,62	24,87	12,90	14,52	21,45	9,73	13,69
May-06	19,45	26,14	12,40	14,25	20,68	9,06	13,51
Jun-06	21,26	28,38	10,94	13,52	18,80	9,29	12,57
Jul-06	21,28	28,21	13,54	13,36	18,36	9,57	13,28
Ago-06	21,52	28,80	13,62	13,40	18,89	9,45	12,90
Sep-06	21,25	28,78	13,61	13,03	18,29	9,70	12,56
Oct-06	20.88	28,03	13,60	13,67	18,73	9,59	12,65
Nov-06	21,98	29,83	13,70	13,68	12,28	9,73	12,49
Dic-06	21,88	29,90	13,86	13,55	18,57	9,60	12,81
Ene-07	22,32	30,22	13,92	13,27	17,90	9,28	13,07
Feb-07	22,63	30,48	13,96	13,56	18,03	9,55	13,48
Mar-07	22,83	31,36	14,28	13,97	19,10	10,42	14,45
Abr-07	22,77	31,50	14,28	14,28	19,15	10,36	14,58
May-07	22,89	31,55	14,39	14,22	19,22	10,70	13,86
Jun-07	22,57	31,53	14,47	14,04	19,47	10,40	14,56
Jul-07	22.79	31,56	14,42	14,42	19,54	10,58	14,77
Ago-07	22.18	31,64	14,54	14,71	19,68	10,80	14,80
Sep-07	22,96	31,55	14,57	14,39	19,62	10,81	14,71
N.E: Nivel Estático; N.D: Nivel Dinámico							

Tabla 3.8: Niveles estáticos y dinámicos de los pozos P-1, P-2, P-3 y P-4 en Lagunillas.

Por otra parte, en agosto de 2003 se instalaron 9 punteras para monitorear los niveles en la cuenca y en la laguna. La Tabla 3.9 muestra la ubicación de estas punteras y su finalidad. La Figura 3.20 muestra los niveles registrados en algunas punteras y el efecto de la recarga artificial implementada. Esto después de la resolución del DIA de 2002 que estableció la recarga artificial como parte del plan de mitigación, con el fin de mantener un área lagunar de al menos 5.000 m^2 .

Actualmente, con el sistema de mitigación en operación, el tamaño de la laguna Huantija puede variar de acuerdo a dos fuentes: i) estacionalmente debido a cambios en la tasa de evaporación y aportes de precipitaciones durante el invierno altiplanico y ii) diariamente como consecuencia de la evaporación y la oscilación térmica diaria, donde los sectores más someros se congelan.

Adicionalmente, se ha delimitado el área de 5.000 m^2 a través de la instalación de estacas, de modo de visualizar desde una distancia prudente el cumplimiento de este compromiso. La definición de dicha área fue realizada mediante un levantamiento batimétrico por JRC a principios del 2006. El área de las lagunas registrada en ocasiones posteriores al estacado se presenta en la Tabla 3.10.

		Ubicación		Profundidad*	
Ubicación	N° Puntera	Norte	Este	(m)	Objetivo
Sector entre Laguna	1	7.796.199	516.554	3	Control del nivel de aguas
y Pozos de CMCC	2	7.796.199	516.554	5	subterráneas entre Laguna y
	3	7.796.198	516.555	8	Pozos CMCC
Bofedal Lagunillas	4	7.796.856	515.847	3	
	5	7.796.718	515.903	4	Control de nivel en
	6	7.796.571	515.894	5	bofedal Lagunillas.
	7	7.796.570	515.894	2	
Sector Sureste del	8	7.795.486	517.327	6	Control afloramientos sector
Salar	9	7.795.486	517.327	7	sureste salar

Tabla 3.9: Identificación puntos de instalación de punteras en cuenca Lagunillas.

Nota: Las profundidades esperadas durante la construcción de las punteras correspondían a 5, 10 y 15 m, pero por las condiciones del terreno sólo se alcanzó las profundidades que aquí se indican.



Figura 3.20: Niveles piezométricos obtenidos desde punteras 4, 5, 6 y 7 ubicadas en el sector del bofedal.

Fecha	Área (m ²)	Cota (m)
10-Abr-05	140.531,9	4.017,6
19-Jul-05	104.063,3	4.017,5
25-Nov-05	93.438,5	4.017,4
02-Feb-06	675.170,6	4.017,5
09-Ago-06	87.043	4017,4
21-Nov-06	35.408,9	4017,4
07-Feb-07	20.833,8	4017,5
26-Jun-07	158.853	4017,5
24-Oct-07	40.269	4017,4

Tabla 3.10: Resultados de últimos levantamientos topográficos realizados en laguna Huantija.

3.2.11 Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal, I Región. S. I. T Nº 48, Convenio DGA – CCHEN, Julio 1998.

El estudio, realizado en conjunto por la DGA y la CCHEN, tuvo por objetivo evaluar la disponibilidad de recursos hídricos en los sectores de Pica, Matilla y Esmeralda, contrastando las estimaciones de recarga con las extracciones subterráneas a la fecha del estudio. El documento contempla una revisión bibliográfica, el reporte de 2 campañas de muestreo realizadas en el marco del estudio y una caracterización geológica e hidrológica de la zona de estudio.

La caracterización geológica indica que el área de estudio puede separarse en dos sectores de acuerdo al tiempo geológico en que se desarrollaron los principales elementos que afloran en superficie (Figura 3.21), que los autores separaron en preterciario y cuaternario. En el preterciario se encuentra el sector de Altos de Pica, donde existe un fallamiento y diaclasamiento abundante, especialmente en las direcciones NW-SE y N-S, que posibilita la recarga hacia zonas a menor cota. El sector dominado por elementos cuaternarios muestra poca potencia, y se encuentra tanto en el Salar del Huasco (Altiplano, 30 – 50 m de espesor), como en Pica (Pampa del Tamarugal, 30 m de espesor).

Por su parte, la hidrología de la zona de estudio se caracterizó con una descripción de las quebradas afluentes a la Pampa del Tamarugal, que de norte a sur son: Aroma, Tarapacá, Quipisca o Juan de Morales y Chacarilla. Estas presentan escurrimientos permanentes en la zona alta, con caudales menores que van de 5 a 15 L/s. El sector de Pica no presenta agua superficial, sino sólo manifestaciones del agua subterránea que aflora en este sector, con un

caudal medio aproximado de 50 L/s. Este se originaría en los Altos de Pica, donde las precipitaciones se producirían mayoritariamente durante el mes de enero, estimandose precipitaciones medias anuales que varían con la altura desde 10 a 150 mm.



Figura 3.21: Geología estructural del área de estudio.

Una revisión de los antecedentes hidrogeológicos en la zona permitió estudiar la recarga que ha sido estimada, así como el movimiento del agua subterránea y la descarga. Los estudios coinciden en que la recarga se produce en el sector de Altos de Pica, debido al diaclasamiento y las fracturas en esta zona, sin embargo, los valores estimados son dispares, entre 250 y 890 L/s. En la revisión del estudio realizado por JICA-DGA-PCI (1995) se menciona que también estaría constituida por los excentedes de Huasco. Por su parte, el movimiento del agua subterránea se describe en su mayoría como de tránsito lento, con dirección E-O, y la descarga está asociada a las extracciones, que también presentan variabilidad y error en el cálculo, con valores corregidos entre 200 y 250 L/s. Se concluye que la geología estructural del sector repercute en que las cuencas hidrogeológicas no estén claramente relacionadas con las cuencas hidrográficas, existiendo flujos por fallas, lineamientos y otras estructuras que transportan el agua a distintos sectores, con velocidades y por tanto tiempos de residencia muy variables en el acuífero.

Dado que el estudio tuvo como herramienta principal el uso de técnicas isotópicas e hidrogeoquímicas para entender de mejor forma el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico de la zona de estudio, los antecedentes disponibles en este ámbito se analizaron algunos nuevamente y otros de forma particular. De estos antecedentes se desprende que los valores de ¹⁸O que se han observado en la zona han presentado valores entre -6,3‰ y -13‰, mostrando acuíferos disntintos, no conectados y con diferentes áreas de recarga. Isotópicamente, los puquíos de Pica presentan características similares a las vertientes del Salar del Huasco, lo que se refleja tanto para ¹⁸O como para ¹⁴C. Del mismo modo, algunas vertientes en la Pampa del Tamarugal se han reportado como similares a las muestreadas en el Altiplano. En la zona alta del sector de Pica se han tomado datos que reportan valores de ¹⁸O de -13‰ y en Quisma, a menor cota, valores de -9‰.

Los resultados que arrojó el estudio indican que las aguas del "Invierno Altiplánico" son más empobrecidas que aquellas provenientes de frentes del Oceáno Pacífico, aunque la información es de corta data y no relacionada a magnitudes, lo que a su vez dificulta entre otras cosas delimitar áreas de recarga para los 5 sectores estudiados (Concova, Pica, Matilla, Chintagua y Esmeralda). En Pica propiamente tal, las aguas on livianas y presentan algunas evidencias de evaporación en pozos y vertientes. La altura mínima de recarga para esta zona se ha descrito como aquella que tiene un contenido isotópico de ¹⁸O menor a -12‰, equivalente a 3.479 msnm, de acuerdo a la siguiente expresión:

 $H = -438, 2 \cdot \delta^{18}O - 1779, 8$

Las aguas de Pica se reconocen como originalmente de alta temperatura, baja conductividad y bajo contenido de ¹⁸O. También se reconocen recargas profundas por vías preferenciales, las que requieren de un estudio más profundo.

En relación a la conexión entre la cuenca Salar del Huasco y Pica, ésta se descarta, proponiéndose la existencia de una discontinuidad debido a tres aspectos. El primero de ellos es el afloramiento de vertientes en la orilla oeste del Salar del Huasco, que drenarían ese mismo sector de la cuenca; lo segundo dice relación con la similitud de las edades relativas detectadas en el acuífero con las de otros acuíferos de cuencas endorreicas en la zona de estudio. Finalmente, el balance hídrico de esta hoya hidrográfica planteado en el Balance Hídrico de Chile (1987), refleja que el error de cierre es aceptable, calzando bien las variables hidrológicas utilizadas al momento de la realización de dicho estudio.

Un análisis hidrogeoquímico muestra la evolución de la conductividad medida en los sólidos totales disueltos (STD), la evolución química y las características químicas originales del agua de recarga. Dentro de estos últimos aspectos se revisa la relación de Na y Cl, que presenta un patrón esperable y regular. También se revisa la relación de los distintos iones con la conductividad medida en las aguas a través de los pozos y vertientes distribuidos en los 5 sectores en que se agrupó la zona de estudio. El aumento de los STD en el sector de Pica/Matilla/Esmeralda se produce únicamente por la disolución de evaporitas.

Finalmente, la recarga reportada para el sector de Pica varía entre 221 y 276 L/s, entregándose un promedio de 250 L/s. Su estimación se hizo considerando lo popuesto por el estudio JICA-DGA (1995), que relaciona precipitación, área aportante y un coeficiente de escorrentía determinado regionalmente. El 20 y 25% de lo que resulta entre evaporación e infiltración se atribuye a recarga, dando los valores del rango arriba mencionado.

3.2.12 Catastro de Obras de Captación a Partir de Revisión Bibliográfica.

Usando la información disponible de la cuenca en estudio, se construyó una base de datos con las obras de captación. Este catastro contempla únicamente las perforaciones subterráneas, que corresponden a obras que no se encuentran operando a la fecha, cuyos aprovechamientos aún no se encuentran resueltos.

Las captaciones subterráneas se encuentran referidas con su nombre, ubicación, cota, profundidad, nivel estático y si tiene o no información estratigráfica y/o de pruebas de bombeo. Esta información se encuentra resumida en el ANEXO III.

3.3 Trabajos de Terreno

Con el fin de complementar la información recopilada y como parte de los objetivos del trabajo DGA-PUC (DIHA), se realizaron algunas campañas de terreno orientadas a conseguir tanto información hidrometeorológica de la cuenca, como química e isotópica de las aguas que circulan en ella. Los datos colectados en los trabajos de campo se separan en los temas de interés enumerados a continuación:

1. Campañas de instalación y recolección de datos de precipitación, temperatura y humedad del aire, y temperatura y humedad del suelo.

El procedimiento seguido se encuentra explicado en la Parte V del presente estudio, llamada "Implementación de Estaciones Meteorológicas".

En particular en la cuenca del Salar del Huasco se instalaron 3 estaciones, de las cuales 2 miden los parámetros precipitación, temperatura y humedad del aire, además de temperatura y humedad del suelo. La otra estación mide únicamente la precipitación.

En el Capítulo 6 de este informe se encuentra descrita la ubicación de estas estaciones, los datos colectados a la fecha y los análisis que se han hecho sobre éstos.

2. Campañas para la medición de evaporación desde las napas freáticas someras.

Se realizó una campaña de monitoreo en la hoya hidrográfica del Salar del Huasco, donde se abarcó sectores cercanos al salar además de las vegas y bofedales del sector norte, en Collacagua. Este trabajo se encuentra descrito en la Parte VII del presente estudio llamada "Medición de la Evaporación Mediante Método del "Domo"".

En el Capítulo 8 de este informe se resume el tratamiento de los datos y los valores de evaporación estimados a partir de la metodología del domo, así como la de otros equipos que se han operado en la cuenca.

3. Campañas de muestreo de agua para su posterior análisis químico e isotópico.

En la cuenca del Salar del Huasco se realizó una campaña de muestreo, que incluyó ejemplares de pozos, vertientes y cursos superficiales. Estas fueron analizadas para conocer sus parámetros químicos e isotópicos (δ^{18} O y δ^{2} H).

En el Capítulo 7 de este informe se resume el tratamiento dado a estos datos.

4 CARACTERIZACIÓN FISIOGRÁFICA

En este capítulo se realiza una descripción de la fisiografía regional y local de las cuencas en estudio, centrada en la descripción de los rasgos físicos de la superficie del territorio y de los fenómenos que en ella se producen. Además de las características del relieve, abordadas mediante una caracterización geomorfológica, se describe la hidrografía de la zona, que contempla la red de drenaje y las subcuencas aportantes a las depresiones en que se alojan los salares y lagunas de los sistemas altoandinos.

Las características propias de las zonas desérticas generan un sistema de erosión especial. Las temperaturas extremas, por ejemplo, favorecen la erosión mecánica; la escasez de precipitaciones es responsable de un drenaje esporádico, con lechos de ríos secos la mayor parte del año o zonas donde el cauce no logra inscribirse, predominando un escurrimiento tipo laminar. La vegetación es pobre y el suelo casi inexistente, con desarrollo importante de costras salinas (Derruau, 1966).

Por otra parte, la cuenca hidrográfica es la unidad básica de estudio del ciclo hidrológico, y corresponde a una zona de la superficie de la tierra en donde los escurrimientos superficiales, a partir de cada gota de lluvia, son drenados por el sistema de corrientes hacia un único punto de salida. En el caso de las cuencas cerradas o endorreicas, que son las abordadas en este estudio, el punto de salida corresponde a un lago, salar o depresión ubicada en el punto más bajo de su superficie.

La metodología empleada para el trazado de las cuencas y subcuencas se encuentra descrita en la Parte I del presente estudio llamada "Hidrografía Regional del Altiplano". El procesamiento de Modelos de Elevación Digital (DEMs) es la principal herramienta utilizada, junto a imágenes satelitales, mapas y coberturas SIG provistas por la DGA.

4.1 Geomorfología Región de Tarapacá

Para comprender el contexto regional en que se desarrolla este estudio, es preciso describir la primera agrupación regional, definida por Börgel (1983) según rasgos geomorfológicos propios del norte de Chile. Dentro de las unidades fisiográficas microrregionales, se describen aquellas relacionadas con la cuenca Salar del Huasco, y luego se caracteriza con detalle el área de estudio desde el punto de vista geomorfológico y sus rasgos hidrográficos.



[Modificado de Börgel, 1983]

Figura 4.1: Zonas geomorfológicas de la región septentrional de las pampas desérticas y cordilleras prealtiplánicas.

La primera agrupación regional, denominada región septentrional de las pampas desérticas y cordilleras prealtiplánicas, está acotada por el límite Chile- Perú al norte, las fronteras Chile-Bolivia y Chile- Argentina al este, el Océano Pacífico al oeste y el Río Elqui por el sur. Se utiliza un perfil transversal (Figura 4.2) a la latitud de Iquique (20° 15' aprox.) para señalar los quiebres de pendiente que separan a las siguientes unidades microrregionales.

- Farellón costero
- Planicie litoral
- Cordillera de la Costa y sus depresiones internas
- Pampa del Tamarugal
- Pediplanos y sistemas de glacis o pediment
- Precordillera del Río Lauca
- Cordones prealtiplánicos septentrionales

Es pertinente acotar que el modelado de un sistema natural, resulta de la interacción de diversos factores morfogenéticos. Aquellos que se asocian a procesos internos de la litósfera, se denominan factores endógenos (tectónica, litología y estratigrafía), y participan fuertemente en la formación de relieves estructurales. Los que se relacionan con la influencia del ambiente, factores exógenos (climáticos, hídricos y biológicos), participan en los procesos de erosión, transporte y acumulación (Mardones, 2003).



Figura 4.2: Perfil Región de Tarapacá (20° 15' S).

La Precordillera del Río Lauca se extiende desde el Volcán Tacora por el norte hasta los Altos de Pica por el sur, y sirve como divisoria de aguas entre el drenaje cuyo nivel base es el Océano Pacífico o las pampas interiores y el sistema de cuencas endorreicas estudiadas en este proyecto. La Cordillera Prealtiplánica destaca por su elevada altitud y un carácter volcánico predominante. Además, aísla a los sectores áridos y semiáridos de Chile de las masas de aire

húmedo amazónicas, y sirve como barrera limítrofe con Bolivia (Börgel, 1983). Dentro de esta unidad se emplazan cuencas intravolcánicas que pueden desarrollar salares actualmente activos, como el Salar del Huasco (Risacher et al., 2003).

4.2 Cuenca Piloto Salar del Huasco

La hoya hidrográfica del Salar del Huasco es una cuenca cerrada (endorreica) de una extensión de 1.471 km². Está ubicada en el Altiplano Andino, al este de la localidad de Pica en Chile y al oeste del salar de Empexa en Bolivia. En su interior alberga al valle de Collacagua, que tiene por base de equilibrio al salar del Huasco propiamente tal.

La cuenca es una depresión volcanotectónica con forma ovalada, elongada hacia el norte y hacia el sur, con un largo de unos 55 km en esta dirección y un ancho relativamente constante de 30 km en la dirección este-oeste. Tiene como límite poniente un cordón montañoso que incluye en su parte norte y centro la meseta de Altos de Pica, donde se encuentran elevaciones que varían desde 4.500 a 5.220 msnm. Por el oriente se alza la Cordillera de los Andes, representada por una cadena de volcanes que superan los 4.900 msnm, donde la divisoria de aguas de la cuenca es en general la frontera del país. Por el norte se sigue la sucesión de cuencas cerradas del Altiplano Andino, siendo la hoya hidrográfica de Laguna Lagunillas, adyacente en esta dirección. El límite sur lo constituye una elevación suave de terrenos volcánicos, donde se encuentra Pampa Guañada, Pampa León y el Cordón Carcanal, que drena hacia el Salar de Empexa en Bolivia y cuyas cumbres bordean los 4.000 msnm de altura.

En la cuenca misma se encuentra el principal afluente al salar en la depresión, el Río Collacagua, en un gran valle longitudinal norte-sur. En el punto denominado El Tojo se juntan los tributarios del Río Collacagua (Figura 4.3), dando origen a este. Por el norte llega la Quebrada Chaquina de bajo caudal y pendiente suave, que se asemeja a una larga ciénaga, mientras por el oriente llega el Piga, su principal alimentación, y que nace en los Ojos de Piga, en una zona cubierta de bofedales.

A partir de El Tojo, el Río Collacagua se desarrolla con baja pendiente en dirección recta al sur, formando en algunos sectores desplayes de aguas bajas que alimentan sistemas vegetales de especies freatófitas. Después de recorrer unos 15 km en esta dirección, las aguas se infiltran para alimentar subterráneamente al salar. El lecho del río continúa seco y arenoso por otros 10 km hasta el salar, donde llega en forma superficial en época de crecidas.

El salar y la laguna son el punto más bajo de la cuenca, con 3.770 msnm, donde se produce la acumulación y la evaporación de los recursos hídricos superficiales que descargan tanto al Río Collacagua como a numerosos manantiales adyacentes a este humedal.

460625 COPIA



Figura 4.3: Toponimia de la cuenca Salar del Huasco para descripción fisiográfica.

4.2.1 Geomorfología Local

El modelado de un sistema natural, resulta de la interacción de diversos factores morfogenéticos. Aquellos que se asocian a procesos internos de la litósfera, se denominan factores endógenos (tectónica, litología y estratigrafía), y participan fuertemente en la formación de relieves estructurales. Los que se relacionan con la influencia del ambiente, factores exógenos (climáticos, hídricos y biológicos), participan en los procesos de erosión, transporte y acumulación. Las unidades geomorfológicas locales se dividen en relieves estructurales y de erosión, relieves volcánicos y formas de acumulación, según el factor que influyó con mayor fuerza en su morfología.

Los procesos geomorfológicos que dominan el modelado del relieve en la cuenca Salar del Huasco son meteorización física, erosión, transporte y sedimentación. Meteorización química destaca localmente en los centros volcánicos pliocenos, afectados por alteración hidrotermal. La meteorización mecánica actúa fuertemente sobre las rocas volcánicas más septentrionales, ya que al ser más antiguas (Mioceno superior- Plioceno) han permanecido mayor tiempo expuestas a la erosión, lo que las hace más susceptibles a la fragmentación. La erosión, proceso de denudación de las rocas meteorizadas, es impulsada principalmente por el viento, la presencia esporádica de agua y, en el pasado, glaciares. Estos agentes transportan a los sedimentos por rampas, como los glacis, para depositarlos en las zonas de acumulación topográficamente más deprimidas.

Se presenta la distribución de las principales unidades geomorfológicas de la cuenca Salar del Huasco en la Figura 4.4, basada en la interpretación de imágenes satelitales y mapas topográficos. De este a oeste destacan: un cordón volcánico característico de la Cordillera Prealtiplánica, el glacis aluvial formado por los depósitos que descienden desde los centros volcánicos hasta el valle del Río Collacagua, y el glacis de erosión que sirve como rampa de descenso para los sedimentos provenientes de Altos de Pica y el mismo río. La zona centro sur es la más deprimida, por lo que recibe los aportes del dren principal, como lo atestigua la presencia del salar del Huasco, donde se conservan algunos cuerpos de agua superficial.

4.2.1.1 Relieves volcánicos

Los relieves volcánicos suelen ser constructivos, y son originados por procesos ígneos extrusivos, que forman flujos de material volcánico (coladas, flujos piroclásticos, lahares, etc.), proyecciones como ceniza, arena y lapilli, y conos volcánicos (Chong, 2003). Las principales formas destructivas son los cráteres y las calderas.

Cordón volcánico

Conjunto de conos volcánicos, coladas de lava y domos, de composición andesítica a dacítica, predominantemente. Dispuestos N-S, forman parte de la Cordillera de Los Andes, y sus cumbres marcan el límite entre Chile y Bolivia. Su elevación promedio bordea los 4.600 msnm, estando su máxima altura representada por el Cerro Paza (5.122 msnm) en esta cuenca. Su contacto con el glacis de acumulación al oeste es abrupto, lo que facilita la formación de algunos conos aluviales al cambiar la pendiente.



Figura 4.4: Mapa geomorfológico de la cuenca Salar del Huasco.

Los conos volcánicos simples se reconocen por su forma, han sido construidos en varios episodios explosivos de corto período, su diámetro bordea los 2 km, y sus laderas exponen pendientes cercanas a los 30°. Están formados por centros volcánicos pliocenos bien preservados. Algunos ejemplos son el Cerro Sacasani y el cerro ubicado al suroeste del Cerro Quimsachata. Los estratovolcanes son conos volcánicos complejos producidos por numerosas erupciones de larga duración, cuyo diámetro suele ser de unos 6 km en el área de estudio, como el Cerro Piga, Cerro Quillacollo y el estratovolcán al sur del Cerro Barrancani. Los cerros Huailla Occidente y Oriental forman un estratovolcán compuesto. Es común la formación de calderas, a partir del hundimiento de cráteres (colapso gravitacional), que favorecen la destrucción del cono. Este fenómeno suele coincidir con las zonas de debilidad donde existe alteración hidrotermal. Las coladas son una de las formas de construcción más comunes que puede formar la lava, y son emitidas por los centros efusivos recién descritos. Entre los domos, destaca el cumulodomo representado por el Cerro Porquesa, que consiste en una construcción de lava, cuyo relieve es más vigoroso que una colada (Derruau, 1966). Alcanza 800 m de altura y tiene forma de ocho, con un diámetro máximo de 2 km. Presenta un cono de derrubios a su alrededor, desarrollado gracias a la erosión y sus pendientes abruptas. En el sector noreste la Ignimbrita Pastillos forma una plataforma volcánica, subhorizontal, surcada por los drenes de las pampas Piga y Azul.

4.2.1.2 Relieves estructurales y de erosión

Cerros isla (inselbergs)

Altos topográficos aislados que surgen en la superficie del glacis, con forma alargada, cuyo diámetro mide cerca de 1 km. Se ubican en Pampa Guañare de Columtucsa y en rocas volcanosedimentarias cretácicas de la Formación Cerro Empexa. Su formación se atribuye a erosión diferencial.

Glacis de erosión

Superficie de pendiente longitudinal neta cercana al 7%, que prácticamente carece de pendiente lateral (Derruau, 1966). En general presenta sólo delgadas capas aluviales, sin ser una forma de colmatación, y es una de las formas propias de ambientes desérticos. Comprende una extensa área al oeste de la cuenca, cuya delimitación está dada por la extensión de la Ignimbrita Huasco, sobre la cual se desarrolla. En la parte superior se encuentran los Altos de Pica, y en la parte inferior desemboca en el valle del Río Collacagua, mientras que es interrumpida localmente por algunos inselbergs y cerros testigo.

Valles fluviales y quebradas

Formas de erosión generadas por la incisión vertical de los cursos de agua. Se distinguen valles con perfil en V y de lecho plano. Entre los primeros destacan las quebradas Queno y Huaillacabo, valles angostos de pendiente moderada (2- 8%). Los valles con lecho aterrazado son comunes en el área de estudio, pueden alcanzar mayores dimensiones, y su pendiente es muy baja. Se forman por la erosión del curso fluvial, al divagar por terrenos de muy baja pendiente. Los principales se ubican en la sección inferior de Quebrada Chaquina (500 m de ancho), Quebrada Chislaca (ancho promedio 200 m), y el valle del Río Piga, con cerca de 10 km de largo y una amplitud que varía entre 100 y 600 m. Sin embargo, el valle que domina la cuenca lo forma el Río Collacagua, su longitud es de 12 km aproximadamente, y llega a alcanzar 1.300 m de ancho. El relleno de estas depresiones son sedimentos fluviales, y además albergan en sus humedales casi la totalidad de la vegetación existente en la zona.

Escarpes

De amplia distribución en el área de estudio, con orientaciones preferenciales N-S, NNE-SSW y WNW-ESE, paralelas a las tendencias de los lineamientos. Por ello, exceptuando a los escarpes de deslizamiento, se les atribuye un control estructural. En el mapa adjunto se han trazado aquellos que son más notorios, como los que rodean a los cerros testigo, y escarpes generalmente abandonados, que delimitan la depresión de algunos valles. Los escarpes de deslizamiento poseen una limitada extensión areal, y su distribución se limita a la cima de estratovolcanes que han sufrido colapso gravitacional.

4.2.1.3 Relieves de acumulación

Aluvios

Los aluvios corresponden a material detrítico transportado por corrientes de agua, que rellenan las topografías más deprimidas, su composición litológica suele ser variada, dependiendo de las zonas que haya drenado la corriente de agua que los formó.

Derrubios

Los derrubios consisten en depósitos de escombros de falda generados por meteorización, que casi no han sufrido transporte, por lo que litológicamente suelen ser más homogéneos. Rodean a relieves topográficos elevados con laderas abruptas, como los domos de Cerro Porquesa y a los cerros Huailla Oriental y Occidente. Construyen conos y taludes de derrubios en la mayoría de los casos. Considerando las condiciones climáticas de la zona, su origen se

atribuye a la amplitud térmica que puede romper las rocas, tanto por crioclastia como termoclastia.

Conos aluviales

Se reconocen por su forma en abanico y son formados por los cauces torrenciales que transportan a los sedimentos provenientes del cordón volcánico, y luego llegan al glacis aluvial. La pendiente de esta zona suele ser débil, y como los drenes vienen de quebradas con mayor inclinación, la velocidad del agua disminuye, y es incapaz de arrastrar los materiales que ha transportado hasta allí, acumulándolos. La superficie del cono de deyección tiene cerca de un 5% de pendiente.

Campos de dunas (erg)

Formadas por una abundante sedimentación eólica de arenas, son fácilmente modeladas por el viento. A menuda presentan forma recurvada, como una S alargada, o bien adoptan sólo la forma de una medialuna (barcana). Su morfología y distribución puede cambiar constantemente, ya que se dejan modelar con facilidad por el viento.

Glacis de acumulación

Morfológicamente presenta características similares al glacis de erosión, sólo que en vez de estar formado por afloramientos rocosos, su composición consiste en depósitos aluviales y eólicos, con una influencia volcánica importante. Esta superficie desciende desde el cordón volcánico hasta el valle del Río Collacagua con una pendiente promedio de 4,5%.

Llanura lacustre

Superficie formada por los depósitos que se depositaron en el fondo de antiguos lagos. Composicionalmente predominan los limos y arcillas, con cantidades menores de arena (Sánchez y Velozo, 2007). Indican la delimitación de un antiguo lago emplazado en el Salar del Huasco.

Llanura aluvial

Relieve formado por el flujo de la Ignimbrita Pastillos, que se dispone como una superficie con una ligera inclinación hacia el oeste. Antiguamente consistía en una extensión plana, pero ahora la red de drenaje se ha ido inscribiendo generando 10 a 30 m de erosión lineal.

Lechos fluviales

No han sido representados en el mapa ya que abarcan pequeñas extensiones. Han sido modelados por los principales cauces que drenan al área de estudio, su granulometría depende de la intensidad del transporte en cada tramo del lecho. Composicionalmente predominan los materiales detríticos de origen volcánico.

Terrazas fluviales

Se localizan en el sector de Pampa Batea y en el curso medio del Río Collacagua, adosadas a la pared del valle. Indican un antiguo nivel del lecho fluvial, que fue socavado al cambiar la línea base del río, generando un escarpe en su límite con el lecho actual. Su tamaño reducido no permite representarlas a la escala del mapa.

Salar

Rasgo hidrográfico que presenta gran parte de las cuencas endorreicas. La cuenca Salar del Huasco es una cuenca evaporítica, que por sus rasgos tectónicos y climáticos favorece la formación de costras salinas. El origen de las sales se atribuye a la actividad volcánica, donde composicionalmente dominan los sulfatos y cloruros (López y Garcés, 2002).

4.2.2 Hidrografía

Red Hidrográfica

El clima de esta zona permite el desarrollo de un sistema de drenaje con cursos de agua generalmente intermitentes. Sin embargo existen drenes permanentes, como el Río Collacagua, que es alimentado en su primer tramo por el Río Piga, y aguas arriba de Peña Blanca cuenta con los aportes de los ríos Batea y Chaquina. Los patrones de drenaje que se describen a continuación, señalados en la Figura 4.5, otorgan indicios sobre el control litológico y tectónico del terreno.

Red subdendrítica

Su desarrollo coincide con la ubicación del cordón volcánico cenozoico, con una densidad media. A mayor escala se puede apreciar que forma parte de un extenso sistema radial, controlado por la forma de los conos volcánicos pliocenos, escasamente erodados. Es producido por una modificación de la red dendrítica, probablemente por control estructural, ya que la mayoría de los afluentes se disponen paralelos a los lineamientos NE-SW, mientras que

los cauces principales se asocian principalmente con una tendencia WNW-ESE. Los ángulos de confluencia varían mayormente entre 60° y 90°.

> Red rectangular a subparalela

Tanto los tributarios como el cauce principal suelen poseer un trazado rectilíneo, manteniendo un paralelismo entre los drenes. Los afluentes pueden ocurrir paralelos a un curso principal, como la parte superior de Quebrada Chaquina, cuyo cauce principal es paralelo al Río Collacagua. Así también los tributarios cortos de primer orden del Río Piga, son paralelos al curso central. La relación de confluencia suele ser ortogonal. Se desarrolla en terrenos de pendiente moderada a fuerte (~4%), afectado por un fuerte control estructural, como ocurre en el Carcanal de Diablo Marca, donde hay una serie de fallas normales orientadas NNE-SSW, paralelas a la red.

Texturalmente pueden diferenciarse dos zonas, una de alta densidad en Quebrada Chaquina y el Río Piga, y otra de menor densidad al este del valle del Río Collacagua. Este parámetro puede asociarse con una mayor permeabilidad en las zonas de densidad baja.

Red subparapela

Se caracteriza porque los cauces tributarios drenan paralelamente al terreno, formando ángulos agudos con los cursos de mayor orden. Al llegar a los cauces principales suelen cambiar su dirección, generando una serie de drenes paralelos entre sí. Indica pendientes uniformes, como ocurre en las pampas Sillillica, Rinconada y Guañare. Sigue los lineamientos NW-SE en Pampa Batea y en los cerros Huailla Occidente y Oriental, mientras que en las pampas Sillillica y Rinconada sigue los lineamientos NE-SW, casi perpendiculares al régimen anterior. Al suroeste del Salar del Huasco se aprecia la sensibilidad de la red de drenaje frente a la orientación de las estructuras.

Red anastomosada

Está formada por canales entrelazados, algunos cauces con trazado meandriforme y numerosas zonas de vegas. Suele formarse en llanuras aluviales, ya que por lo general acumula un importante volumen detrítico. Se asocia con una alta tasa de sedimentación y un caudal moderado a bajo. En la cuenca Salar del Huasco se distribuye a lo largo del valle del Río Collacagua.

Red dicótoma

Se desarrolla en conos aluviales, caracterizándose por la distribución de los cursos de agua principales en forma de abanico. Esta ramificación se produce en las zonas donde existe un

quiebre en la pendiente, generalmente sobre sedimentos permeables de grano grueso. Las zonas más distales acumulan sedimentos de menor granulometría, donde los cauces pueden adquirir un patrón anastomosado al disminuir la pendiente. Este patrón se aprecia en la base del Cerro Quimsachata, entre los cerros Sacasani y Quillacollo, al sur del Cerro Piga y en las faldas del Cerro Porquesa. No ha sido representado en la Figura 4.5, ya que tiene su ocurrencia a pequeña escala.

Red dicótoma

Se desarrolla en conos aluviales, caracterizándose por la distribución de los cursos de agua principales en forma de abanico. Esta ramificación se produce en las zonas donde existe un quiebre en la pendiente, generalmente sobre sedimentos permeables de grano grueso. Las zonas más distales acumulan sedimentos de menor granulometría, donde los cauces pueden adquirir un patrón anastomosado al disminuir la pendiente. Este patrón se aprecia en la base del Cerro Quimsachata, entre los cerros Sacasani y Quillacollo, al sur del Cerro Piga y en las faldas del Cerro Porquesa. No ha sido representado en la Figura 4.5, ya que tiene su ocurrencia es a pequeña escala.

Características de la Cuenca y de las Subcuencas

Algunas características morfométricas de la cuenca del Salar del Huasco son expuestas en la Tabla 4.1. En particular, allí se detallan altura máxima, media y mínima, rango, pendiente media, superficie de la cuenca y del salar.

Superficie cuenca	1.471 km^2
Pendiente media	11,80 %
Altura máxima	5.220 msnm
Altura media	4.165 msnm
Altura mínima	3.772 msnm
Rango	1.448 m
Superficie del salar	$50,4 \text{ km}^2$

Tabla 4.1: Características morfométricas del Salar del Huasco

La Figura 4.6 muestra la curva hipsográfica o hipsométrica de la hoya del Salar del Huasco, que indica la proporción de su superficie en determinadas bandas de altura. Se aprecia que la totalidad de la cuenca se encuentra sobre los 3.750 msnm, con cerca de un 65% de ésta sobre los 4.000 msnm.

460625 COPIA



Figura 4.5: Red hidrográfica y patrones de drenaje cuenca Salar del Huasco.



Figura 4.6: Curva hipsográfica cuenca del Salar del Huasco

La cuenca superficial se ha dividido en 20 subcuencas, que representan las subáreas aportantes a la depresión más la depresión misma en que se encuentra el salar. Los nombres de estas unidades se muestran en la Tabla 4.2 y se asignaron de acuerdo a las singularidades topográficas o cursos superficiales más importantes contenidos en ellas.

Tal como se menciona más arriba, el principal curso superficial en la cuenca corresponde al Río Collacagua, que proviene de la unión de los ríos Piga (desde el oriente) y Chaquina (por el norte) en El Tojo. En su recorrido, específicamente entre el caserío Collacagua y El Tojo, recibe el aporte de la Quebrada Batea, el arroyo Porquesa, y algunas quebradas de flujos eventuales.

Entre El Tojo y Manco Collacagua el río no recibe afluentes permanentes. Algunas quebradas laterales como la de Peña Blanca, Millumilluri, Sillillica, etc., aportan aguas sólo en época de grandes lluvias estivales. El desarrollo total del Río Collacagua, desde su nacimiento hasta la orilla norte del salar, es de aproximadamente 43 km.

460625 COPIA

ID	ID Subcuenca	Nombre	Superficie (km ²)
1	111.1	Pampa Porquesa	106,0
2	111.2	Pampa Piga	101,9
3	111.3	Quebrada Quechagual	15,5
4	111.4	Loma Quillacagua	15,1
5	111.5	Quillacollo	8,0
6	111.6	Queñuañe	15,6
7	111.7	Sillillica Norte	34,3
8	111.8	Sillillica Sur	43,9
9	111.9	Quimsachata	24,5
10	111.10	Rinconada	153,1
11	111.11	Quebrada de Huasco	49,5
12	111.12	Quebrada Pailca	132,8
13	111.13	Cotane	95,7
14	111.14	Altos del Huasco	17,2
15	111.15	Columtucsa	57,0
16	111.16	Carcanal de Diablo Marca	50,5
17	111.17	Pampa Diablo Marca	34,7
18	111.18	Pampa Guañare	86,4
19	111.19	Pampa Chaquina	136,1
20	111.20	Collacagua - Salar	293,1

Tabla 4.2: Subcuencas Salar del Huasco

460625 COPIA



Figura 4.7: Cuenca y subcuencas (ID) Salar del Huasco, Región de Tarapacá.

En el entorno del salar surgen vertientes o afloramientos de agua, siendo las de mayor caudal la vertiente Huasco Norte y Ermitaño, también denominadas Huasco Grande N° 1 y Huasco Grande, respectivamente. La vertiente Huasco Norte se sitúa en el extremo norponiente del salar (ver Figura 4.3), donde el agua brota a unos 4 m sobre el nivel de éste con una temperatura de 15,5 °C y un caudal promedio de 26 L/s. Más al sur, a orillas del salar y junto al antiguo camino a Pica, se encuentra la vertiente Ermitaño, de donde el agua brota a 15,5 °C, con un caudal promedio de 23 L/s. Las aguas de estas vertiente son dulces, con Conductividades Específicas de aproximadamente 590 μ S/cm.

Collahuasi – GP Consultores (2008) reconoció otras vertientes en el salar, cuyos caudales varían entre 1 y 13 L/s. Entre estas vertientes se tiene: Lukas, Baño del Lalo, Kakavinto, Chulumpite, Jaisure, Umakechina, Huascolipe N° 1, Huascolipe N° 2, Huascolipe N° 3, Huascolipe N° 4 y Huascolipe N° 5. Las aguas de este grupo de afloramientos abastecen sistemas vegetacionales (vegas/bofedales) y forman lagunas terminales desde donde se evaporan las aguas excedentes (Figura 4.8). Dentro del salar estas aguas más dulces desarrollan una compleja red de drenaje conformada por canales y lagunas que le otorgan al humedal diferentes configuraciones físicas, químicas e hidráulicas, permitiendo la aparición de diferentes microhábitat para el establecimiento de una flora y fauna particular.

Además, en el salar se desarrolla otro sistema de 3 lagunas interiores, de aguas saladas, que se ubican alineadas de norte a sur, al este de la Laguna Grande. Dicho sistema se caracteriza por tener 2 estructuras bien definidas: un "cerro" de vegetación y una laguna de evaporación (ver Figura 4.8).

Dentro del área del salar, las lagunas pueden dividirse en perennes y eventuales, formándose estas últimas después de eventos importantes de precipitación, las que dan origen a crecidas del Río Collacagua. La mayor laguna es la denominada "Laguna Grande o Permanente", abastecida principalmente por la vertiente Ermitaño, y se ubica a lo largo de todo el borde oeste y sur del salar. Presenta agua durante todo el año y sus características varían en función del período estacional y si se ha tratado de un año lluvioso o seco. En periodos secos, sólo puede observarse agua en aquellos sectores de la laguna donde ingresan los cursos de agua proveniente de las vertientes.



Fuente: [Collahuasi – GP Consultores, 2008]

Figura 4.8: Lagunas en el Salar del Huasco.

COPIA

5 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

5.1 Marco Geológico

5.1.1 Estratigrafía

Las unidades que afloran en el sector de la cuenca piloto Salar del Huasco de la I Región de Chile, comprenden unidades del Paleozoico, el ciclo sedimentario marino – continental del Jurásico, el ciclo sedimentario – volcánico del Cretácico Superior – Mioceno, y los depósitos de relleno. Los afloramientos paleozoicos más cercanos al Salar del Huasco se ubican al NW, en la Precordillera en el sector de Juan de Morales, y al SW en el sector de Sierra de Moreno. Sobreyace en discordancia angular a las rocas paleozoicas, una secuencia sedimentaria que representa la evolución de una cuenca marina de trasarco. Posterior al ciclo sedimentario, sobreyacen en discordancia angular las unidades sedimentarias volcánicas de diversa extensión areal, siendo las pre-miocénicas más bien restringidas, y las miocénicas, de distribución amplia y cubriendo grandes extensiones (Acosta, 2004). Finalmente, se disponen en discordancia angular las unidades de cobertura, que pueden diferenciarse en volcánicos y sedimentarios, siendo estos últimos de carácter no-consolidado.

La evolución geológica del antearco es gobernada por una progresiva migración al este, de un frente volcánico que comienza su posición en la Cordillera de la Costa en el Jurásico, y migra hasta su posición actual en la Cordillera Occidental. La corteza de antearco se construye principalmente sobre un basamento Paleozoico, al cual sobreyacen y lo intruyen rocas magmáticas mesozoicas a terciarias de las etapas de arco, y que a su vez son intercaladas por sedimentos marinos y continentales.

La cuenca del Salar del Huasco se forma probablemente en el Terciario medio, cuando por consecuencia del tectonismo, se alza la zona de la actual Cordillera Occidental, determinando una divisoria de aguas continentales para esa época. Las rocas que afloran son las secuencias paleozoicas y mesozoicas, las cuales constituyen el basamento de la cuenca en sus inicios. Los rellenos iniciales de la cuenca, son entonces el producto de la erosión de esta divisoria continental, abierta hacia el este. En este episodio se producen los pulsos volcánicos que dan origen a los depósitos de ignimbrita. Hacia fines del Terciario, principios del Cuaternario, se produce el cierre de la cuenca hacia el oriente, producto de la actividad volcánica del actual cordón volcánico. La cuenca así se convierte en una cuenca cerrada, disminuye el aporte de sedimentos desde el oeste, y comienza un relleno rápido con productos piroclásticos y detritos volcánicos provenientes desde el este (INVEREX, 2000).

En el área de estudio afloran rocas estratificadas cuvo espesor total es del orden de 8.000 m y sus edades quedan comprendidas entre el Paleozoico superior y el Reciente. Dichas rocas han sido agrupadas en las siguientes unidades: Formación Collahuasi (Pzc), principalmente volcanitas ácidas e intermedias; Formación Quehuita (Jqm, Jqc), sedimentitas marinas y continentales; Formación Cerro Empexa (Kce), volcanitas intermedias y sedimentitas continentales; Formación Altos de Pica (Tsh, Tsu), que comprende a los sedimentos clásticos continentales con ignimbritas dacíticas y riolíticas intercaladas, y se subdivide en cinco unidades, entre ellas, la cuarta unidad que corresponde a la Ignimbrita Huasco y la segunda a la Ignimbrita Ujina; Formación Sillillica (TMv, TPv, Tt, TPt, TPLv, Qv), que incorpora a los Estrato-Volcanes I, II y III y los Depósitos Aterrazados del Terciario, además del Domo Dacítico emplazado al norte de la cuenca; Formación Collacagua (Qcs, Qcm, Qci), que abarca a los depósitos lacustres consistentes de grava, lodo y brecha volcánica; Formación Pastillos (Qip), que incorpora a la Ignimbrita Pastillos, compuesta por tobas cineríticas escasamente soldadas, con intercalaciones de limos y arcillolitas; y finalmente, los Depósitos no-Consolidados (Qal, Qs, Qe, Qsp, Qipe). En la Figura 5.1 se presenta la columna estratigráfica generalizada, destacando los afloramientos del Salar del Huasco en colores.

ERA	PERIODO	EPOCA	UNI	DAD	COLUMNA	ESPESOR	LITOLOGIA
CENOZOICA	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	QaL(Qx. Qe Qx		> 150	Gravas, arena, limo, sal
	TERCIARIO	PLIOCENO	THE T	TPV TPV TMV	THE THE ACTION	> 150 > 150 > 150	Tobas no-soldadas Conglomerados, areniscas Lavas andesíticas y daciticas
		MIOCENO	Ignimbrita Ujina		Ignimbrita Ujina	> 150	Ignimbritas daciticas
			Igrimbrita	HURE	Jululululul	> 150	Ignimbritas
MESOZOICA	CRETACICO	NEOCOMIANO	DRMACION RRO EMPEXA	SUP.		550	Lavas y brechas andesiticas Tobas daciticas
	JURASICO	SUPERIOR		INF.	VILLE CONTRACT	200	Andesitas, areniscas, conglomerados

Fuente: [Modificado de Hoja Collacagua, escala 1:250.000; Vergara y Thomas, 1984]

Figura 5.1: Columna Estratigráfica Generalizada, desde el Jurásico superior hasta el Cuaternario superior. En colores, las unidades que afloran en la cuenca del Salar del Huasco.

5.1.2 Rocas Íntrusivas

Las rocas intrusivas abarcan aproximadamente un 10% de la región donde se emplaza la cuenca, concentrándose en su mayoría en la parte sur, fuera del área limitada por ella. De acuerdo a determinaciones radiométricas de edades y relaciones de contacto, el emplazamiento de dichas rocas estaría asociado con cuatro ciclos intrusivos, ocurridos en el Pérmico, Cretácico Superior – Terciario inferior, Eoceno y Oligoceno.

Los intrusivos corresponden a granitos y granodioritas pérmicas, monzonitas y granitos del límite Cretácico – Terciario, granodioritas, dioritas, cuarzo-monzonitas y monzodioritas del Eoceno y dacitas y andesitas del Oligoceno. A pesar que la región donde se emplaza la cuenca del Salar del Huasco se caracteriza por presentar diversos afloramientos de rocas intrusivas, que cubren un rango de edades entre el Paleozoico y el Terciario, éstas prácticamente no afloran en el sector limitado a la cuenca en estudio.

5.1.3 Régimen Tectónico

Una de las características más relevantes de los Andes Centrales es la presencia de un *plateau* que se desarrolla a unos 4 km de altura, y que presenta una asimetría topográfica caracterizada por un monoclinal de alta pendiente en al flanco oeste, y un margen de bajo filo hacia el este. La formación y alzamiento del *plateau* altiplánico se considera como una respuesta isostática al acortamiento cortical, con un engrosamiento que alcanza entre 60 y 80 km de espesor para la corteza continental presente bajo el Altiplano (Isacks, 1988; Yuan et al., 2000). La mayor parte del acortamiento se ha acumulado en el flanco este del *plateau*, hacia la Cordillera Oriental y desarrollado una faja plegada y corrida sub- andina (Baby et al., 1997; Allmendinger et al., 1997; Lamb et al., 1997). En oposición a la naturaleza plegada y corrida del flanco este, el margen occidental da forma a un enorme monoclinal que carece de estructuras prominentes de deformación neógena. La discusión gira en torno a la naturaleza del monoclinal; en su mecanismo de formación, la edad del alzamiento, y la relación entre los procesos tectónicos y magmáticos que permiten la formación del *plateau*.

El margen oeste del Altiplano abarca a la Precordillera chilena, y al arco magmático reciente (Cordillera Occidental), el cual presenta actividad desde hace unos 28 Ma (Francis y Baker, 1978; Coira et al., 1982; Scheuber y Reuter, 1992). La Precordillera marca el margen occidental del Plateau, encontrándose la cresta a una elevación promedio de 4200 msnm. La posición de la cresta coincide, aproximadamente, con el sistema de fallas de la Precordillera, y con el eje del arco magmático del Cretácico tardío – Paleógeno.

La mayor parte de la deformación en la Precordillera y el antearco se relacionan a sistemas de fallas transcurrentes mayores y sub-verticales, que se desarrollan originalmente como estructuras contraccionales oblicuas en los distintos segmentos del arco magmático: sistema de fallas de la Precordillera (Reutter et al., 1996); sistema de fallas Atacama (Scheuber y Gonzalez, 1999). La evolución cenozoica del plateau se corresponde con un antearco controlado principalmente por rocas magmáticas que intruyen o sobreyacen a sedimentos deformados y a un basamento continental heterogéneo.

La región de estudio se ve afectada por un clima árido en el Mioceno, que progresa a un estado hiper-árido actual (Gaupp et al., 1999), y tiene como consecuencia una perfecta preservación de los rasgos geomórficos asociados a la deformación. La cuenca del Salar del Huasco reconoce tres fases tectónicas que dieron como resultado dos sistemas principales de rasgos estructurales (Sayes, 1978).

Los principales eventos tectónicos a los cuales han sido sujetas las rocas, se representan en las discordancias observadas entre las diferentes unidades que componen la columna estratigráfica generalizada (Figura 5.1), siendo consistentes con la agrupación estratigráfica expuesta anteriormente.

La primera fase ocurre durante el Plioceno y tiene como resultado un sistema de fallas de dirección NS y NW-SE. Estas cortan a las rocas terciarias de la Formación Altos de Pica. Esta fase produce un pliegue monoclinal en dirección NW en la Formación Altos de Pica. Pareciera que la elongación en dirección al NW del piso de la cuenca estuviera asociada a esta primera fase tectónica (Hargis y Montgomery, 1981).

La segunda fase ocurre durante el Plioceno tardío – Pleistoceno Temprano, y tiene como consecuencia un sistema de fracturas y fallas normales en dirección NS y NE-SW. Puede que algunas de las estructuras correspondan a reactivaciones de estructuras asociadas a la primera fase.

La tercera fase ocurre durante el post-Plioceno y tiene como resultado posteriores movimientos a lo largo del sistema de fallas que se han generado en la cuenca, incluyendo un desplazamiento horizontal de falla de 700 m, que descontinúa los depósitos ignimbríticos de la cuenca (Hargis y Montgomery, 1981).

Dos fallas de dirección NE en la Formación Altos de Pica se extienden por largas distancias hacia el SW antes de unirse y cambiar en dirección al S. El segmento oriental de este set de fallas delimita el margen occidental del piso de la cuenca. El perfil geológico asociado al pozo H1 indica que el techo de la Formación Altos de Pica está a 260 m bajo la base de declive de la falla expuesta en el margen oeste del piso de la cuenca. Se cree que estos 260 m corresponden al desplazamiento vertical mínimo verificado para la falla (Acosta, 2004). Stoertz y Ericksen (1974) postulan que el Salar del Huasco se ha inclinado, bajando hacia el NW por movimientos a lo largo de estas fallas. Tres manantiales (Huasco Norte, Las Ruinas, Ermitaño) afloran a partir de rocas adyacentes al plano de falla. Si las fallas asociadas a la primera fase tectónica han discontinuado a la Formación Altos de Pica por debajo de los depósitos fluviales/aluviales, la Formación Altos de Pica puede proveer una fuente prolífica de agua subterránea en estas áreas fracturadas (Hargis y Montgomery, 1981).

5.2 Unidades Geológicas

Afloran en la zona de estudio rocas de origen volcánico, de edades entre el Mioceno hasta el Cuaternario. Sobreyacen a estas unidades volcánicas, secuencias de depósitos de relleno, de edad Terciaria a Reciente. Existen afloramientos aislados de rocas de edad Cretácica.

5.2.1 Rocas Estratificadas

Formación Cerro Empexa (Kce) – Titoniano/Neocomiano

Esta unidad fue definida por Galli (1957) y corresponde a una secuencia continental de andesitas, traquitas, brechas, tobas y sedimentitas clásticas, que se disponen, en discordancia angular, sobre el Jurásico sedimentario. Está en discordancia angular, sobre la Formación Quehuita, e infrayace con igual relación a las secuencias terciarias. En base a las características litológicas predominantes, la unidad ha sido subdividida en dos miembros.

El Miembro Inferior está constituido por una alternancia de lavas y brechas andesíticas de color verde y morado, y en menor parte, por conglomerados y areniscas rojas. El Miembro Superior corresponde a lavas y brechas andesíticas y a tobas dacíticas subordinadas que alternan entre sí.

Su exposición en superficie se relaciona a un control estructural asociado a fallas inversas. El tectonismo que afecta la secuencia hace imposible determinar su espesor real, habiéndose medido sólo espesores mínimos que son de 200 m para el Miembro Inferior y 550 m para el Miembro Superior.

5.2.2 Rocas Volcánicas

Ignimbrita Huasco (Tsh) – Mioceno medio

Es una secuencia de tobas soldadas que aparecen expuestas, típicamente, al oeste del salar homónimo. Dicha unidad se dispone, con discordancia sobre las unidades pre-miocénicas, e infrayace, en concordancia, a secuencias volcánicas y sedimentarias del Cenozoico superior.

La Ignimbrita Huasco ocupa gran parte del sector norte del área, cubriendo a modo de una losa continua, una superficie del orden de 2.800 km². Está constituida por tobas total o parcialmente soldadas, de composiciones riolítica y dacítica. Ocasionalmente en algunos sectores se puede distinguir, en un perfil vertical, un sector basal de vitrófiros negros de escasa potencia (< 5 m); una parte media de tobas riolíticas, rosadas, compactas, muy soldadas, y con estructuras de flujo; y un nivel superior de color gris claro, medianamente soldado, en parte cinerítico.

460625 COPIA



Fuente: [Modificado de Carta Geológica, Hoja 59, escala 1:250.000; Vergara y Thomas, 1984] Figura 5.2: Geología superficial de la cuenca Salar del Huasco.

La unidad presenta grandes variaciones laterales de espesor, haciéndose progresivamente más delgada hacia los bordes, casi los únicos lugares donde aflora la base. La potencia máxima medida es de alrededor de 100 m.

Estrato-Volcanes I (TMv) – Mioceno superior/Plioceno

Se trata de los estrato-volcanes más antiguos del área, que se caracterizan por tener conos fuertemente erodados, mostrando en gran parte sus núcleos expuestos, los cuales presentan alteraciones solfatáricas.

Las relaciones estratigráficas muestran que estos aparatos volcánicos están cubiertos por ignimbritas pleistocénicas (Ignimbrita Pastillos) y por las lavas de otros centros volcánicos de edades pliocénicas o más jóvenes

Estrato-Volcanes II (Tpv) – Plioceno

Se agrupan aquí la mayoría de los centros volcánicos del área. Corresponden todos a estratovolcanes de una altitud del orden de 1000 m sobre la superficie de los salares. Se caracterizan por tener sus conos relativamente bien preservados y sus cráteres moderadamente erosionados. La erosión principal debe atribuirse a glaciares.

Las rocas constituyentes de estos centros corresponden a andesitas, de piroxeno y hornblenda, y a dacitas, en volúmenes aproximadamente equivalentes. Desde el punto de vista litológico, se puede distinguir la ocurrencia de cuatro ciclos efusivos alternados, dos andesíticos y dos dacíticos.

Lavas de estos centros volcánicos cubren, en algunos sectores, a volcanes similares, en parte, más antiguos y asignados al Mioceno superior – Plioceno. A su vez están cubiertos por depósitos ignimbríticos del Pleistoceno.

Ignimbrita Pastillos (Qip) – Pleistoceno Medio a Superior

La Ignimbrita Pastillos fue definida por Vergara (1978) como una unidad de ignimbritas y depósitos cineríticos. Posteriormente se ha constatado que dicha secuencia se prolonga hacia el norte del lugar tipo, aunque con algunas variaciones litológicas. Esta unidad se dispone sobre los depósitos aterrazados pliocénicos, como también sobre casi todos los centros volcánicos del área.

La Ignimbrita Pastillos ocupa gran parte de la Depresión de los Salares. En base a sus características litológicas, ha sido subdividida en dos miembros. El Miembro Inferior está constituido por rocas de colores gris claro a blanco, las que corresponden a tobas y depósitos

laháricos, altamente porosos, y con un muy bajo grado de soldamiento. Tiene aspecto de aglomerado, caracterizado por la presencia de gran cantidad de clastos angulosos y subangulosos, de hasta 30 cm de diámetro, incluidos en una matriz tobácea. El Miembro Superior corresponde a un depósito de cineritas dacíticas no soldadas. Sin embargo, en las cuencas de los salares de Coposa y del Huasco hay incluidos en la unidad niveles de arcillolitas, limos y diatomitas grises y amarillas, estratificados en capas de 2 - 20 cm de espesor

El Miembro Inferior tiene potencia variable entre 5 y 40 m. El Miembro Superior tiene un espesor que fluctúa entre los 15 y 50 m, aumentando, en general, las potencias hacia el norte.

Domo Dacítico del Cerro Porquesa (Qv)

Las volcanitas cuaternarias corresponden a centros volcánicos aislados, con zonas de alteración asociadas. Se exponen en el Cerro Porquesa y el Cerro Mesa. Se presenta constituido por domos, coladas y depósitos de bloques y cenizas. Es característico un domo "tipo torta", de sección ovalada y al que se le asocian depósitos de bloque y ceniza.

Morfológicamente, el Domo dacítico del Cerro Porquesa corresponde a un cono truncado de paredes sub-verticales, cuyo plano superior tiene una amplia extensión areal. Está constituida exclusivamente por dacitas, en algunos sectores compactas, y en otras, porosas. Tiene textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda, biotita y cuarzo.

5.2.3 Depósitos No-Consolidados

Depósitos Salinos (Qs)

Hay tres depósitos salinos en el área: los salares del Huasco, Coposa y Michincha. Los niveles superficiales de éstos están situados a cotas del orden de 3.800 msnm, se caracterizan por mostrar eflorescencias salinas, que se desarrollan sobre las gravas, limos y cenizas que conforman el relleno de las cuencas citadas. Los constituyentes químicos son predominantemente sulfatos, y en menor parte cloruros y boratos. El desarrollo de estos cuerpos salinos tiene relación con las altas tasas de evaporación que ocurren en las cuencas altiplánicas de drenaje endorreico.

Depósitos Aluviales (Qal)

Corresponden a depósitos detríticos, no consolidados, de origen principalmente aluvial, y en menor parte coluvial. Dichos sedimentos conforman el relleno de las quebradas, depresiones y depósitos de piedemonte. Están constituidos por bolones, gravas, arenas y arcillas, cuyo grado de redondeamiento es proporcional al transporte ocurrido.
Los depósitos aluviales aparecen en los abanicos distribuidos al noreste del salar y están compuestos de ceniza volcánica retrabajada de granulometría fina a gruesa, con presencia de clastos de dacita (JICA-DGA, 1995).

Depósitos de Arenas Eólicas (Qe)

Corresponden a campos de dunas, especialmente del tipo barjanes, que se desarrollan en el borde oriental de la depresión de los salares. Están constituidos mayoritariamente por gravas de plagioclasa y sanidina, y en menor proporción por cuarzo y biotita.

Estas dunas consisten en arena de grano redondo fino a medio (Acosta, 2004). La orientación de las dunas indica un viento predominante noroeste (Hargis y Montgomery, 1981).

Depósitos Aluviales de Ceniza y Lapilli (Qipe)

Corresponden a extensos conos de eyección que se desarrollan a partir del flanco oriental de algunos volcanes y que se extienden en la depresión de los salares. Están conformados principalmente por cenizas y lapilli redepositados, y en menor parte por clastos de andesitas y dacitas, en los que se pueden observar estratificaciones gradada y cruzada.

5.2.4 Rocas Intrusivas

Desde el punto de vista hidrogeológico, estas rocas se consideran de permeabilidad muy baja debido a que son rocas que se forman bajo condiciones que permiten un desarrollo y crecimiento prolongado de los cristales que componen la roca, haciéndola una roca de textura cristalina y compacta.

De existir permeabilidad asociada a rocas intrusivas, ésta se atribuye a la permeabilidad secundaria adquirida y asociada a estructuras tales como fracturas.

Granodiorita Guatacondo (Tgrd) – Terciario Inferior

Rocas de esta composición y edad conforman gran parte de los intrusivos expuestos en el sector occidental del área, y pertenecen al grupo de intrusivos que corresponden al Terciario inferior. Corresponden a stocks de pequeñas dimensiones, inferiores a 20 km².

Las rocas frescas tienen color gris medio y textura hipidiomórfica granular. Una muestra típica presenta plagioclasa, cuarzos irregulares, feldespato alcalino, biotita y piroxeno.

5.3 Geología Estructural

La mayoría de los afloramientos de la cuenca Salar del Huasco se correlacionan a terrenos Cenozoicos, los que corresponden a unidades constituidas principalmente por niveles ignimbríticos, flujos lávicos, y depósitos detríticos, de edades comprendidas entre el Mioceno medio y el Reciente. Estas no están afectadas por accidentes tectónicos notables y sólo son levemente dislocadas por fallamientos de tipo normal.

5.3.1 Fallas

Es posible apreciar a escala macro-estructural, la presencia de un dominio de fallas, con dirección N-S (Figura 5.3). Siguiendo esta dominante, se puede definir una importante falla en el límite oeste del salar, que pone en contacto a la Ignimbrita Huasco con los sedimentos cuaternarios, que rellenan la cuenca sedimentaria que se corresponde a un *graben*, limitado a ambos lados por fallas NE-SW. Estas estructuras tienen una gran importancia desde el punto de vista hidrogeológico, ya que pueden funcionar como zonas de alta conductividad hidráulica o como barreras para el flujo de agua subterránea (Tröger y Gerstner, 2004).

Tanto la Ignimbrita Huasco como el borde oeste de la unidad de los Estrato-Volcanes I (TMv), son cortadas por extensas fallas de dirección NW-SE, que a su vez son cortadas por un set de fallas con dirección NE-SW. La zona deprimida de la cuenca está ubicada hacia el SW de la falla.

5.3.2 Lineamientos

Estructuras como fallas, fracturas y diaclasas, suelen expresarse en superficie mediante rasgos lineales. En esta cuenca las estructuras se expresan por alineación de topografía, patrón de drenaje lineal y afloramientos de roca truncados (Figura 5.4).

Existen seis orientaciones preferenciales, destacando las NNE-SSW, NW-SE y N-S. Con menor frecuencia se presentan las direcciones WNW-ESE, NNW-SSE y NE-SW. La Ignimbrita Huasco es afectada por todos los grupos de lineamientos, lo que permite inferir que han estado activas al menos hasta el Mioceno medio. Los centros volcánicos pliocenos son limitados al este por estructuras NNE-SSW y WNW-ESE, y además sus quebradas y cumbres se alinean según NW-SE y NE-SW, lo que apoya la suposición anterior. Los lineamientos N-S afectan mayoritariamente a los depósitos aluviales, al igual que la tendencia NE-SW, por lo que se presume corresponderían a actividad tectónica más reciente.



Figura 5.3: Fallas reconocidas en la cuenca Salar del Huasco.



Figura 5.4: Principales lineamientos reconocidos en la cuenca Salar del Huasco.

En el área se han reconocido numerosos lineamientos, que probablemente corresponden a fracturas o fallas de tensión, de orientaciones preferenciales N-S y en forma subordinada, NW-SE y NE-SW. Estas estructuras aparecen afectando secuencias tan jóvenes como los depósitos detríticos pliocénicos. Esto último permite fijar la edad relativa de las estructuras o, mejor aún, su último movimiento.

5.3.3 Otras Estructuras

Discordancias

La discordancia angular y de erosión que separa a la Formación Cerro Empexa de la Ignimbrita Huasco podría corresponder al efecto de la fase compresiva Quechua (Charrier y Vicente, 1972).

Diaclasas y Fracturas

La Ignimbrita Huasco corresponde al cuarto miembro de la Formación Altos de Pica. Consiste en una ignimbrita riolítica y dacítica total o parcialmente soldada que se caracteriza por las diaclasas y fisuras muy bien desarrolladas en este miembro de la formación, lo que puede observarse en el campo, como también en imágenes satelitales y fotografías aéreas del sector.

A menor escala ha sido posible observar la heterogeneidad regional presente en la Ignimbrita Huasco en cuanto refiere a su composición, grado de fracturamiento y/o diaclasado, así como el estado de oclusión y relleno de las discontinuidades (Figura 5.5). Esta última característica nos indica que las diaclasas y/o fracturas más antiguas pueden estar selladas por presencia de rellenos, lo cual implica diferentes conductividades hidráulicas, y por otro lado, la existencia de una tectónica reciente (Tröger y Gerstner, 2004).



Fuente: [Tröger y Gerstner, 2004]

Figura 5.5: Diaclasas, fracturas y relleno de fracturas en diferentes afloramientos de la Ignimbrita Huasco.

5.4 Estratigrafía de Pozos Profundos

En la cuenca del Salar del Huasco existen 44 sondajes, que en total suman 8.806 m perforados. De las 44 perforaciones, 27 corresponden a pozos de exploración de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), y se identifican con la letra E-(n° pozo), 15 corresponden a pozos de producción y se identifican con la letra P-(n° pozo), y dos son parte del estudio JICA-DGA, 1995. La mayoría de los sondajes se encuentran distribuidos dentro de un sistema estructural que limita el oeste de la cuenca, mientras una fracción menor está en Pampa Rinconada, al este del salar (ANEXO III).

Prácticamente todos los pozos cuentan con información estratigráfica de detalle. En la Tabla 5.1 se presentan las características generales de los pozos (coordenadas de ubicación, elevación y profundidad). En general, éstos se distribuyen sobre las pampas formadas por relleno volcanosedimentario, en las zonas topográficamente deprimidas de la cuenca, y a lo largo del segmento norte del Río Collacagua, donde están en contacto con la Ignimbrita Huasco, por el oeste, y con los depósitos de relleno, hacia el este. El sector del salar propiamente tal carece de perforaciones profundas, y consecuentemente de toda información litoestratigráfica.

Dentro del relleno sedimentario, los pozos se ubican principalmente al este del Río Collacagua, agrupados en tres zonas; una ubicada más al NE (Pampa Batea); otra al centro, (Pampa Sillilica), y otra hacia el SE (Pampa Rinconada). Estos fueron sitios estratégicamente seleccionados, debido a la probabilidad de encontrar allí los mayores espesores de acuíferos en depósitos sedimentarios terciarios. El manteo aparente hacia el este del graben que da forma a la cuenca Salar del Huasco apoyaría esta hipótesis.

En el sector norte, los pozos indican distintos espesores para cada depósito ignimbrítico. El pozo E-26X señala un espesor de 270 m para la Ignimbrita Huasco, mientras que E-21 y E-23 indican que la Ignimbrita Pastillos tendría 60- 80 m de potencia en Pampa Batea. En E-23, que se ubica cerca del Río Collacagua, se reconocen 120 m de arcilla con fragmentos de andesita bajo la ignimbrita, mientras que en P-13 se encuentra bajo ella un potente nivel de gravas (80 m) y en la base depósitos de arcilla. Algo similar muestra la estratigrafía del pozo E-19. A los pies del Cerro Piga, en el pozo E-21, bajo la ignimbrita hay más de 80 m de andesita.

En Pampa Sillillica los pozos P-2, E-5, P-1 y P-4 indican que la cobertura de ceniza varía entre 30 y 100 m de potencia. Se deposita sobre un potente nivel de gravas asociado a arcillas, bajo el que se reconoce la Ignimbrita Pastillos en los pozos ubicados más al norte (P-2, E-5 y P-1). Hacia el sur, el pozo P-4 indica que en la base se depositan rocas volcánicas.

Pozo	Toponimia	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Elevación (msnm)	Profundidad (m)
E1	Pampa Sillillica	7765349,8	520502,2	3894,61	250
E2	Pampa Sillillica	7765996,5	521615,8	3928,47	250
E3	Pampa Sillillica	7764203,3	520985,7	3882,80	250
E4	Pampa Sillillica	7763086,7	521476,8	3838,80	223
E5	Pampa Sillillica	7766498,7	520358,3	3899,02	206
E6	Pampa Sillillica	7767647,6	520217,4	3905,58	255
E7	Pampa Rinconada	7752890,4	525800,2	3819,30	252
E8	Pampa Rinconada	7751913,6	525913,0	3816,81	164
E9	Pampa Rinconada	7753802,0	525700,8	3826,93	177
E10	Pampa Rinconada	7754812,3	525594,4	3839,19	160
E11	Sillillica Norte	7771072,0	516779,0	3829,33	246
E12	Sillillica Norte	7771075,0	516792,0	3829,12	35
E13	Sillillica Norte	7771111,0	517781,0	3846,21	252
E14	Sillillica Norte	7772227,0	516693,0	3837,02	220
E15	Sillillica Norte	7772205,0	516701,0	3836,97	30
E16	Sillillica Norte	7773315,0	516830,0	3841,04	250
E17	Sillillica Norte	7772682,0	517838,0	3844,73	252
E18	Peña Blanca	7777863,0	516757,0	3855,45	180
E19	Peña Blanca	7780062,0	516112,0	3864,14	168
E20	Peña Blanca	7776523,0	518983,0	3962,47	186
E21	Pampa Batea	7780888,0	519593,0	4025,78	174
E22	Río Batea	7782944,0	520287,0	4011,29	180
E23	Caserio Collacagua	7783842,0	517413,0	3900,40	204
E24	Peña Blanca	7780032,0	516122,0	3863,92	18
E25	Peña Blanca - Collacagua	7782900,0	520261,0		60
E26x	Peña Blanca - Collacagua	7780380,0	514184,0		280
E27	Sillillica Norte	7770791,0	514885,0		250
P1	Pampa Sillillica	7765368,9	520535,6	3895,49	246
P2	Pampa Sillillica	7767653,1	520257,6	3907,12	250
P3	Pampa Sillillica	7766497,1	520398,2	3900,18	219
P4	Pampa Sillillica	7763075,9	521439,5	3862,21	198

Tabla 5.1: Pozos profundos en cuenca Salar del Huasco.

Pozo	Toponimia	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Elevación (msnm)	Profundidad (m)
P5	Pampa Rinconada	7752924,2	525789,7	3819,12	250
P6	Pampa Rinconada	7751957,1	525912,3	3816,73	134
P7*	Pampa Rinconada	7753770,7	525716,3	3826,54	177
P8*	Sillillica Norte	7771074,0	516811,0	3829,14	240
P8A	Sillillica Norte	7771116,7	516744,8	3829,43	230
P9	Sillillica Norte	7772726,3	517812,6	3844,97	246
P10	Sillillica Norte	7773338,7	516770,8	3840,90	248
P11	Sillillica Norte	7771101,2	517779,6	3846,22	234
P12	Peña Blanca	7780033,0	516145,0	3864,09	180
P13	Río Batea	7782905,0	520272,0	4009,56	180
P14	Sillillica Norte	7770829,6	514878,7	3872,43	240
J-10	Pampa Sillillica	7766372,0	517668,0	3813,50	205
J-G	Pampa Peña Blanca	7775786,0	516639,0	3849,90	157

Tabla 5.1: Pozos profundos en cuenca Salar del Huasco. (Continuación)

* Pozos sin estratigrafía.

Al este del salar, en Pampa Rinconada, los pozos E-9, P-5 y E-8 presentan un nivel de gravas con arcilla cuyo espesor alcanza fácilmente 100 m. En P-5 se observa un nivel de tobas de 40 m de espesor sobre la roca volcánica reconocida en la base de todos los pozos.

5.5 Unidades de Subsuperficie

La descripción estratigráfica de los diferentes sondajes ha permitido agrupar las unidades estratigráficas principales, lo que facilita su interpretación. La correlación entre las estratigrafías de los diferentes sondajes admite aproximarse a la distribución espacial de las secuencias de depositación en la sub-superficie y también a la geometría de la cuenca. La mayoría de estas unidades pertenecen, a su vez, a las unidades geológicas descritas en el capítulo de geología de superficie.

Los antecedentes expuestos anteriormente, como las descripciones geológicas regionales y de superficie, el mapa geológico y estructural, y la caracterización litoestratigráfica de pozos, permiten en conjunto definir y agrupar las unidades litológicas bajo superficie. Luego, estas unidades son analizadas en un marco hidrogeológico, considerando la información, entre otros, de las pruebas de bombeo (apartado 8.1).

Las unidades reconocidas en la cuenca mediante una serie de perfiles (Figura 5.6) corresponden, desde la más antigua a la más nueva a: Rocas volcánicas cretácicas (Kce);

Ignimbrita miocena (Tsh); Rocas volcánicas cenozoicas (TMv, TPv), Depósitos terciarios (Tt), Ignimbrita cuaternaria (Qip), y Depósitos no consolidados cuaternarios (Qal, Qv, Qe, Qs, Qipe).

Consideraciones sobre los Depósitos Terciarios (Tt)

Todas las unidades reconocidas en sub-superficie se manifiestan en superficie, a excepción de los depósitos terciarios, unidad de gran potencia y extensión areal, que se ha reconocido a través de las descripciones litoestratigráficas de los sondajes. Los depósitos se correlacionan con la Formación Collacagua, que está dividida en tres unidades litológicas: Superior, Media e Inferior (JICA-DGA, 1995). La distribución de los sedimentos se restringe a la fosa tectónica del graben y por rocas volcánicas cenozoicas, hacia el norte y el sur. La formación comprende una secuencia de sedimentos lacustres que consisten en lodo, arcilla y limos intercalados con arena y aglomerados hacia la base de la secuencia, e intercalados con cenizas volcánicas hacia el techo de la secuencia (Acosta, 2004).

La unidad Superior consiste en grava, arena y lodo, cubiertas por una costra salina limosa. Hacia el centro de la cuenca, está compuesta principalmente por grava. La unidad Media consiste en grava, arena y lodo hacia la zona del salar, y grava hacia el centro de la cuenca. En conjunto, ambas unidades descritas se componen principalmente de gravas hacia el norte del salar, y de gravas y lodo hacia la zona del salar. La unidad Inferior consiste en una brecha volcánica en la zona del salar, variando a grava, arena y lodo hacia la parte central de la cuenca. Es más compacta y menos permeable que las unidades que la sobreyacen; ocasionalmente presenta fragmentos volcánicos y alternancia con capas de areniscas y conglomerados (Acosta, 2004).

Perfil A – A´ (perfil A)

El perfil A (ANEXO V) se ha reconstruido en base a la integración de la información litológica obtenida a partir de los pozos J-10, E-11, E-14, E-16, J-G, E-18, E-19 y E-25 (ver ANEXO III). Consiste en un perfil longitudinal orientado sur a norte (Figura 5.6), que reconstruye la subsuperficie de la cuenca, coincidiendo con el sector donde se reconocen los depósitos asociados al flujo del Río Collacagua, y coincidiendo también con la traza de una de las estructuras principales reconocidas en la cuenca del Salar del Huasco, donde se ponen en contacto rocas de la Ignimbrita Huasco, por el oeste, con depósitos terciarios, por el este.

En general, el perfil longitudinal se caracteriza por presentar una unidad poco potente de depósitos aluviales (Qal), atribuidos a la erosión superficial de las unidades de roca que afloran sobre el eje del perfil y a los depósitos fluviales asociados al Río Collacagua. La unidad aumenta su espesor hacia el norte.



Figura 5.6. Ubicación de perfiles estratigráficos en cuenca Salar del Huasco (proyección sobre imagen LANDSAT).

Bajo los depósitos aluviales, y de manera prácticamente uniforme a lo largo del perfil, se reconoce la Ignimbrita Pastillos (Qip) con una potencia constante y cercana a los 50 m de espesor. Esta unidad se caracteriza por su color gris, y su contenido en fragmentos de andesita.

Subyace a la unidad ignimbrítica cuaternaria una potente unidad de espesor variable, que se constituye principalmente por porcentajes variables de gravas y arcillas; y gravas, arenas y arcillas aisladas. En el perfil A (ANEXO V) se reconoce una estratificación de los depósitos terciarios, que es de distribución homogénea a lo largo del perfil. La mayor potencia del depósito consiste en gravas con abundantes arcillas. El contenido de arcillas en las gravas varía de manera rítmica, entre gravas con abundante contenido en arcilla, y gravas con contenidos menores de arcillas, favoreciendo el almacenamiento preferencial del agua. Es importante notar que en el techo de la unidad se observa una capa con altos contenidos en arcilla, de unos 10 m de espesor, y que se compone por arcillas hacia el sur, y arcillas con pocas gravas, hacia el norte. Este estrato influye en el funcionamiento hidráulico de la cuenca, ya que actuaría como semi-confinante. Los pozos E-16, J-G y E-18 (ANEXO III), permiten inferir que a unos 70 - 80 m de profundidad existe un depósito de gravas, de alto potencial hidráulico, de unos 3 - 4 m de espesor.

Los depósitos terciarios sobreyacen a rocas que corresponden a la Ignimbrita Huasco (Tsih). La roca tobácea tiene una morfología irregular que condiciona las potencias variables de los depósitos terciarios a lo largo del perfil. Bajo los pozos E-11 y E-14, la Ignimbrita Huasco subyace a la Ignimbrita Pastillos (Qip). Más al sur de estos pozos, se produce un nuevo hundimiento de Tsih, probablemente asociado a fallamiento normal, o a erosión localizada de la toba. Hacia el norte, esta unidad se pone en contacto con estrato-volcanes del Mioceno tardío.

Perfil U – U' / Perfil V – V' (perfil U – perfil V)

Los perfiles U y V (ANEXO V) describen el sector norte de la cuenca sedimentaria, donde hacia el este, se ubica la Pampa Batea. El perfil U es un perfil transversal, que se construye a partir de la información litológica de los pozos E-26X, E-19 y E-21 (ANEXO III). El perfil V es un perfil longitudinal, que también busca caracterizar los depósitos de la Pampa Batea, y se reconstruye a partir de los pozos P-13 y E-21.

El perfil U muestra rocas tobáceas de la Ignimbrita Huasco (Tsih) que se depositan al oeste, y que se ponen en contacto con rocas volcánicas del Plioceno (TPv) al este. Sobreyacen a estos, en el sector de la cuenca sedimentaria, unos 100 m de depósitos terciarios (Tt), que en este sector se constituye por arcillas gris-pardas en la base, y gravas muy arcillosas hacia el techo. Sobre los depósitos sedimentarios, se extiende la Ignimbrita Pastillos (Qip), que proviene del

NE, y que rellena la Pampa Batea. Algunos sectores de la Pampa Batea se encuentran cubiertos por extensos conos aluviales, que pueden alcanzar hasta 15 m de espesor.

El perfil V se ubica un poco más al este de un afloramiento aislado de lavas miocénicas, en medio de la Pampa Batea. Todo el sector se encuentra cubierto por depósitos de la Ignimbrita Pastillos. Bajo el pozo P-13, se identifica sobre el contacto de lavas miocénicas (TMv) al norte con lavas pliocénicas (TPv) al sur, un conjunto de depósitos sedimentarios que en su base contienen gravas muy arcillosas (Tt) y, hacia el techo, se compone de un paquete de unos 70 m de espesor de gravas. Hacia el sur se acuña la unidad de depósitos sedimentarios. La Ignimbrita Pastillos sobreyace a los sedimentos terciarios y a las lavas del Plioceno. Hacia el sur del perfil, se reconocen importantes espesores para las gravas recientes asociadas a conos aluviales.

Perfil W – W' / Perfil X – X' (perfil W – perfil X)

Los perfiles W y X (ANEXO V) describen el sector central de la cuenca sedimentaria, donde hacia el este se ubica Pampa Sillillica. El perfil W es un perfil transversal, que se construye a partir de la información litológica de los pozos J-10 y E-5 (ver ANEXO III). El perfil X es un perfil longitudinal, que también busca caracterizar los depósitos de Pampa Sillilica, y se reconstruye a partir de los pozos P-2, E-5, P-1 y P-4.

El perfil W muestra las rocas tobáceas de la Ignimbrita Huasco (Tsih) que se depositan al oeste, y que se ponen en contacto con rocas volcánicas del Plioceno (TPv) al este. Sobreyacen a estos, en el sector de la cuenca sedimentaria, una potente unidad de depósitos terciarios (Tt) de unos 200 m de espesor, y que en este sector se constituye por gravas con porcentajes variables de arcilla, y escasas intercalaciones locales de arcilla. Durante la perforación del pozo E-5, se recuperaron muestras de una toba gris, argilizada, y que se correlaciona con la Ignimbrita Pastillos (Qip). Esto indicaría que hacia el este del perfil, sobreyacen a las lavas pliocénicas (TPv) depósitos ignimbríticos (Qip). El perfil completo se caracteriza por presentar una cubierta sedimentaria compuesta por una ceniza gris, homogénea, que corresponde a la unidad de depósitos aluviales de ceniza y lapilli (Qipe), y tiene un espesor de unos 70 m.

El perfil X se ubica sobre los depósitos sedimentarios aluviales pertenecientes a la unidad Qipe, que cubren la mayor parte de la Pampa Sillillica. Este depósito disminuye su potencia hacia el sur. Subyacen a la unidad Qipe los depósitos terciarios (Tt), que se caracterizan por presentar altos contenidos de arcilla en el techo de la unidad y hacia el norte del perfil. Bajo los depósitos terciarios, se reconoce la Ignimbrita Pastillos (Qip) en el norte, en contacto con lavas pliocénicas (TPv) hacia el sur.

Perfil Y – Y´ / Perfil Z – Z´ (perfil Y – perfil Z)

Los perfiles Y y Z (ANEXO V) describen al sector sur de la cuenca sedimentaria, donde hacia el este del salar del Huasco, se ubica la Pampa Rinconada. El perfil Y es un perfil transversal, que se construye a partir de la información litológica del pozo P-5. El perfil Z es un perfil longitudinal, que busca caracterizar los depósitos de Pampa Rinconada, y se reconstruye a partir de los pozos E-10, E-9, P-5 y E-8 (ANEXO III).

El perfil Y describe la geología de subsuperficie bajo el salar. A pesar de que no hay datos litológicos para el sector del salar propiamente tal, puede inferirse que la mayor parte del salar se deposita sobre la Ignimbrita Huasco (Tsih). Más al este se produce un hundimiento estructural, que está cubierto por los depósitos terciarios (Tt) que rellenan la cuenca. El pozo P-5 nos indica que el relleno sedimentario se compone de una alternancia de gravas con bajos contenidos en arcilla, y gravas con alto porcentaje de arcilla. Hacia el final de la perforación, se reconoce la toba argilizada de color gris, que sobreyace a lavas pliocénicas (TPv).

El perfil Z caracteriza a Pampa Rinconada, descrita por un basamento de lavas del Plioceno (TPv), que morfológicamente da lugar a una pequeña cuenca sedimentaria rellena por los depósitos terciarios, con potencias en este sector de hasta 170 m. Hacia el norte del perfil, el relleno sedimentario presenta altos porcentajes de arcilla, situación que varía hacia el sur de la pampa, donde los contenidos en arcilla son bajos. Es importante notar un horizonte de gravas, producto de la erosión de la unidad TPv hacia el norte del perfil, y que alcanza espesores superiores a 50 m.

6 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

La caracterización hidrológica del sistema piloto de la I Región se realizó mediante la recopilación de datos hidrometeorológicos disponibles en estaciones cercanas. Las variables que se analizaron fueron la precipitación, escurrimientos, temperatura y evaporación.

Los análisis se agruparon considerando dos escalas temporales: nivel horario y diario, donde se incluye principalmente información recopilada desde octubre de 2007 en las estaciones instaladas por el presente convenio PUC-DGA Altiplano; y nivel mensual y anual que utiliza información de estaciones pertenecientes a la DGA y otras fuentes con registros de varios años.

A continuación se presenta una breve descripción del clima de la zona y los resultados de los análisis realizados a las variables meteorológicas en la zona en estudio.

6.1 Climatología de la zona

En las Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá predominan cinco tipos de clima, todos ellos con características desérticas, que varían de acuerdo a su distancia al mar en bandas que van de norte a sur y están fuertemente influidos por la topografía. De mar a cordillera los climas de esta Región se ordenan como sigue (ver Figura 6.1):

- Desértico Cálido con Nublados Abundantes, en la Costa al norte de los 20° S.
- Desértico con Nublados Abundantes, en la Costa al sur de los 20° S (~ Iquique).
- Desértico Normal, en la Cordillera de la Costa y la parte occidental de la Depresión Intermedia (hasta los 2.000 msnm).
- Desértico Frío, en la parte oriental de la Depresión Intermedia (sobre los 2.000 msnm) y la Precordillera.
- Tundra por Efecto de Altura con Precipitación Estival en la Cordillera de los Andes, donde se encuentra casi la totalidad de las cuencas endorreicas.

La cuenca del Salar del Huasco está influida por dos climas, el de Tundra por Efecto de Altura con Precipitación Estival, que también es descrito como clima de Estepa de Altura, y el Desértico Frío o Marginal de Altura. El primero de estos climas ocupa la mitad norte de la cuenca, además de toda la parte oriental, y se caracteriza por presentar temperaturas medias que no superan los 5° C y una amplia oscilación térmica entre el día y la noche. En el Salar del

Huasco las temperaturas mínimas alcanzan los -20° C en los meses de invierno (junio – septiembre).

En este clima, las precipitaciones más importantes ocurren durante las tardes de verano (Diciembre - Marzo), y son de origen convectivo, provenientes del ascenso de masas de aire cargadas de humedad desde la ladera oriente de la Cordillera de los Andes, con origen en la cuenca del Amazonas y el Atlántico. Este fenómeno es conocido como "Invierno Boliviano" y en algunos sectores las precipitaciones superan los 400 mm/año, presentando una disminución hacia el sur. En la zona del Salar del Huasco la precipitación media anual varía entre 100 y 150 mm, dependiendo básicamente de la altura. La humedad relativa es en general baja.

El clima Desértico Frío se presenta sobre los 2.000 msnm y alcanza la parte surponiente del Salar del Huasco. Se caracteriza por presentar precipitaciones en verano, aunque no tan abundantes como en el clima de estepa, pero que permite la subsistencia de una incipiente vegetación. En promedio se ha observado que éstas varían entre 20 y 150 mm al año, dependiendo de la altura, del mismo modo que las temperaturas que en promedio oscilan entre los 4 y los 14 ° C.

Debido a las condiciones geográficas, en el Altiplano chileno la presión atmosférica es aproximadamente un 40% inferior al valor observado a nivel del mar (1.010 hPa, 20° C). La densidad del aire experimenta una disminución del 35% con respecto a los niveles medios registrados a nivel del mar, los que alcanzan un valor de 1,2 kg/m³ (DICTUC, 2005). Así también, existe una alta variabilidad estacional e interanual de las precipitaciones (ciclos muy marcados con años extremadamente húmedos y otros años extremadamente secos); existe una muy baja humedad relativa del aire y alta radiación solar (Collahuasi - GP Consultores, 2005) y también se evidencia fuerte y constante viento que se levanta especialmente al medio día, en cualquier época del año y con velocidades que pueden superar los 60 km/h (Acosta, 2004).



Fuente: [Modificado de IGM]

Figura 6.1: Climas de las Regiones XV, I, II y III de Chile

6.2 Análisis de Precipitaciones

En el sistema piloto de la cuenca del Salar del Huasco (I Región) se dispone de 3 estaciones pluviométricas instaladas con el convenio PUC-DGA. Además se seleccionaron 5 estaciones cercanas de la DGA y se dispone de estadística de precipitación en 6 estaciones pertenecientes a la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC). De las 14 estaciones disponibles 4 se encuentran dentro del sistema piloto. La Tabla 6.1 presenta la ubicación y altitud de estas estaciones, y en la Figura 6.2 se presentan en forma gráfica.

		-				
N°	Fuente	Código BNA	Estación Pluviométrica	UTM (PS	SAD 1956)	Altitud
				Este	Norte	[msnm]
1 *	PUC-DGA		Huasco en Sillillica	527.391	7.769.899	4.270
2 *	PUC-DGA		Huasco en Alto del Huasco	511.186	7.752.919	3.874
3 *	PUC-DGA		Huasco en Diablo Marca	503.293	7.776.982	4.603
4	DGA	01042001-6	Cancosa	538.377	7.797.670	3.800
5	DGA	01042002-4	Huaytani	540.213	7.788.242	3.720
6 *	DGA	01050007-9	Collacagua	517.429	7.782.949	3.990
7	DGA	01730016-4	Pampa Lirima	510.470	7.805.086	3.940
8	DGA	01730018-0	Lagunillas (Pampa Lirima)	515.706	7.805.083	3.940
9	CMDIC		Coposa	535.914	7.697.202	3.855
10	CMDIC		Rosario	533.065	7.680.751	4.731
11	CMDIC		Salar Michincha	546.649	7.680.511	4.131
12	CMDIC		Pampa Ujina	541.679	7.681.441	4.179
13	CMDIC		Salar Coposa	530.540	7.713.468	3.756
14	CMDIC		Mina Ujina	537.736	7.679.339	4.400

Tabla 6.1: Estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Regi	ón.
--	-----

* Estaciones ubicadas al interior de la cuenca del sistema piloto



Figura 6.2: Estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

6.2.1 Información Disponible

Las estaciones PUC-DGA fueron instaladas en octubre de 2007 por lo que se cuenta con aproximadamente un año de estadísticas de precipitación a nivel horario y diario. En cambio, en las estaciones pertenecientes a la DGA y CMDIC se disponen de series más extensas de precipitación a nivel diario, mensual y anual. La Tabla 6.2 presenta un resumen del número de años con información completa para la serie rellenada y vigencia de las estaciones seleccionadas. En las estaciones de la DGA la estadística original a nivel mensual fue rellenada se acuerdo a la metodología presentada en la Parte III de este estudio (Hidrología Regional del Altiplano). No se rellenaron las estadísticas a nivel horario y diario en ninguna estación.

La disponibilidad de la estadística de precipitación se presenta en la Figura 6.3 Se observa que la estadística de las estaciones de la DGA a nivel mensual y anual se inicia en la década de 1960 y llega solo hasta el año hidrológico 2006-2007, sin embargo se recopilaron datos a nivel diario hasta julio de 2008. En las estaciones CMDIC la estadística de precipitaciones se inicia a partir de 1996 y se dispone de datos hasta el año hidrológico 2007-2008. La disponibilidad de datos a nivel mensual en las estaciones PUC-DGA se presenta en la Figura 6.4.

N°	Fuente	Código BNA	Estación Pluviométrica	Altitud	Estado	Años
				[msnm]	**	Completos
1 *	PUC-DGA		Huasco en Sillillica	4.270	V	1
2 *	PUC-DGA		Huasco en Alto del Huasco	3.874	V	0
3 *	PUC-DGA		Huasco en Diablo Marca	4.603	V	0
4	DGA	01042001-6	Cancosa	3.800	V	26
5	DGA	01042002-4	Huaytani	3.720	V	22
6 *	DGA	01050007-9	Collacagua	3.990	V	41
7	DGA	01730016-4	Pampa Lirima	3.940	S	24
8	DGA	01730018-0	Lagunillas (Pampa Lirima)	3.940	V	26
9	CMDIC		Coposa	3.855	V	5
10	CMDIC		Rosario	4.731	S	1
11	CMDIC		Salar Michincha	4.131	S	2
12	CMDIC		Pampa Ujina	4.179	S	3
13	CMDIC		Salar Coposa	3.756	V	2
14	CMDIC		Mina Ujina	4.400	S	5

Tabla 6.2: Vi	gencia y a	años de	registro	en las	estaciones	pluviométricas	seleccionadas	para (el
sistema piloto	de la I Re	egión.							

* Estaciones ubicadas al interior del sistema piloto

** V: Vigente; S: Suspendida



Figura 6.3: Disponibilidad de datos de precipitación de la serie original y rellenada en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

Nº ESTACIÓN		2008										2009							
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	
1 Huasco en Sillillica																			
2 Huasco en Alto del Huasco																			
3 Huasco en Diablo Marca	3 Huasco en Diablo Marca																		

: Mes con información completa : Mes con más de 20 días con información : Mes con 10 a 20 días con información : Mes con menos de 10 días de información

Figura 6.4: Disponibilidad de datos de precipitación mensual en las estaciones PUC-DGA del sistema piloto de la I Región

6.2.2 Variación Temporal de la Precipitación

En esta sección se analiza el comportamiento temporal de la precipitación anual y la estacionalidad de la precitación media mensual en las estaciones seleccionadas. Además se ajustó la precipitación diaria a un modelo de Markov de dos estados: seco y lluvia, obteniendo las probabilidades de transición entre estados y la probabilidad de permanencia en un estado durante k días, para los distintos meses del año. Finalmente se determinaron las probabilidades empíricas de que ocurra precipitación a una determinada hora del día.

6.2.2.1 Análisis de la Precipitación Anual y Mensual

Para las estaciones PUC-DGA en la I Región se dispone de aproximadamente de un año de estadística de precipitación entre noviembre de 2007 y febrero de 2009, en las estaciones CMDIC se dispone entre 3 y 9 años de registro, y en las estaciones DGA se dispone de más de

20 años de registro. Por consiguiente, solamente con los datos de las estaciones DGA es posible obtener estadígrafos sobre el comportamiento de largo plazo de la precipitación anual y mensual en la zona. En cambio los registros de las estaciones CMDIC y PUC-DGA solamente permiten establecer el comportamiento puntal de la precipitación, especialmente en la estación Huasco en Sillillica (PUC-DGA) donde se dispone solamente del registro completo para el año hidrológico 2007-2008.

En la Figura 6.5 y Figura 6.6 se presentan las series de precipitación anual para el año hidrológico en las estaciones DGA y CMDIC, respectivamente. Se observa que las series de las estaciones DGA presentan años húmedos donde la precipitación supera los 250 mm, y años secos donde la precipitación no alcanza los 5 mm. Además, se nota la presencia de tormentas importantes especialmente en los años 1983 y 2000. Lo registros de precipitación en las estaciones CMDIC muestran valores que superan los 50 mm. Sin embargo estos registros son cortos y no permiten observar el comportamiento de largo plazo en la zona.



5. Huaytani









Figura 6.5: Series de precipitación media anual (año hidrológico) en las estaciones DGA seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.















Figura 6.6: Series de precipitación media anual en las estaciones CMDIC seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

La Tabla 6.3 presenta la precipitación media anual en las estaciones seleccionadas para el año hidrológico (Oct-Sep). Sin embargo, para las estaciones PUC-DGA este valor corresponde a la precipitación caída entre noviembre de 2007 y octubre de 2008. De estas estaciones, solamente Huasco en Sillillica tiene el registro completo para este período de tiempo.

Se observa que en las estaciones de la DGA y CMDIC el coeficiente de asimetría es positivo indicando que la mayoría de registros están concentrados más cerca del valor mínimo que del valor máximo, a excepción de la estación Pampa Ujina. El coeficiente de variación, desviación típica sobre el promedio, varía entre 0,16 y 0,89.

N°	Estación Pluviométrica	Años Completos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.	Coef. Var.
1 :	* Huasco en Sillillica	1	151,9	151,9	151,9	-	-	-
2	* Huasco en Alto del Huasco	0	-	-	-	-	-	-
3	* Huasco en Diablo Marca	0	-	-	-	-	-	-
4	Cancosa	26	17,0	466,7	174,7	117,8	0,65	0,67
5	Huaytani	22	4,0	477,0	132,4	117,8	1,51	0,89
6	 Collacagua 	41	28,8	365,0	138,1	80,3	0,94	0,58
7	Pampa Lirima	24	32,7	271,2	115,5	62,8	1,15	0,54
8	Lagunillas (Pampa Lirima)	26	45,0	329,7	138,6	76,4	1,10	0,55
9	Coposa	5	47,8	135,6	81,0	34,1	1,22	0,42
10	Rosario	1	110,7	110,7	110,7	-	-	-
11	Salar Michincha	2	61,2	78,1	69,7	12,0		0,17
12	Pampa Ujina	3	75,7	147,8	123,3	41,3	-1,73	0,33
13	Salar Coposa	2	73,8	93,0	83,4	13,6	-	0,16
14	Mina Ujina	5	73,4	292,8	141,1	88,1	1,84	0,62

Tabla 6.3: Propiedades estadísticas de las series de precipitación media anual (mm) para el año hidrológico (Oct-Sep) en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

* Estaciones ubicadas al interior de las cuencas del sistema piloto



Figura 6.7: Precipitación media anual en las estaciones seleccionadas. El valor presentado para las estaciones PUC-DGA corresponde al año hidrológico (2007-2008).

En la Figura 6.7 se presenta la precipitación anual en las estaciones PUC-DGA, DGA y CMDIC ordenadas de norte a sur. Se observa que el agua caída en la estación Huasco en Sillillica (PUC-DGA) entre noviembre de 2007 y octubre de 2008 es similar a la precipitación media registrada históricamente en las estaciones DGA y CMDIC.

La Figura 6.8 presenta la precipitación mensual entre noviembre de 2007 y octubre de 2008 en la estación Huasco el Sillillica (PUC-DGA) ordenada de acuerdo al año hidrológico (Oct-Sep). En la Figura 6.9 se presenta la precipitación media mensual en las estaciones de la DGA junto con las probabilidades empíricas de excedencia del 15% y 85%. La Figura 6.10 presenta la precipitación media mensual en las estaciones CMDIC.



Figura 6.8: Series de precipitación mensual para el período Noviembre 2007 – Octubre 2008, ordenada para el año hidrológico (Oct-Sep), en las estación Huasco el Sillillica (PUC-DGA) de la I Región.



Figura 6.9: Series de precipitación media mensual y probabilidades de excedencia empíricas del 15% y 85% en las estaciones DGA seleccionadas.

Ago I

Sep

Jul

20 0

Mar I

May Jun

 Abr

Feb .

Ene

Nov Dic

Oct



Figura 6.10: Series de precipitación media mensual en las estaciones CMDIC.

En la estación Huasco en Sillillica (PUC-DGA) la mayor precipitación se registró en enero de 2008. En las estaciones DGA la mayor precipitación media y con probabilidad de excedencia de 15% ocurre en enero. Sin embargo, en el mes de febrero la magnitud de la precipitación es similar a la de enero. En las estaciones CMDIC se observa un comportamiento similar al de las estaciones DGA. Sin embargo, la precipitación media mensual máxima ocurre en el mes de enero en la estación Pampa Ujina.

En la Tabla 6.4 se presenta la distribución estacional de la precipitación para las estaciones seleccionadas, dividida entre los periodos Diciembre - Marzo y Abril - Noviembre. En la estación Huasco en Sillillica (PUC-DGA) más del 90% de la precipitación para el año

hidrológico 2007-2008 ocurrió en el período Diciembre - Marzo. En las estaciones DGA y CMDIC ocurre algo similar concentrándose más del 70% de la precipitación anual en el período Diciembre - Marzo. Por consiguiente, se evidencia que el comportamiento de las precipitaciones en el sistema piloto de la I Región está influenciado por el denominado invierno boliviano.

N°		Fuente	Estación	Diciembre -	Marzo	Abril - No	viembre
				[mm]	%	[mm]	%
1	*	PUC-DGA	Huasco en Sillillica	138,5	91,2	13,4	8,8
4		DGA	Cancosa	150,9	91,4	14,2	8,6
5		DGA	Huaytani	126,5	89,8	14,4	10,2
6	*	DGA	Collacagua	128,9	92,0	11,2	8,0
7		DGA	Pampa Lirima	108,1	90,9	10,8	9,1
8		DGA	Lagunillas (Pampa Lirima)	129,3	93,5	9,0	6,5
9		CMDIC	Coposa	99,8	72,2	38,5	27,8
10		CMDIC	Rosario	125,2	97,6	3,1	2,4
11		CMDIC	Salar Michincha	74,5	92,6	5,9	7,4
12		CMDIC	Pampa Ujina	214,3	93,5	14,8	6,5
13		CMDIC	Salar Coposa	76,2	93,9	4,9	6,1
14		CMDIC	Mina Ujina	108,5	90,0	12,1	10,0

Tabla 6.4: Precipitación estacional en las estaciones seleccionadas de la I Región.

* Estaciones ubicadas al interior de las cuencas del sistema piloto

6.2.2.2 Análisis de la Precipitación Diaria

Se recopilaron datos de precipitación a nivel diario en las estaciones seleccionadas. En las estaciones PUC-DGA se dispone de información de este tipo entre noviembre de 2007 y febrero de 2009. En las estaciones DGA y CMDIC se dispone de datos de precipitación a nivel diario según se muestra en la Figura 6.3.

En la Figura 6.12 se presentan los hietogramas de precipitación diaria en las estaciones seleccionadas entre noviembre de 2007 y octubre de 2008. La Figura 6.13 presenta la variación de la magnitud de la precipitación diaria para este período de tiempo en las estaciones seleccionadas. Se observa que la mayoría de las tormentas registradas ocurren simultáneamente en toda la zona que cubren las estaciones seleccionadas. Este comportamiento es marcado especialmente en enero de 2008, donde ocurrió una cantidad importante de tormentas. Sin embargo, llama la atención que algunas tormentas que fueron registradas en Huasco en Sillilica durante enero de 2008, marcaron un nivel de 0 mm en la

estación Collacagua a pesar de que estas dos estaciones están separadas 16,4 km y localizadas en la misma cuenca.

La precipitación diaria se ajustó a un modelo de Markov de dos estados: seco (S) y lluvia (P), donde cada estado tiene dos transiciones posibles. Un esquema de este modelo se presenta en la Figura 6.11. Con los datos recopilados en las estaciones seleccionadas se determinaron las probabilidades empíricas de estar en un estado y las de transición entre estados: p_{11} , p_{12} , p_{21} . p_{22} . Siendo p_{ij} la probabilidad de transición del estado *i* a *j*, donde el estado 1 corresponde a Seco (S) y el 2 a Lluvia (P). La Figura 6.14 a la Figura 6.17 presentan en forma gráfica estas probabilidades para cada uno de los meses del año, en las estaciones ubicadas al interior del sistema piloto de la I Región. Para el resto de estaciones estas figuras se presentan en el ANEXO I (AI.1).



Figura 6.11: Esquema del modelo de Markov para la precipitación diaria. El estado 1 corresponde a Seco (S) y el 2 a Lluvia (P).



Figura 6.12: Hietogramas en las estaciones seleccionadas de la I Región para el período Nov. 2007 – Feb. 2009.



Figura 6.12: Hietogramas en las estaciones seleccionadas de la I Región para el período Nov. 2007 – Feb. 2009. (Continuación)



Figura 6.12: Hietogramas en las estaciones seleccionadas de la I Región para el período Nov. 2007 – Feb. 2009. (Continuación)

				ES	TAC	IÓN				1					ES	TAC	ÓN				
	_	D	GA	•	PL	JC-D	GA	CM	DIC			_	D	GA	•	PU	IC-D	GA	CM	DIC	
Noviembre 2007	8	4	5	6	3	1	2	13	9		Julio-2008	8	4	5	6	3	1	2	13	9	
Diciembre 2007											Agosto-2008										
Enero 2008											Septiembre-2008										Precipitación diaria (mm) 15 - 20 10 - 15 5 - 10 0 - 5 0 Sin registro
Febrero 2008											Octubre-2008										
Marzo 2008											Noviembre-2008										
Abril-2008											Diciembre-2008										
Mayo-2008											Enero-2009										
Junio-2008											Febrero-2009										

Figura 6.13: Registro simultáneo de la magnitud de precipitación diaria en las estaciones seleccionadas (ordenadas de norte a sur) para el período Nov. 2007 – Feb. 2009.



Probabilidades Empíricas de Transición



Figura 6.14: Probabilidades de estar en estado seco (S) y lluvia (P), y probabilidades de transición entre estados para la estación Huasco en Sillillica.







Figura 6.15: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Huasco en Altos del Huasco.

Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado



Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado

Probabilidades de Empíricas de Transición



Figura 6.16: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Huasco en Diablo Marca.



Probabilidades Empíricas de Transición



Figura 6.17: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Collacagua.
Los resultados presentados en Figura 6.14 a la Figura 6.17 y en el ANEXO I (AI.1) muestran que en los meses de enero, febrero y marzo existe mayor probabilidad de estar en estado de lluvia, alcanzando valores de hasta 40% como en la estación Huasco en Sillillica. Sin embargo, entre los meses de mayo y octubre la probabilidad de lluvia no supera el 2%. En las tres estaciones DGA, donde se dispone de más de 20 años de registro, la probabilidad de lluvia alcanza el 30% entre diciembre y marzo, siendo enero el mes con mayor probabilidad de lluvia. No obstante, esta probabilidad no supera el 2% entre abril y noviembre. En las estaciones PUC-DGA, DGA y CMDIC, la probabilidad de transición de seco a lluvia alcanza el 17% entre diciembre y marzo, pero no supera el 2% entre abril y noviembre.

En la Figura 6.18 a la Figura 6.21 y en el ANEXO I (AI.2) se presentan las probabilidades de permanencia en un estado durante k días, para los distintos meses del año. Se observa que en los meses donde se producen eventos de precipitación la curva de probabilidades de permanencia parte en un valor igual a la probabilidad de estar en un estado y luego decrece a medida que aumenta el número de días de permanencia. En cambio, en los meses donde no se produce precipitación, las probabilidades de permanencia se mantienen constantes.



Figura 6.18: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Huasco en Sillillica.



Figura 6.19: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Huasco en Alto del Huasco.



Figura 6.20: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Huasco en Diablo Marca.



Figura 6.21: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Collacagua.

6.2.2.3 Análisis de la Precipitación Horaria

Se dispone de registros de precipitación a nivel horario en las estaciones PUC-DGA entre noviembre de 2007 y febrero de 2009, y en las estaciones CMDIC entre enero de 2005 y septiembre de 2008. Con estos datos se calculó la probabilidad empírica de lluvia a una

determinada hora para los distintos meses del año, los cuales se presentan en forma gráfica en la Figura 6.22 a la Figura 6.24 para las estaciones PUC-DGA, y en el ANEXO I (AI.3) para las estaciones CMDIC. Los valores de estas probabilidades agrupados en tramos de 6 horas se presentan en la Tabla 6.5 y Tabla 6.6 para las estaciones PUC-DGA y CMDIC, respectivamente, destacándose los valores diferentes de cero.

En las estaciones PUC-DGA se observa que en los meses en que ocurre precipitación la mayor probabilidad de lluvia se da entre las 12:00 y las 18:00. En las estaciones CMDIC ocurre un comportamiento similar, existiendo mayor probabilidad de lluvia entre las 12:00 y 18:00, lo cual es más evidente en los meses de enero, febrero y marzo. Además, en estos meses la probabilidad de lluvia es mayor que cero para todas las horas del día.

Horas	20	07						20	08						20	09
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb
						Hua	sco en	Sillill	ica							
00:00-06:00	0,03	0,00	0,32	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
06:00-12:00	0,03	0,00	0,19	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
12:00-18:00	0,03	0,06	0,45	0,14	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,10	0,10
18:00-00:00	0,00	0,00	0,39	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,10	0,00
					Н	luasco	en Alt	o del H	Huasco)						
00:00-06:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00								0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00								0,07	0,00	0,00
12:00-18:00	0,03	0,00	0,15	0,07	0,13	0,00								0,20	0,03	0,00
18:00-00:00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00								0,06	0,06	0,00
]	Huasco	o en D	iablo N	Aarca							
00:00-06:00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00							0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,03	0,00		0,03	0,00	0,00	0,00							0,07	0,03	0,10
12:00-18:00	0,03	0,00		0,14	0,19	0,00	0,00							0,19	0,19	0,11
18:00-00:00	0,00	0,00		0,03	0,03	0,00	0,00							0,06	0,00	0,00

Tabla 6.5: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en las estaciones PUC-DGA.

Horas						Mes	ses					
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
					Соро	sa						
00:00-06:00	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
06:00-12:00	0,06	0,02	0,04	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
12:00-18:00	0,27	0,20	0,16	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,06
18:00-00:00	0,19	0,11	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
					Rosa	rio						
00:00-06:00	0,10	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,25	0,14	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02
12:00-18:00	0,37	0,25	0,09	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,09
18:00-00:00	0,20	0,12	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				S	alar Mic	hincha						
00:00-06:00	0,09	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,20	0,07	0,00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12:00-18:00	0,31	0,13	0,13	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
18:00-00:00	0,19	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
					Pampa V	Ujina						
00:00-06:00	0,03	0,05	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,11	0,07	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
12:00-18:00	0,14	0,12	0,07	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
18:00-00:00	0,08	0,07	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
					Salar Co	oposa						
00:00-06:00	0,08	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,22	0,13	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02
12:00-18:00	0,34	0,23	0,09	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,07
18:00-00:00	0,18	0,11	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
					Mina U	Jjina						
00:00-06:00	0,07	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,14	0,07	0,00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12:00-18:00	0,24	0,13	0,13	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
18:00-00:00	0,15	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 6.6: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en las estaciones CMDIC.



Figura 6.22: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Huasco en Sillillica.



Figura 6.22: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Huasco en Sillillica. (Continuación)



Figura 6.23: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Huasco en Alto del Huasco.



Figura 6.24: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Huasco en Diablo Marca.

6.2.3 Variación Espacial de la Precipitación

En esta sección se analiza la variación espacial de la precipitación, en función de la altitud de las estaciones pluviométricas seleccionadas. Se presenta el mapa de isoyetas característico de la cuenca del sistema piloto.

6.2.3.1 Gradiente de Precipitación Media Anual

El gradiente de precipitación con la altitud se definió en términos de la precipitación media anual para el año hidrológico (Octubre-Septiembre), ya que normalmente se acepta que ésta representa razonablemente la cantidad de recursos hídricos provenientes de la atmósfera en el largo plazo.

La Figura 6.25 presenta la variación de la precipitación media anual en las estaciones de la I Región y que fueron seleccionadas en la Parte III de este estudio (Hidrología Regional del Altiplano). Además se colocaron las estaciones PUC-DGA, DGA y CMDIC seleccionadas para el análisis del sistema piloto. De acuerdo a la hidrología regional, en la I Región se estimó un gradiente de 3,5 mm cada 100 m de altitud entre los 2.000 y 3.000 msnm, el que aumenta a cerca de 20 mm por cada 100 m sobre los 3.000 msnm.

Se observa que la precipitación en el único año de registro con que se cuenta en la estación Huasco en Sillillica (PUC-DGA) no sigue la tendencia del gradiente obtenido en el estudio hidrológico regional. Sin embargo, al analizar el comportamiento de esta estación en conjunto con la estaciones DGA y CMDIC seleccionadas para el sistema piloto es posible obtener un gradiente de 18 mm por cada 100 m de altitud, similar al obtenido en el estudio regional.



Figura 6.25: Comparación de la variación de la precipitación media anual con la altitud en las estaciones DGA de la I Región y en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto.

6.2.3.2 Isoyetas en el Sistema Piloto

Las isoyetas o líneas de isoprecipitación sobre el sistema piloto corresponden a las isoyetas regionales obtenidas en la Parte III de este estudio (Hidrología Regional del Altiplano). Estas líneas se obtuvieron mediante la interpolación espacial de las precipitaciones medias anuales para el año hidrológico luego de realizar el relleno de los datos faltantes. Inicialmente se trazaron isoyetas utilizando el programa Surfer V7.0 (1999, Golden Software), las que fueron luego corregidas en base a la topografía y a los gradientes de la precipitación con la altura. En la Figura 6.26 se presentan estas isoyetas para el sistema piloto de la I Región. Se incluyen los valores de la precipitación media anual en las estaciones seleccionadas



Figura 6.26: Mapa de isoyetas en la zona del sistema piloto de la I Región.

6.2.4 Variación Espacio-Temporal de la Precipitación

A continuación se analiza el comportamiento espacio-temporal conjunto de la precipitación en las estaciones DGA. Para ello se analiza en cada estación el valor de la probabilidad de excedencia de la precipitación anual registrada en cada año $(q_{ij} = \text{Prob}\{P_{ij} > p_j\})$. Donde P_{ij} es la precipitación registrada en el año *i* en la estación *j*, p_j es la precipitación en la estación *j* que tiene probabilidad de excedencia *q*, y q_{ij} es la probabilidad de excedencia de la precipitación observada al año *i* en la estación *j*. Estos valores fueron agrupados en cuatro categorías y graficados según se muestra en la Figura 6.27. Se observa en general que en las dos estaciones DGA seleccionadas el comportamiento espacial es más uniforme que el temporal. Los años húmedos o muy húmedos se tienden a presentarse simultáneamente. Un comportamiento similar se observa en los años secos o muy secos.



Figura 6.27: Valores clasificados de q_{ij} para la precipitación anual en las estaciones DGA ordenadas de norte a sur.

6.3 Análisis de Escurrimientos

En el sistema piloto de la cuenca del Salar del Huasco (I Región) se dispone de tres estaciones fluviométricas pertenecientes a la DGA. La Tabla 6.7 presenta la ubicación y altitud de estas estaciones, y en la Figura 6.28 se presenta su ubicación en forma gráfica.

N°	Fuente	Código BNA	Est. Fluviométrica	UTM (PS	AD 1956)	Altitud
				Este	Norte	[msnm]
1	DGA	01050002-8	Río Piga en Collacagua	517.668	7.784.666	3.970
2	DGA	01050003-6	Río Batea en Confluencia	517.545	7.783.696	3.970
3	DGA	01050004-4	Río Collacagua en Peñablanca	516.629	7.776.086	3.900

Tabla 6.7. Estaciones fluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.



Figura 6.28: Estaciones fluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

6.3.1 Información Disponible

Las estaciones seleccionadas fueron instaladas a finales de la década de 1960 (Río Piga en Collacagua) y a finales de la década de 1970 (Río Batea en Confluencia y Río Collacagua en Peñablanca). En estas estaciones se disponen de estadísticas a nivel diario, mensual y anual. La Tabla 6.8 presenta un resumen del número de años con registro de información y vigencia de las estaciones fluviométricas seleccionadas.

La disponibilidad de la estadística de caudales se presenta en la Figura 6.29 para el año hidrológico (Octubre-Septiembre). Se observa que la estadística de las estaciones seleccionadas a nivel mensual y anual llega solo hasta el año hidrológico 2006-2007. Además se recopilaron estadísticas a nivel diario cuya disponibilidad se presenta en la Tabla 6.9.

Tabla 6.8: Vigencia y años de registro en las estaciones fluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

N°	Fuente	Código BNA	Estación Fluviométrica	Altitud	Estado	Años de
				[msnm]	**	Registro
1	DGA	01050002-8	Río Piga en Collacagua	3.970	V	43
2	DGA	01050003-6	Río Batea en Confluencia	3.970	V	27
3	DGA	01050004-4	Río Collacagua en Peñablanca	3.900	V	26

** V: Vigente; S: Suspendida



Figura 6.29: Disponibilidad de datos de caudal en las estaciones seleccionadas para el año hidrológico en el sistema piloto de la I Región.

Tabla 6.9	: Dis	ponibilidad	de d	datos	de	caudal	medio	diario	en 1	as estaci	ones	selecci	onadas
1 abia 0.7	· DIS	pomoniuau	uc	ualos	uc	caudai	meulo	ulailo	CII I	as colaci	ones	SCICCU	onauas.

N°	Estación Fluviométrica	Disponi	bilidad	Años de
		Desde	Hasta	Registro
1	Río Piga en Collacagua	Nov-1959	Ene-2008	44
2	Río Batea en Confluencia	Sep-1980	Ene-2008	28
3	Río Collacagua en Peñablanca	Feb-1981	Ene-2008	27

6.3.2 Variación Temporal de los Escurrimientos

En esta sección se analiza el comportamiento temporal del caudal medio anual y la estacionalidad del caudal medio mensual y medio diario en las estaciones seleccionadas.

6.3.2.1 Análisis del Gasto Medio Anual y Mensual

En la Figura 6.30 se presentan las series de caudal medio anual para el año hidrológico en las estaciones seleccionadas. En las estaciones Río Piga en Collacagua y Río Collacagua en Peñablanca la mayor parte del tiempo el caudal medio anual se mantiene alrededor de 0,1 m³/s. Sin embargo se observan crecidas puntuales, destacándose la de los años 1984, 1985, 2000 y 2006. El caudal medio anual máximo registrado en Río Piga en Collacagua es de 0.22 m³/s en el año hidrológico 2000-2001, y en Río Collacagua en Peñablanca de 0,47 m³/s en el año hidrológico 2006-2007. Por otra parte, en la estación Río Batea en Confluencia el registro de caudal medio anual se mantiene alrededor de 0,02 m³/s, sin notarse la presencia de crecidas.



Figura 6.30: Series de caudal medio anual para l año hidrológico (Oct-Sep) en las estaciones fluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

La Tabla 6.10 presenta los principales estadígrafos de las series anuales de escurrimientos. Se observa que el caudal promedio en las estaciones seleccionadas varia entre 0,13 y 0,20 m³/s. El coeficiente de variación, desviación típica sobre el promedio, es igual a 0,20 para las tres estaciones seleccionadas.

N°	Estación Fluviométrica	Años de Registro	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.	Coef. Var.
1	Río Piga en Collacagua	43	0,08	0,22	0,13	0,03	1,29	0,20
2	Río Batea en Confluencia	28	0,00	0,03	0,02	0,01	-0,96	0,20
3	Río Collacagua en Peñablanca	27	0,10	0,47	0,20	0,09	1,41	0,20

Tabla 6.10: Propiedades estadísticas de las series de caudales anuales (m^3/s) para el año hidrológico en las estaciones seleccionadas.

La Figura 6.31 presenta los caudales medios mensuales junto con los caudales con probabilidades empíricas de excedencia del 15% y 85% en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la I Región. Se observa que el caudal medio mensual en las tres estaciones seleccionadas no varía significativamente a lo largo de los meses del año. En las estaciones Río Piga en Collagua y Río Collacagua en Peñablanca el caudal máximo se registra en el mes de junio, y en la estación Río Batea en Confluencia en el mes de febrero.









Figura 6.31: Caudal medio mensual y caudales asociados a probabilidades de excedencia de 15% y 85% (m^3/s) en las estaciones seleccionadas.





6.3.2.2 Análisis del Gasto Medio Diario

Se elaboraron diagramas tipo Box-Whisker con los cuartiles de las series de caudal medio diario en las estaciones seleccionadas para los distintos meses del año. Estos diagramas se presentan en la Figura 6.32. Se observa que en cada estación la mediana de los caudales no presenta mayores variaciones a lo largo de los distintos meses del año. Sin embargo, el caudal máximo presenta importantes cambios notándose los meses en los que se producen las crecidas.

En la estación Río Piga en Collacagua la mediana del caudal medio diario se mantiene alrededor de $0,13 \text{ m}^3$ /s en todos los meses del año. El caudal máximo alcanza un valor de 2,4 m³/s en el mes de enero, siendo los meses de enero, febrero, marzo y abril donde se registran los caudales máximos. En estos meses, el rango existente entre el caudal máximo y la mediana es del orden de 1,7 m³/s, siendo marcada la diferencia con el rango existente en el resto de meses del año, donde es del orden de 0,17 m³/s. Los caudales mínimos nunca descienden de 0,01 m³/s en los meses del año.

En la estación Río Batea en Confluencia la mediana del caudal medio diario es del orden de $0,02 \text{ m}^3$ /s en todos los meses del año. Los caudales máximos se producen en los meses de enero, febrero y marzo, alcanzado un valor de $0,08 \text{ m}^3$ /s en el mes de febrero. Para el resto de meses del año el caudal máximo tiende a mantenerse en del orden de los $0,05 \text{ m}^3$ /s. Por otra parte, los caudales mínimos registrados alcanzan valores iguales a cero en todos los meses.

En la estación Río Collacagua en Peñablanca la mediana del caudal medio diario es del orden de 0,15 m³/s en todos los meses del año. Los caudales máximos se producen en los meses de febrero, septiembre y diciembre, alcanzado un valor de 2,78 m³/s en el mes de septiembre. Para el resto de meses del año el caudal máximo tiende a mantenerse en del orden de los 1,0 m³/s. Por otra parte, los caudales mínimos registrados alcanzan valores alrededor de 0,04 m³/s.

1. Rio Piga en Collacagua



2. Rio Batea en Confluencia



3. Rio Collacagua en Peñablanca



Figura 6.32: Cuartiles $(Q_1, Q_2 \ y \ Q_3)$ de los caudales medios diarios en las estaciones seleccionadas.

6.3.3 Variación Espacio-Temporal de los Escurrimientos

Se realizó un análisis del comportamiento espacio-temporal conjunto de los escurrimientos, determinándose en cada estación el valor de la probabilidad de excedencia del caudal medio registrado en cada año ($q_{ij} = \text{Prob}\{Q_{ij} > q_j\}$). Siendo Q_{ij} el caudal medio registrado en el año *i* en la estación *j*, q_j es el caudal con probabilidad de excedencia *q*, y q_{ij} es la probabilidad de excedencia del caudal observado en la estación *i* en la estación *j*. Estos valores fueron agrupados en cuatro categorías y graficados según se muestra en la Figura 6.27. En general se aprecia que el comportamiento espacial es más uniforme que el temporal. Los años húmedos o muy húmedos tienden a presentarse simultáneamente en la todas las estaciones. Algo similar ocurre los años secos o muy secos.



Figura 6.33: Valores clasificados de q_{ij} para el caudal medio anual en las estaciones seleccionadas ordenadas de norte a sur.

6.4 Análisis de Temperatura y Evaporación de Tanque

La información de temperatura y evaporación de tanque en la cuenca del sistema piloto de la I Región es escasa. Al interior de la cuenca del Salar del Huasco se dispone solamente de una estación perteneciente a la DGA que registra temperatura y evaporación, y dos estaciones instaladas con el convenio PUC-DGA que registran temperatura. Complementariamente, en la Parte III de este estudio: Hidrología Regional del Altiplano, se presenta un análisis de la variación de la temperatura media absoluta y evaporación de tanque con la latitud y gradientes con la altura para las Regiones XV, I, II y III. A continuación se presentan resultados de estos análisis acotados a la zona en la que se ubican la cuenca del sistema piloto de la I Región. Se incluye además el análisis de datos de temperatura proporcionados por la Compañía Minera Dona Inés de Collahuasi (CMDIC) en estaciones cercanas al Salar del Huasco.

6.4.1 Análisis de Temperatura

En la cuenca del Salar del Huasco que forma parte del sistema piloto de la I Región se dispone de dos estaciones meteorológicas instaladas con el convenio PUC-DGA y que registran datos de temperatura. Además se seleccionaron dos estaciones meteorológicas de la DGA y se disponen de registros en 6 estaciones pertenecientes a la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC). De las 10 estaciones seleccionadas 3 se encuentran al interior de la cuenca del Salar del Huasco. La Tabla 6.11 presenta la ubicación y altitud de estas estaciones, y en la Figura 6.34 se presentan en forma gráfica. Se disponen de series de temperatura media absoluta, mínima promedio, mínima absoluta, máxima promedio y máxima absoluta.

Tabla 6.11: Estaciones meteorológicas con registros de temperatura seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

N°	Fuente	Código BNA	Estación Meteorológica	UTM (PS	SAD 1956)	Altitud
				Este	Norte	[msnm]
1 *	PUC-DGA		Huasco en Alto del Huasco	511.186	7.752.919	3.874
2 *	PUC-DGA		Huasco en Diablo Marca	503.293	7.776.982	4.603
3 *	DGA	01050007-9	Collacagua	517.429	7.782.949	3.990
4	DGA	01080001-3	Ujina	536.384	7.681.472	4.200
5	CMDIC		Coposa	535.914	7.697.202	3.855
6	CMDIC		Rosario	533.065	7.680.751	4.731
7	CMDIC		Salar Michincha	546.649	7.680.511	4.131
8	CMDIC		Pampa Ujina	541.679	7.681.441	4.179
9	CMDIC		Salar Coposa	530.540	7.713.468	3.756
10	CMDIC		Mina Ujina	537.736	7.679.339	4.400

* Estaciones ubicadas al interior de la cuenca del sistema piloto



Figura 6.34: Estaciones meteorológicas de temperatura seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

6.4.1.1 Información Disponible

Las estaciones PUC-DGA fueron instaladas en octubre de 2007 por lo que se cuenta con aproximadamente un año de estadísticas de temperatura. En cambio, en las estaciones pertenecientes a la DGA y CMDIC se disponen de series de temperatura más extensas. La Tabla 6.12 presenta un resumen del número de años con registro de información y vigencia de las estaciones seleccionadas. La disponibilidad de la estadística de temperatura se presenta en la Figura 6.35. Se observa que la estadística de las estaciones de la DGA a nivel mensual y anual se inicia en la década de 1960 y llega solo hasta el año 2007. En las estaciones CMDIC la estadística de precipitaciones se inicia a partir de 1997 y se dispone de datos hasta el año 2005. La disponibilidad de datos a nivel mensual en las estaciones PUC-DGA se presenta en la Figura 6.36.

Tabla 6.12:	Vigencia	y años	de	registro	en la	as	estaciones	meteorológicas	con	registros	de
temperatura	selecciona	das par	a el	sistema	piloto) d	e la I Regió	ón.			

N°	Fuente	Código BNA	Estación Meteorológica	Altitud	Estado	Años de
				[msnm]	**	Registro
1 *	PUC-DGA		Huasco en Alto del Huasco	3.874	V	1
2 *	PUC-DGA		Huasco en Diablo Marca	4.603	V	1
3 *	DGA	01050007-9	Collacagua	3.990	V	47
4	DGA	01080001-3	Ujina	4.200	S	11
5	CMDIC		Coposa	3.855	V	9
6	CMDIC		Rosario	4.731	S	3
7	CMDIC		Salar Michincha	4.131	S	9
8	CMDIC		Pampa Ujina	4.179	S	9
9	CMDIC		Salar Coposa	3.756	V	5
10	CMDIC		Mina Ujina	4.400	S	3

* Estaciones ubicadas al interior del sistema piloto

** V: Vigente; S: Suspendida



Figura 6.35: Disponibilidad de datos anuales de temperatura en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la I Región.

N^{o}	ESTACIÓN			20	07								20	08							2009	
		Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Mar
1	Huasco en Alto del Huasco																					
2	Huasco en Diablo Marca																					
2	Huasco en Diablo Marca																					

: Mes con información completa
: Mes con mas de 20 días con información
: Mes con 10 a 20 días con información
: Mes con menos de 10 días de información

Figura 6.36: Disponibilidad de datos mensuales de temperatura en las estaciones PUC-DGA del sistema piloto de la I Región

6.4.1.2 Análisis de la Temperatura Anual y Mensual

En las estaciones PUC-DGA de la I Región se dispone solamente de algunos meses de información. En cambio en las estaciones DGA y CMDIC se dispone de estadística más extensa a nivel anual. Por lo tanto, para estas últimas estaciones es posible obtener estadígrafos sobre el comportamiento de largo plazo de la temperatura a nivel anual y mensual en el sistema piloto.

Las series anuales de temperatura mínima absoluta y promedio, media absoluta, máxima promedio y absoluta se presentan en forma gráfica en la Figura 6.37 para las estaciones DGA y CMDIC. En la Tabla 6.13, Tabla 6.14, Tabla 6.15, Tabla 6.16 y Tabla 6.17 se presentan los principales estadígrafos de las series anuales de temperatura mínima absoluta, mínima promedio, media absoluta, máxima promedio y máxima absoluta, respectivamente.



Figura 6.37: Series anuales de temperatura mínima absoluta y promedio, media absoluta, máxima promedio y absoluta en las estaciones DGA y CMDIC.

Tabla 6.13: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura mínima absoluta (°C) en las estaciones DGA y CMDIC.

N°	Estación Meteorológica	Años de Registro	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.
3	* Collacagua	47	-15,1	-4,0	-11,3	2,0	1,52
4	Ujina	11	-10,7	-5,0	-7,9	1,8	0,36
5	Coposa	9	-11,3	-2,1	-9,6	2,9	2,82
6	Rosario	3	-8,4	-4,0	-5,6	2,5	-1,71
7	Salar Michincha	9	-6,6	-3,3	-5,6	1,0	1,68
8	Pampa Ujina	9	-10,7	-3,5	-8,9	2,2	1,98
9	Salar Coposa	4	-18,3	-4,0	-12,0	6,3	-0,23
10	Mina Ujina	3	-17,7	-3,0	-10,7	7,4	0,41

* Estaciones meteorológicas dentro del sistema piloto

. ,		•						
N°		Estación Meteorológica	Años de Registro	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.
3	*	Collacagua	47	-10,7	1,5	-6,1	2,1	1,39
4		Ujina	11	-5,8	-1,4	-3,6	1,5	-0,14
5		Coposa	9	-5,8	1,6	-4,5	2,3	2,77
6		Rosario	3	-4,2	-0,9	-2,3	1,7	-1,10
7		Salar Michincha	9	-2,7	1,2	-1,8	1,2	2,40
8		Pampa Ujina	9	-5,7	1,3	-4,0	2,2	2,22
9		Salar Coposa	5	-11,4	0,6	-4,9	5,2	-0,21
10		Mina Ujina	3	-10,7	2,3	-4,8	6,6	0,82

Tabla 6.14: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura mínima promedio (°C) en las estaciones DGA y CMDIC.

* Estaciones meteorológicas dentro del sistema piloto

Tabla 6.15: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura media absoluta (°C) en las estaciones DGA y CMDIC.

N°		Estación Meteorológica	Años de Registro	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.
3	*	Collacagua	13	1,7	6,2	3,2	1,2	1,54
5		Coposa	9	4,6	8,8	5,6	1,2	2,51
6		Rosario	3	0,7	3,6	1,7	1,7	1,73
7		Salar Michincha	9	3,2	6,9	4,4	1,3	1,14
8		Pampa Ujina	9	3,2	8,6	4,5	1,6	2,55
9		Salar Coposa	5	2,4	8,7	5,0	3,0	0,60
10		Mina Ujina	3	2,9	5,3	4,4	1,3	-1,61

* Estaciones meteorológicas dentro del sistema piloto

Tabla 6.16: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura máxima promedio (°C) en las estaciones DGA y CMDIC.

N°	Estación Meteorológica	Años de Registro	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.
3	* Collacagua	47	12,0	19,8	15,4	1,2	0,53
4	Ujina	11	6,5	14,2	10,2	2,0	-0,03
5	Coposa	10	14,5	17,8	15,6	1,1	1,11
6	Rosario	3	7,6	11,0	9,4	1,7	-0,76
7	Salar Michincha	9	10,3	13,5	11,6	1,0	0,78
8	Pampa Ujina	9	12,6	15,2	13,7	0,9	0,61
9	Salar Coposa	5	13,6	19,2	16,2	2,6	0,34
10	Mina Ujina	3	14,4	18,5	16,5	2,1	-0,39

* Estaciones meteorológicas dentro del sistema piloto

N°	Estación Meteorológica	Años de Registro	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.
3	* Collacagua	47	16,4	23,8	19,6	1,3	0,59
4	Ujina	11	10,6	17,5	14,3	1,9	-0,44
5	Coposa	10	18,2	21,2	19,3	0,9	0,94
6	Rosario	3	11,4	13,8	12,5	1,2	0,47
7	Salar Michincha	9	14,6	17,3	15,5	0,9	1,40
8	Pampa Ujina	9	16,0	19,8	17,4	1,2	1,15
9	Salar Coposa	4	17,8	23,7	19,8	2,7	0,46
10	Mina Ujina	3	19,0	22,8	20,8	1,9	0,65

Tabla 6.17: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura máxima absoluta (°C) en las estaciones DGA y CMDIC.

* Estaciones meteorológicas dentro del sistema piloto

Se elaboraron diagramas tipo Box-Whisker con los datos de temperatura de las estaciones PUC-DGA, los cuales son registrados cada 10 minutos. Estos diagramas se presentan en la Figura 6.38 para cada uno de los meses del año. Se observa que la diferencia entre el valor máximo y mínimo alcanza hasta 31°C en la estación Huasco en Altos del Huasco y 22°C en la estación Huasco en Diablo Marca.

En la Figura 6.39 se presentan los valores mensuales de la temperatura media absoluta, mínima promedio, mínima absoluta, máxima promedio y máxima absoluta a nivel mensual para las estaciones PUC-DGA. La Figura 6.40 presenta la variación de la temperatura mínima absoluta, mínima promedio, media absoluta, máxima promedio y máxima absoluta para las estaciones DGA y CMDIC. Se observa que los meses más fríos del año son junio, julio y agosto, y los meses más cálidos son diciembre, enero, febrero y marzo.

1. Huasco en Alto del Huasco (DGA-PUC)



Figura 6.38: Cuartiles (Q_1 , Q_2 y Q_3) de la temperatura registrada cada 10 minutos en las estaciones PUC-DGA.



Figura 6.39: Series mensuales de temperatura mínima absoluta y promedio, media absoluta, máxima promedio y absoluta en las estaciones PUC-DGA



Figura 6.40: Series mensuales de temperatura mínima absoluta y promedio, media absoluta, máxima promedio y absoluta en las estaciones DGA y CMDIC

6.4.1.3 Variación Espacial de la Temperatura

La variación espacial de la temperatura se analizó desde un punto de vista regional considerando el conjunto de estaciones meteorológicas ubicadas al interior o en la cercanía a las cuencas altiplánicas de las Regiones XV, I, II y III. Este análisis se presenta en forma detallada en la Parte III de este estudio: Hidrología Regional del Altiplano. En esta sección se presentan algunos resultados acotados a la zona en la que se ubica la cuenca del sistema piloto de la I Región.

La Figura 6.41 presenta la variación de la temperatura media absoluta con la latitud. Se observa que las estaciones ubicadas bajo los 2.000 msnm se comportan de forma similar entre las Regiones XV y III. Lo mismo ocurre en las estaciones ubicadas sobre los 3.000 msnm entre la XV y II Región.



Figura 6.41: Variación de la temperatura media absoluta con la latitud en las estaciones seleccionadas.

La Figura 6.42 presenta el gradiente regional de la temperatura media con la altitud obtenido en el análisis regional. Se presenta además los valores de la temperatura media absoluta en las estaciones DGA y CMDIC seleccionadas para el sistema piloto, observándose que mantienen la tendencia del gradiente regional. De acuerdo a este gradiente la temperatura media absoluta disminuye 0,56°C cada 100 m para altitudes entre los 1.500 y 4.500 msnm.

Se trazaron líneas de igual temperatura o isotermas mediante la interpolación espacial de la temperatura media absoluta a nivel regional. En forma inicial se trazaron isotermas utilizando el programa Surfer V7.0 (1999, Golden Software), las que fueron luego corregidas en base a la topografía y a los gradientes de la temperatura con la altura. Las isotermas obtenidas para el sistema piloto de la I Región se presentan en la Figura 6.43.



Figura 6.42: Gradiente de la temperatura media absoluta en las estaciones DGA seleccionadas de la XV, I, II y III Región, y en las estaciones del sistema piloto de la I Región.



Figura 6.43: Mapa de isotermas en la zona del sistema piloto de la I Región.

6.4.2 Análisis de Evaporación de Tanque

En la cuenca del Salar del Huasco se dispone solamente de la estación "Collacagua" que tiene registros de evaporación de tanque. La Tabla 6.18 presenta la ubicación, altitud y vigencia de esta estación, y en la Figura 6.34 se presenta su ubicación en forma gráfica.

Se dispone de información a nivel mensual y anual de series de evaporación total y media. La disponibilidad de esta estadística para el año hidrológico (Octubre-Septiembre) se presenta en la Figura 6.44 y Figura 6.45 para la evaporación media y total, respectivamente. Se observa que los registros se inician a partir de la década de 1960, llegando el registro hasta el año hidrológico 2006-2007. Llama la atención que la mayor parte de registros de evaporación total presentan años con menos de 7 meses de información. En cambio, los registros de evaporación media tienen años con más de 9 meses de información. Por consiguiente, para efectos de los análisis se utilizó solamente la evaporación total de cada mes, multiplicando el registro de evaporación media mensual por el número de días del mes.

Tabla 6.18: Estaciones meteorológicas con registros de evaporación en el sistema piloto de la I Región.

N°	Cód. BNA	Estación Meteorológica	UTM (PSA	AD 1956)	Altitud	Estado	Años de
			Este	Norte	[msnm]	**	Registro
3	01050007-9	* Collacagua	517.429	7.782.949	3.990	V	44

* Estaciones ubicadas al interior del sistema piloto

** V: Vigente; S: Suspendida

Nº	CODIGO H	ESTACION	1960-1970	1971-1980	19	81-1990	1991-2000	2001-2007
3	01050007-9	Collacagua						
: Año con información completa			mpleta	: Año con 7 a 9 meses de información				
: Año con 10 u 11 meses d			de información		: Año con men	os de 7 meses de informaci	ión	

Figura 6.44: Disponibilidad de información histórica de evaporación media (año hidrológico)

Nº	CODIGO EST	TACION	1960-1970	1971-1980		1981-1990	1991-2000	2001-2007
3	01050007-9 Coll	llacagua		1,111,000			1,,,1,2000	2001 2007
	: Año con información completa			: Año con 7 a 9 meses de información				
: Año con 10 u 11 meses de ir			le información		: Año con mene	os de 7 meses de informaci	ión	


En la Tabla 6.19 se presentan los principales estadígrafos de la serie anual de evaporación en Collacagua para los años hidrológicos completos. Se observa que los valores varían entre 1.600 mm y 2.500 mm con una media de 2141 mm. La Figura 6.46 presenta esta serie en forma gráfica.

Tabla 6.19: Propiedades estadísticas de las series de evaporación anual (mm) en las estaciones seleccionadas.

N°	Estación Meteorológica	Años de Registro	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.
3	Collacagua	20	1.615,5	2.492,0	2.141,9	252,9	-0,53



Figura 6.46: Serie de evaporación anual (mm) en la estación Collacagua (I Región).



Figura 6.47: Evaporación media mensual en la estación Collacagua (I Región).

La Figura 6.47 presenta la variación de la evaporación a lo largo de los meses del año, observándose que los meses con mayor evaporación son octubre, noviembre y diciembre, alcanzando valores de hasta 240 mm mensuales. Por otra parte la menor evaporación ocurre en los meses de mayo, junio y julio con valores de alrededor de 120 mm.

La Figura 6.48 presenta la variación de la evaporación anual con la latitud para el año hidrológico (Oct-Sep) en las estaciones seleccionadas para el análisis hidrológico regional (Parte III, Hidrología Regional del Altiplano). Se observa que en las estaciones de la I Región ubicadas sobre los 3.000 msnm existe una gran variabilidad en la magnitud de la evaporación, alcanzando una diferencia de hasta 2.000 mm entre el valor máximo y mínimo.



Figura 6.48: Variación de evaporación media anual con la latitud en las estaciones seleccionadas.

Con los datos disponibles en la XV, I, II y III Región se determinaron gradientes de evaporación anual con la altitud, lo cuales se presentan en la Figura 6.49. De acuerdo a este gradiente es posible estimar que:

- Para altitudes menores a 1.100 msnm se estima un aumento de la evaporación de 200,0 mm cada 100 m.
- Para altitud entre los 1.100 y 3.000 msnm es aproximadamente constante de 3.100 mm.
- Para alturas sobre los 3.000 msnm se estima una disminución de 93,3 mm cada 100 m.





7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA

Este capítulo recopila, presenta y analiza la información hidrogeoquímica e isotópica disponible de la cuenca piloto del Salar del Huasco, tomada de instituciones públicas, publicaciones científicas e informes técnicos de empresas privadas. En este último grupo se encuentran los valiosos datos aportados por Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (Collahuasi– GP Consultores) e INVEREX, lo que ha contribuido a ampliar la base de datos utilizada para realizar la caracterización hidrogeoquímica de la cuenca.

El presente capítulo se estructura de acuerdo al siguiente orden:

En una primera parte se presentan los datos disponibles y el tratamiento que se le ha dado a la información. Luego, se presenta el análisis y caracterización físico-química de las aguas, elementos mayoritarios, minoritarios y trazas, empleando distintos diagramas como el de cajas, Piper, Schoeller y de Stiff, relacionándolos con la geología de la cuenca. Finalmente, se presenta la caracterización isotópica de las aguas, realizando una discusión de los valores de isótopos estables deuterio y oxígeno-18 en aguas subterráneas, superficiales y de precipitación, en relación con la química y los distintos procesos que los afectan.

El análisis de la información recopilada que conforma la base de datos con que se trabajo, permite determinar el origen de las aguas, sus direcciones de flujo y los procesos que las afectan, aportando a la comprensión el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca.

Para el análisis gráfico de los elementos mayoritarios de las aguas superficiales, tanto en los mapas como en los gráficos de Piper y de Stiff, se realiza una distinción para el tipo de muestra entre vertiente, afloramiento, vega, escurrimiento y laguna. Vertiente, afloramiento y manantial corresponden a sinónimos, y se han reportado de acuerdo a cómo se encontró la información en la fuente de la que se tomó, sin distinguirse en éstas la diferencia. Las muestras tipo vega corresponden a aquellas que se han tomado de sectores donde abunda la vegetación hidrófila característica del Altiplano (vega o bofedal). Las muestras tipo escurrimiento corresponden a cualquier muestra tomada de cursos superficiales que transportan agua hacia los salares y/o lagunas. Finalmente, las muestras tipo laguna son aquellas extraídas de las zonas terminales, correspondiendo generalmente a muestras de lagunas en los salares o dolinas con agua.

7.1 Datos Disponibles y Tratamiento de la Información

El primer antecedente revisado correspondió a la base de datos química provista por el Departamento de Estudios y Planificación (DEP) de la DGA, que fue complementada con información de otros estudios como son los informes de JICA-DGA-PCI (1995), Risacher et al. (1999), INVEREX (2001), Acosta (2004) y Collahuasi– GP Consultores Ltda. (2003; 2004; 2005).

Todos los datos químicos han sido agrupados de acuerdo al tipo de fuente, ya sea aguas superficiales (ríos, lagunas, manantiales o vertientes, pozas), subterráneas (pozos y punteras cuyas profundidades de perforación son menores a 6 m) o de precipitación (lluvia y nieve), los que se han representado en la Figura 7.1. Para trabajar con la información disponible, se evaluó la calidad de estos análisis, calculado el balance iónico de las muestras que reportaban todos los elementos mayoritarios (Cl⁻, SO₄⁻², HCO³⁻, NO³⁻, Na⁺, K⁺, Mg⁺² y Ca⁺²), con o sin el nitrato. El error admitido, en valor absoluto, fue un 10%, considerándose poco confiables aquellos que presentaban un error mayor.

El catastro inicial contaba con 326 análisis químicos en 183 puntos de la cuenca, sin discriminar la fuente de la que fueron tomados, de los cuales sólo 160 cumplen la condición de presentar un error de balance iónico admisible, pudiendo ser utilizados para el análisis. Las fuentes y datos disponibles descritos en este párrafo se resumen en la Tabla 7.1.

Tipo de agua	Punto muestreo	Nº análisis químicos realizados	Nº análisis con balance iónico correcto
Subterránea	72	144	59
Superficial	109	166	101
Precipitación	2	16	0
Total	183	326	160

Tabla 7.1: Datos hidrogeoquímicos disponibles por tipo de agua.

En cuanto a los datos isotópicos de deuterio y oxígeno-18, se trabajó con 128 análisis procedentes de 88 puntos de muestreo (Tabla 7.2). Estos datos provienen de 21 análisis del presente estudio realizados en 2008, 48 análisis recopilados de los estudios de Collahuasi– GP Consultores efectuados en 2003 y 2004, 4 análisis provenientes del estudio de Risacher et al. (1999) y 55 análisis de la base de datos de la DGA (DEP). En la Figura 7.2 se presentan los puntos de muestreo con información isotópica disponible, clasificados por el tipo de fuente.

Tipo de agua	Datos Isotópicos
Subterránea	43
Superficial	69
Precipitación	16
Total	128

Tabla 7.2: Datos isotópicos disponibles por fuente.

En relación al análisis hidrogeoquímico de elementos minoritarios y parámetros físicoquímicos, dado que éstos no han sido utilizados para el cálculo del balance iónico, todas las muestras que contienen dicha información han sido consideradas para la caracterización de las aguas de la cuenca. En particular, en este informe se presenta un análisis detallado de los elementos minoritarios más abundantes en las aguas.



Figura 7.1: Distribución de muestras químicas en la cuenca del Salar del Huasco.



Figura 7.2: Distribución de muestras isotópicas en cuencas del Salar del Huasco.

7.2 Química General de las Aguas de la Cuenca

7.2.1 Parámetros Físico-Químicos

Los parámetros físico-químicos estudiados son la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica de las aguas. En la Figura 7.3 y Tabla 7.3 se presenta la distribución de valores del total de muestras disponibles, indicando mínimos y máximos, el valor de la mediana y de los cuartiles primero y tercero.



Figura 7.3: Distribución de los parámetros físico-químicos.

Tabla 7.3: Distribución de los parámetros físico-químicos.

Parámetro	Cantidad	Máximo	Mínimo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75
Temperatura	142	26	1,7	10,175	13,1	15,575
pН	233	12,1	3,56	7,28	7,75	8,19
Conductividad Eléctrica	212	335.000	33,9	569,5	680,5	1.012,75

Así también, en la Figura 7.4 y en la Tabla 7.4 se presenta la distribución de estos parámetros físico-químicos en las aguas superficiales y subterráneas por separado y cuyos resultados se describen a continuación.



Figura 7.4: Distribución de los parámetros físico-químicos de las aguas en la cuenca del Salar del Huasco. Izquierda: aguas superficiales. Derecha: aguas subterráneas.

Parámetro	Cantidad	Máximo	Mínimo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75			
Aguas Superficiales									
Temperatura	70	26	1,7	10,7	12,5	15,6			
pH	137	9,21	3,56	7,5	7,8	8,1			
Conductividad Eléctrica	119	335.000	33,9	530	600	888,5			
Aguas Subterráneas									
Temperatura	72	21,2	3,3	10,075	13,3	15,7			
pH	94	12,1	4,2	7,1	7,71	8,615			
Conductividad Eléctrica	93	82.700	140	645	788	1.160			

Tabla 7.4: Distribución de los parámetros físico-químicos de las aguas superficiales y subterráneas.

pН

Los valores de pH medidos en las muestras varían entre 3,56 y 12,1, aunque generalmente se encuentran cerca de la neutralidad, tanto en aguas superficiales como subterráneas.

De manera individual, los valores de pH de las aguas superficiales y subterráneas varían entre 3,5 y 9,2; y entre 4,2 y 12,1, respectivamente, tendiendo la mayoría de las muestras de neutros a alcalino, debido a la capacidad buffer de las rocas volcánicas y carbonatadas (Risacher et al., 2003). Los bajos valores de pH de las aguas superficiales corresponden a dos puntos de muestreo (HUA.F027 y HUA.F052) tomados en el río en la zona de rinconada (sureste de la cuenca) donde se reconoce la unidad geológica de estratovolcanes que agrupa a la mayoría de los centros volcánicos del área. Para el caso de las aguas subterráneas, el pH bajo corresponde a una única muestra (HUA.T004), en el sector Pampa Peña Blanca (norte de la cuenca), sin embargo, no se cuenta con otras mediciones realizadas en el mismo punto que puedan corroborar el valor determinado en aquella ocasión.

Temperatura

Las temperaturas del agua, medida *in situ*, se encuentran influenciadas por la temperatura del aire y la radiación solar para aquellas que están cerca o sobre la superficie del terreno, así como por el gradiente geotermal cuando las muestras de aguas subterráneas han sido tomadas a grandes profundidades. Temperaturas distintas a las esperadas por la naturaleza de la muestra y/o fecha de muestreo nos pueden indicar ciertas características del área o del flujo de

las aguas subterráneas (por ejemplo, zona de hidrotermalismo, vertiente de alimentación subsuperficial, de flujo profundo, etc.).

La temperatura medida *in situ* varió entre los 1,7 y los 26 °C. Para las aguas superficiales se registraron valores entre 1,7 y 26 °C, muy parecidas a las temperaturas de las aguas subterráneas que varían de 3,3 a 21,2 °C. Las mayores temperaturas pueden considerarse como aguas termales, y corresponden a un agua de pozo (HUA.T046), con un valor de 21,2 °C, y una muestra de la vertiente Ermitaño (HUA.F016) con 26 °C; las que se ubican respectivamente en el sector Pampa Sillillica y al oeste del salar. Los pH de estas muestras de agua son prácticamente neutros (6,84 y 7,64).

Conductividad Eléctrica

Los datos de conductividad corresponden a aquellos medidos en laboratorio. Los valores de este parámetro variaron entre 33,9 y 335.000 μ S/cm para las muestras disponibles. Generalmente, la conductividad aumenta desde las zonas topográficamente más altas, que corresponde a las áreas de recarga donde hay precipitación, hasta las zonas topográficamente más bajas de las cuencas donde por el trayecto recorrido se ha producido un aumento de los sólidos disueltos. Cuando se observa salares en los depocentros de las hoyas hidrográficas, la evaporación contribuye enormemente en el aumento de estos dos parámetros.

Las aguas superficiales presentan valores de conductividad de 33,9 a 335.000 μ S/cm, conteniendo al valor máximo y mínimo de entre todas las muestras. De éstas, las lagunas presentan los valores más elevados (678 a 335.000 μ S/cm), los ríos presentan rangos entre 105 a 1.060 μ S/cm, las pozas de 1.377 a 53.500 μ S/cm y los manantiales o vertientes entre 33,9 a 6.180 μ S/cm.

Respecto a las aguas subterráneas, los valores de conductividad se encuentran entre 140 y 82.700 μ S/cm, siendo en general menores que las aguas superficiales. Las muestras tomadas en las punteras ubicadas en el entorno del salar presentan los valores más altos (450 a 82.700 μ S/cm), mientras que las aguas de los pozos presentan valores entre 140 y 1.290 μ S/cm.

La conductividad eléctrica y la concentración de sólidos disueltos totales son dos parámetros que se relacionan de forma directamente proporcional. El aumento de los elementos disueltos en el agua aumenta las cargas iónicas, aumentando la conductividad eléctrica de la misma. En la Figura 7.5 se aprecia la relación de la conductividad con la concentración de sólidos disueltos totales (TDS), donde se observa claramente que las aguas más salinas corresponden a las aguas superficiales (principalmente lagunas) ubicadas en el área del salar, las que se encuentran muy influenciadas por la evaporación. Las muestras de pozos, ríos, precipitación y vertientes se caracterizan por ser aguas dulces.



Figura 7.5: Relación de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales.

7.2.2 Elementos Mayoritarios y Composición de las Aguas

Los elementos mayoritarios de las aguas que han sido considerados en este apartado son:

Aniones: Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄⁻² y NO₃⁻

Cationes: Na⁺, Ca²⁺, K⁺ y Mg²⁺

Solamente las muestras que presentan un error de balance menor que 10 % han sido consideradas para el trabajo con los datos de composición de las aguas y de las concentraciones de estos elementos.

La distribución de los elementos mayoritarios se muestra en la Figura 7.6 y Tabla 7.5. Se observa que los elementos que presentan las más altas concentraciones (considerando la mediana) corresponden al bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{-2}), sodio (Na^+), cloruro (Cl^-) y calcio (Ca).



Figura 7.6: Distribución de los elementos mayoritarios.

Tabla 7.5: Distribució	n de	los elementos	mayoritarios
------------------------	------	---------------	--------------

Elemento	Cantidad	Máximo	Mínimo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75
Cl	160	89.692	1,8	19,85	31,6	57,35
\mathbf{SO}_4	160	37.800	17,3	73,95	100,65	252,425
HCO ₃	160	961,9	0,005	69,315	203,5	268
NO ₃	95	97,43	0,044	0,44	1,52	7,51
Na	160	62.363	7,02	39,75	63,5	91,025
K	160	7.120	0,9	7	9,4	16,65
Mg	160	872	0,37	7,175	13,4	22,85
Ca	160	750	5,74	38,5	45,35	84,6

La distribución de los elementos mayoritarios de las aguas superficiales se presenta en la Figura 7.7 y Tabla 7.6. Las concentraciones más altas considerando la mediana corresponden a los elementos de bicarbonato, sulfato, sodio y cloruro, presentando las concentraciones máximas dos puntos correspondientes a muestras tomadas en lagunas dentro del salar, que están sometidas a procesos de evaporación.



Figura 7.7: Distribución de los elementos mayoritarios de las aguas superficiales.

Tabla 7.6: Distribución d	e los elementos	mayoritarios de	las aguas su	perficiales
		2	0	1

Elemento	Cantidad	Máximo	Mínimo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75
Cl	102	89.692	1,8	14,4	26,6	35,15
SO_4	102	37.800	17,33	69,3	85,05	180
HCO ₃	102	961,9	0,005	137,064	211,25	265,75
NO_3	64	97,43	0,044	0,32	0,835	5,59
Na	102	62.363	7,02	51,25	63,5	75,425
Κ	102	7.120	2,95	7,525	9,1	11,875
Mg	102	872	2,39	7,2225	17,7	23
Ca	102	750	5,74	37,45	41,35	51,575

La distribución de los elementos mayoritarios de las aguas subterráneas se presenta en la Figura 7.8 y Tabla 7.7. Los valores máximos son menores que los de las aguas superficiales. Las concentraciones máximas son de cloruro y sodio en una puntera ubicada en el entorno del salar, pero en general las medianas de las concentraciones más altas son de sulfato y después de bicarbonato, calcio, cloruro y sodio.



Figura 7.8: Distribución de los elementos mayoritarios de las aguas subterráneas.

Elemento	Cantidad	Máximo	Mínimo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75
Cl	58	26.358	8,62	39,65	62,55	97,15
SO_4	58	4.928	17,3	115	180,3	282,925
HCO ₃	58	822	20,8	59,625	120,685	262,25
NO_3	31	30,11	0,0531	1,58	7,086	10,41
Na	58	16.812	9,7	23,525	55,6	121,75
Κ	58	3.358	0,9	3,5825	11,09	26,6
Mg	58	147	0,37	6,24	11,85	20,425
Ca	58	455	11	48,55	70,2	107,125

Elementos Mayoritarios y Composición de las Aguas: Diagramas de Piper

Los diagramas de Piper proporcionan una visión de la composición de las aguas, sin tener en cuenta su grado de salinización, y permiten realizar una caracterización global de los distintos tipos de aguas presentes en un área. Gráficamente, este tipo de diagramas permite mostrar muchos parámetros en una combinación de dos diagramas triangulares (que en hidrogeología

representan uno los aniones mayoritarios sin el nitrato y el otro los cationes mayoritarios), y un diagrama en forma de rombo (para mostrar la relación entre los dos grupos anteriores). Así, cada muestra queda proyectada con un punto en cada uno de los tres diagramas.

En la Figura 7.9 se presentan las composiciones químicas de todas las muestras, en que se observan distintas agrupaciones, evidenciándose concentraciones de datos en el área de aguas bicarbonatadas con una composición catiónica intermedia; sulfatadas generalmente entre cálcicas y sódicas, y también aguas cloruradas sódicas. Estas características las comparten las aguas superficiales y las subterráneas, aunque con algunas diferencias que se detallan más adelante.



Figura 7.9: Composición química de las muestras recopiladas en la cuenca Salar del Huasco. Izquierda: todas las muestras. Derecha: muestras separadas por tipo de fuente principal.

La Figura 7.10 muestra las composiciones químicas del total de muestras agrupadas por fuente, donde se observa que aquellas tomadas en ríos presentan en la mayoría de los casos composiciones bicarbonatadas en cuanto a los aniones y entre cálcico- magnésicas para los cationes. Las vertientes, manantiales, afloramientos, pozas y pozos presentan composiciones de aguas entre bicarbonatadas y sulfatadas en cuanto a los aniones y entre cálcico-magnésicas y sódicas para los cationes. Las lagunas y punteras se caracterizan por presentar composiciones de aguas bicarbonatadas intermedias y sulfatadas-cloruradas o cloruradas sódicas. Esta dispersión de características indica que existen diferentes composiciones químicas de las muestras, las cuales varían dependiendo del tipo de fuente y probablemente del lugar donde fueron tomadas.



Figura 7.10: Composición química de las muestras de acuerdo a la fuente de muestreo.

Para entender la composición de las aguas y sus cambios dentro de la unidad hidrográfica de estudio, se representaron las distintas muestras por sectores (Figura 7.11). Una descripción de estas agrupaciones se presenta a continuación.

Sector Collacagua, Pampa Porquesa, Pampa Piga y Quebrada Chislaca, al norte de la cuenca.

En este sector se tiene agrupaciones de las aguas con concentraciones bicarbonatadas intermedias (Figura 7.12), a excepción de una muestra correspondiente a un manantial ubicado en el sector de Pampa Porquesa, que se caracteriza por tener una mayor proporción de sulfatos y menor de sodio y potasio. En general, estas muestras tienen valores de conductividad bajos (275 a 1.160 μ m/cm), dentro del rango de aguas dulces, y sus composiciones son concordantes con aguas jóvenes cercanas a las zonas de recarga de la cuenca.



Figura 7.11: Toponimia de la cuenca y puntos de muestreo Salar del Huasco.

Los cursos de aguas superficiales, principalmente las muestras tomadas en el Río Piga y en la Quebrada Chislaca, antes de la confluencia en el nacimiento del Río Collacagua, se caracterizan por ser aguas bicarbonatadas en su composición aniónica, variando su composición catiónica entre aguas sódica- cálcica (Piga) y magnésica- cálcica (Chislaca). En el caso del Río Piga, sus aguas están influenciadas por los terrenos que atraviesa, de composición riolítica, que se desarrollan sobre los depósitos superficiales de la Formación Pastillos, cuya unidad superior se encuentra compuesta de toba dacítica. Así también, las aguas de la Quebrada Chislaca se estarían originando en rocas andesíticas, dado su mayor contenido de magnesio y calcio.



Figura 7.12: Composición química de muestras en los sectores de Collacagua, Pampas Porquesa y Piga, y Quebrada Chislaca.

Sector Pampa Batea y Río Batea.

En este sector las agrupaciones de muestras son similares a las presentadas en el sector anterior, es decir, se caracterizan por tener concentraciones de datos en el área de aguas bicarbonatadas intermedias a sódicas (Figura 7.13). En particular, las muestras tomadas en ríos presentan esta evolución de composiciones, mientras que los dos pozos de esta área presentan aguas bicarbonatadas cálcicas y el manantial de Pampa Batea una composición bicarbonatada sódica. Estas composiciones indican también aguas relativamente jóvenes, aunque algo más maduras por su mayor concentración de sodio. Las conductividades eléctricas de las muestras varían entre 140 a $1.041 \,\mu$ m/cm.

En relación a los cursos de aguas superficiales, se observa que el Río Piga en el sector de Pampa Batea (al este de la cuenca, Figura 7.11) mantiene sus características bicarbonatadas en su composición aniónica, variando entre aguas sódicas a cálcicas en su composición catiónica; incrementándose además los valores de conductividad eléctrica a rangos entre 339 a 1.041 μ m/cm. El Río Batea, entre el caserío Collacagua y El Tojo, se caracteriza por su composición bicarbonatada sódica, con conductividades eléctricas bajas (240 a 328 μ m/cm). A la altura de El Tojo, se observa que éste curso mantiene su composición bicarbonatada entre cálcica y sódica, con una conductividad eléctrica de 640 μ m/cm, la que permanece relativamente constante en su recorrido, en puntos muestreados aguas abajo.

En conclusión se puede suponer que en la formación del Río Collacagua, al noreste de la cuenca, intervienen dos tipos de aguas, unas bicarbonatadas sódica- cálcicas (características de los ríos Piga y Batea) y otras bicarbonatadas magnésica- cálcicas (correspondientes a la Quebrada Chislaca).



Figura 7.13: Composición química de muestras en el sector de Pampa Batea y Río Batea.

Sector Pampa Peña Blanca

Las aguas superficiales (ríos y manantiales) se caracterizan por presentar composiciones químicas con concentraciones bicarbonatadas entre cálcicas y sódicas, con una mayor proporción de sodio y potasio. Esto estaría mostrando que la composición química del Río Collacagua sigue manteniéndose en su recorrido en dirección sur. Así también, se evidencia un incremento de la conductividad eléctrica a un valor máximo de 828 µm/cm, lo que estaría indicando que las sales disueltas aumentan en la dirección del flujo. Esto se asocia a un aumento en el contenido de los cloruros, a excepción de las aguas del Río Chislaca, que estarían vinculadas con un mayor contenido de bicarbonatos, sulfatos y calcio (Acosta, 2004).

Para el caso de las aguas subterráneas (pozos) se observa que coinciden con el grupo químico de las aguas superficiales, sin embargo, presentan una mayor dispersión de composiciones, evidenciándose aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas y aguas intermedias en cuanto a los aniones y sódico-cálcicas o sódicas en cuanto a los cationes (Figura 7.14). Estas muestras corresponden a los pozos J-G, E24, P12, E18 y E19, que presentan profundidades entre 18 y 180 metros y valores de conductividades eléctricas que varían de 195 a 1.069 µm/cm.

En conclusión, se observa la presencia de aguas superficiales y subterráneas de tipo bicarbonatadas, las que se extienden hacia el sur siguiendo el cauce del Río Collacagua, influenciadas por los materiales riolíticos de la Formación Altos de Pica.



Figura 7.14: Composición química de muestras en el Sector de Pampa Peña Blanca.

Sector Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto

En el sector de Pampa Sillillica Norte hay agrupaciones variables de aguas (Figura 7.15), con concentraciones bicarbonatadas intermedias, sulfatadas-cálcicas y calcico-magnésicas. Para el caso de la muestra del Río Collacagua en término (HUA.F109), donde las aguas desaparecen ya que se infiltran completamente, se observa que mantiene en su recorrido su composición química bicarbonatada sódica, con una conductividad eléctrica de 695 µm/cm.

Las muestras de los pozos E11, E12, E13, E14, E16, E17, P8-A, P9, P11 y P14, presentan variabilidad en su composición química, ya que algunas son bicarbonatadas intermedias, pero la gran mayoría son de tipo sulfatadas en su composición aniónica, variando de cálcicas a calcico-magnésicas, estando estas últimas influenciadas por las rocas andesíticas de la Formación Sillillica. La conductividad eléctrica de éstas aguas varía de 264 a 790 µm/cm.



Figura 7.15: Composición química de muestras en el Sector de Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto.

En el sector de Pampa Sillillica, la muestra de vertiente ubicada en la zona alta, sobre los estratovolcanes de la Formación Sillillica, presenta una composición de tipo sulfatada cálcicosódica y una conductividad eléctrica baja, de 204 μ m/cm. Por su parte, las aguas de los pozos J10, P1, P2 y E4, ubicados sobre depósitos aluviales y eólicos, presentan composiciones químicas muy similares que los pozos del sector Pampa Sillillica Norte, es decir, sulfatadas cálcicas o cálcico-magnésicas, con conductividades eléctricas entre 300 y 947 µm/cm.

En el área de Sillillica Alto las dos muestras de vertientes, también sobre los estratovolcanes de la Formación Sillillica (ver Figura 7.11), presentan concentraciones de aguas diferentes, una bicarbonatada sódica y la otra sulfatada cálcico-magnésica, con valores de conductividad eléctrica de 33,9 y 220 μ m/cm.

Sector Pampa Huasco y Salar del Huasco

En el sector Pampa Huasco se evidencia la influencia del grupo químico de las aguas del sector Pampa Sillilica (Figura 7.16), en una muestra de una puntera (HUA.T070) ubicada al norte del salar. La composición de esta muestra es de tipo sulfatada cálcico-magnésica y además presenta una conductividad eléctrica de 885 µm/cm. En este mismo lugar está también la muestra de otra puntera (HUA.T071), de composición clorurada cálcico-magnésica, debido posiblemente a la influencia del proceso de evaporación en el área cercana al salar.



Figura 7.16: Composición química de muestras en los sectores Pampa Huasco y Salar del Huasco.

En el sector del salar propiamente tal, tanto las aguas superficiales como las subterráneas presentan distintas agrupaciones de composiciones, mostrando concentraciones bicarbonatadas

intermedias, bicarbonatadas cálcicas, cálcico-sódicas, sulfatadas cálcicas y sódicas, así como cloruradas sódicas. Esto demostraría que las características de las muestras dependerán de su ubicación en el entorno del salar y del origen de sus aguas, así como también del proceso de evaporación que se da en esta zona.

En la Figura 7.17 se presentan el diagrama de Piper de las muestras de aguas subterráneas (punteras y pozo) en relación a su ubicación en el área del Salar del Huasco. Estas aguas presentan diferentes composiciones como las que se indica a continuación:

Sector noroeste del salar: comprende a las punteras P2, P21, P21A, P22, P25, P27, P29 y P30, cuyas muestras fueron tomadas a profundidades entre 2 y 5 metros. Se caracterizan por presentar aguas de tipo bicarbonatadas intermedias, similares a las aguas al norte de la cuenca como Collacagua, Pampa Piga, Chislaca, Pampa Batea y Pampa Peña Blanca. Así también, se tiene aguas sulfatadas cálcicas y sódicas, características de las aguas del sector este de la cuenca como Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto.

Sector oeste del salar: comprende a las muestras de agua de las punteras P17, P20, P33, P34, P36 y P37 tomadas a profundidades entre 2 y 6 metros. Se tienen aguas de tipo bicarbonatadas intermedias, sulfatadas cálcico-sódicas y cloruradas sódicas. El origen de estas aguas es similar a las que se presentan en el sector noroeste.

Sector sur del salar: considera las muestras de agua de las punteras P8, P38, P39 y P40, tomadas a profundidades de 4 a 6 metros. Las aguas se caracterizan por ser sulfatadas cálcicas y sódicas, similares a las que se presentan en el sector este de la cuenca, como en Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto.

Sector suroeste del salar: comprende a las punteras P5 y P6, cuyas muestras de agua fueron tomadas a profundidades de 1,0 y 3,9 m, respectivamente. Las aguas se caracterizan por ser de tipo sulfatadas sódicas.

Sector noreste: considera la muestra de agua de la puntera P19, tomada a una profundidad de 5 m y que se caracteriza por ser del tipo clorurada sódica, debido probablemente al efecto de la evaporación que se da en esta zona. Sin embargo, las punteras P11 y P12, muestreadas en el sector cercano de Pampa Huasco, presentan composiciones químicas de tipo sulfatadas cálcico-sódicas, las que estarían influenciadas por las aguas provenientes del sector este de la cuenca.

Es importante señalar que las muestras de todas las punteras presentan conductividades eléctricas altas (450 a 82.700 μ m/cm), debido a su ubicación en el entorno del salar, sometidas a una intensa evaporación.

Las aguas superficiales en el entorno del salar se presentan en la Figura 7.18. Los diferentes tipos de aguas presentan agrupaciones marcadas, como se describe a continuación.

Lagunas: las muestras fueron tomadas en las lagunas ubicadas en la zona oeste, este, sur y centro, al interior del salar. Estas aguas se caracterizan por ser de tipo bicarbonatadas sódicas (característico del sector norte de la cuenca, desde Collacagua hasta Pampa Peña Blanca), sulfatadas sódicas (presentes en el sector este de la cuenca) y cloruradas sódicas (afectadas por la evaporación). Estos grupos químicos de las aguas estarían indicando que sus orígenes provienen de diferentes tipos de aguas que llegan a aflorar en el entorno del salar.



Figura 7.17: Composición química de muestras de aguas subterráneas en el Sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco.

Vertientes o manantiales: se observa dos grandes grupos característicos. El primer grupo comprende a las vertientes o manantiales ubicados en el sur, sureste y suroeste del salar, como son las vertientes Huasco Lípez, Huasco Lípez Este, Huasco Lípez Oeste y Jalsuri. Se caracterizan por presentar composiciones químicas de tipo sulfatadas cálcicas y sódicas, cuyo origen estaría asociado a las unidades volcánicas ubicadas en el este de la cuenca, al igual que las muestras de punteras ubicadas en este sector respecto al salar.

El otro grupo comprende a las muestras de vertientes o manantiales ubicados al oeste y norte del salar, donde las vertientes principales al oeste corresponden a las vertientes Huasco Norte

y Ermitaño. Estas aguas presentan composiciones químicas de tipo bicarbonatadas cálcicas y cálcico-magnésicas y bicarbonatadas sódicas, similares a las aguas que se tienen en el sector norte de la cuenca, las que estarían influencias por la Ignimbrita Huasco. La vertiente ubicada al norte presenta un tipo de agua sulfatada sódica, por lo que existe la posibilidad de que la zona esté recibiendo aportes desde el este de la cuenca, asociado a unidades volcánicas.

Pozas: Se encuentran ubicadas al noroeste y suroeste del salar y presentan aguas de tipo sulfatadas sódicas.



Figura 7.18: Composición química de muestras de aguas superficiales en el sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco.

Sector Pampa Rinconada.

Las dos muestras de aguas superficiales (Figura 7.19), tomadas en la Quebrada Rinconada, ubicada al sureste de la cuenca, presentan composiciones sulfatadas cálcicas, influenciadas por las unidades volcánicas del este de la cuenca, tal como se presenta principalmente en los sectores de Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto. Las conductividades eléctricas de las aguas son bajas, con valores de 345 y 679 µm/cm, y cuyas composiciones son concordantes con aguas jóvenes cercanas a las zonas de recarga de la cuenca.

Las muestras de aguas subterráneas al igual que las muestras de las quebradas son de tipo sulfatadas cálcicas, con menor proporción de sulfatos, llegando a presentar alguna muestra una composición aniónica sulfatada clorurada. Estos corresponden a las aguas de los pozos P6, P7, E7 y E8, ubicados al sureste de la cuenca, cuyas profundidades varían de 134 a 252 metros. Las conductividades eléctricas de las muestras son mayores que las aguas superficiales, variando entre 730 a 1.290 µm/cm.



Figura 7.19: Composición química de muestras en el sector de Pampa Rinconada.

Elementos Mayoritarios y Composición de las Aguas: Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff resultan muy útiles para representar la composición y concentración de las aguas en un mapa, de manera de poder entender las variaciones composicionales y de aumentos de concentraciones a lo largo de los sentidos de flujo, o atravesando sistemas hídricos particulares (salares, campos geotermales, determinadas formaciones geológicas, etc). Estos diagramas representan las concentraciones (en meq/L) de los elementos mayoritarios mediante polígonos, los cuales se encuentran divididos mediante una línea vertical, quedando los aniones (iones con cargas negativas) del lado izquierdo y los cationes (iones positivos) del lado derecho. El ancho de las líneas horizontales, permite determinar cuan mineralizada se

encuentra el agua que representa, es decir, mientras más ancho es un diagrama más mineralizada es la muestra.

Los puntos de muestreo considerados para su representación fueron aquellos cuyo error de balance fue menor a 10%. Para el caso de puntos de muestreo que tengan más de una medición se consideró la más reciente. Así también, para aquellas muestras que presentaron altas concentraciones de elementos, se ha reducido la escala horizontal del diagrama, de tal manera que puedan ser representados de manera gráfica en el mapa.

En la Figura 7.20 se presentan los diagramas de Stiff de las muestras de aguas en la cuenca del Salar del Huasco, las que se han clasificado como: a) aguas subterráneas (pozos y punteras), b) afloramientos de aguas subterráneas (vertientes o manantiales), c) cauces superficiales (ríos) y d) aguas superficiales estancadas (lagunas y pozas). A continuación se realiza la discusión de resultados para cada tipo de agua.

a) Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas corresponden a las muestras de pozos de exploración y bombeo situados sobre las Pampas Batea, Peña Blanca, Sillillica Norte, Sillillica, Rinconada y sobre el lecho del Río Collacagua. También se incluyen las punteras que han sido instaladas en el entorno del Salar del Huasco (Collahuasi– GP Consultores).

Para el caso del pozo próximo a la Quebrada Chislaca (HUA.T005) se tiene una composición bicarbonatada magnésica de elevada concentración, similar a las aguas de los ríos en esta zona afectadas por las rocas andesíticas de las unidades volcánicas. También, hacia el sector Pampa Batea (este), las muestras de dos pozos (HUA.T009 y HUA.T049) presentan una composición bicarbonatada cálcica, igual al tipo químico de las aguas del Río Piga, asociadas a la influencia de la unidad superior de la Ignimbrita Pastillos. La mayoría de las muestras de los pozos paralelos al Río Collacagua, a la altura del sector Pampa Peña Blanca, evolucionan químicamente a aguas de tipo bicarbonatadas sódicas, posiblemente influenciadas por la unidad Ignimbrita Huasco. Sin embargo, a la altura de Pampa Sillillica Norte, la composición química de las aguas subterráneas se ve fuertemente influenciada por las rocas andesíticas de la Formación Sillillica, observándose aguas de tipo sulfatadas cálcicas, que se mantienen hacia el sur en los sectores de Pampa Sillillica y Pampa Rinconada.

En relación a las muestras de punteras es posible diferenciar dos áreas, la primera situada al oeste del salar, la segunda hacia el sur y norte. Las muestras de agua del sector oeste se caracterizan en su mayoría por ser de tipo bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas, similares a las aguas subterráneas y superficiales en la mitad norte de la cuenca, que se encontrarían influenciadas por la unidad hidrogeológica de la Ignimbrita Huasco. Las aguas de

los sectores norte y sur presentan en la mayoría de casos composiciones de tipo sulfatadas cálcicas y sulfatadas sódicas, aunque existen algunas muestras de tipo bicarbonatadas sódicas y cloruradas sódicas, cuya influencia sería de las unidades volcánicas del este de la cuenca y de la evaporación en su evolución química.

b) Afloramientos de aguas subterráneas

Es posible identificar dos grupos de vertientes o manantiales: 1) vertientes o manantiales ubicados al norte y este de la cuenca y 2) vertientes o manantiales ubicados en el interior y perímetro del Salar del Huasco.

Para el primer grupo se cuenta con una medición (HUA.F056), de una vertiente ubicada al norte de la cuenca, dos mediciones en la zona alta al este (HUA.F054 y HUA.F006) y una medición en Pampa Batea. La composición química del agua del norte es de tipo sulfatada magnésica, la cual se encuentra influenciada por las unidades volcánicas. En la zona alta al este se tienen composiciones de aguas variables en su composición aniónica, siendo una de ella de tipo bicarbonatada cálcica y la otra sulfatada cálcica, ambas influenciadas por las unidades volcánicas de la Formación Sillillica. A la altura de Pampa Batea se tiene la muestra de un manantial (HUA.F047) de composición bicarbonatada sódica, similar al tipo de agua que presenta el Río Batea.

Para el segundo grupo, se tienen 10 mediciones de vertientes o manantiales ubicados dentro y en el entorno del salar, que de acuerdo a sus composiciones químicas se hace posible diferenciarlas. En el oeste del salar las aguas presentan composiciones químicas de tipo bicarbonatadas cálcicas y sódicas, similares a los cursos superficiales y subterráneos ubicados hasta la mitad norte de la cuenca, lo que estaría mostrando la influencia de la unidad hidrogeológica Ignimbrita Huasco. En el sur del salar, las vertientes son de tipo sulfatadas cálcicas, cuyo origen estaría dado por las unidades volcánicas al este de la cuenca.

c) Cauces superficiales

Se cuenta con 14 análisis químicos de cursos superficiales, provenientes de los ríos Piga, Batea, Collacagua y la Quebrada Rinconada, a la altura de los sectores de Collacagua y las pampas Piga, Batea, Peña Blanca, Sillillica Norte y Rinconada. Todas estas muestras de agua son de tipo bicarbonatadas en su composición aniónica, variando entre cálcicas (ríos Piga y Collacagua en Peñablanca), magnésicas (a la altura de la Quebrada Chislaca) y sódicas (ríos Batea y Collacagua en Peñablanca) en su composición catiónica. A excepción de las aguas de la Quebrada Rinconada que son de tipo sulfatadas cálcicas. El nacimiento del Río Collacagua en "El Tojo" (confluencia de la Quebrada Chaquina y el Río Piga) se ve marcadamente influenciado por tipos de aguas bicarbonatadas con composiciones catiónicas variables.

- El Río Piga presenta composiciones cálcicas, que tienden a incrementarse conforme sigue su recorrido en dirección al oeste. El Río Batea, por su parte, aporta aguas de tipo sódicas de medianas concentraciones, hasta su confluencia con el Río Collacagua. El desarrollo de estos dos ríos se estaría dando sobre la Ignimbrita Pastillos, caracterizada por depósitos de toba dacítica.
- En la confluencia de la Quebrada Chislaca con el Río Piga se evidencian aguas de tipo magnésicas de altas concentraciones, que estarían fuertemente influencias por rocas andesíticas del conjunto de estratovolcanes.

Las 2 mediciones del Río Collacagua a la altura de Pampa Peña Blanca son aguas de tipo bicarbonatadas, con variaciones en su composición catiónica, siendo una de ellas cálcica y la otra sódica, lo que demostraría la influencia aún en esta zona de los tipos de agua que intervienen en el nacimiento del río. Sin embargo, a la altura del sector Pampa Sillillica Norte la única muestra de este río antes de infiltrarse determina la existencia del tipo de agua bicarbonatada sódica. Es posible que el margen izquierdo del Río Collacagua se vea influenciado por los materiales riolíticos de la Ignimbrita Huasco y en su margen derecho por la Ignimbrita Pastillos.

En la Quebrada Rinconada, al sureste de la cuenca, las aguas se caracterizan por ser sulfatadas cálcicas, que estarían fuertemente influenciadas por las unidades volcánicas de la Formación Sillilica.

d) Aguas superficiales estancadas

Se cuenta con tres muestras tomadas en las lagunas al interior del salar y tres mediciones de pozas. A excepción de una muestra de laguna que es de tipo clorurada sódica, todas presentan composiciones sulfatadas sódicas, sin embargo, como se ha explicado anteriormente en los diagramas de Piper, existen también muestras de tipo bicarbonatadas sódicas que permiten concluir que la composición química de las aguas depende del quimismo de los afloramientos en el entorno del salar.



Figura 7.20: Diagramas de Stiff que representan variaciones en la composición y concentración de los elementos mayoritarios en la cuenca del Salar del Huasco.

7.2.3 Variabilidad temporal

Para evaluar la variabilidad temporal de las aguas se consideran solamente los puntos de muestreo que tienen por lo menos dos (2) mediciones en distintas fechas, con un error de balance inferior al 10%. Así también, la discusión sobre los análisis de las muestras se realiza de acuerdo a los sectores definidos por la toponimia para la cuenca en estudio.

Para graficar los datos se emplearon diagramas de Schoeller, o columnas verticales, que permiten representar las concentraciones de distintos aniones, cationes o una suma de ellos, en miliequivalentes por litro (meq/L) utilizando una escala logarítmica, y uniendo los puntos mediante una línea. Este diagrama permite observar las relaciones entre iones gracias a la inclinación de las líneas, y sirve para estudiar las evoluciones temporales de agua en un mismo punto, así como variaciones de composición en aguas de diferentes localidades.

Para esta labor se catastraron catorce puntos de muestreo que cumplen las consideraciones mencionadas, ubicados en las pampas Batea, Peña Blanca, Sillillica Norte, Sillillica y en el Salar del Huasco. De estos puntos, tres corresponden a cauces superficiales (ríos), cuatro a afloramientos de aguas subterráneas (vertientes o manantiales) y siete a aguas subterráneas (pozos). A continuación se presenta una discusión de los datos.

a) Cauces superficiales

Para la discusión se dispone de un punto de muestreo en el Río Piga en el sector de Pampa Batea (HUAF.108) y dos puntos del Río Collacagua en el sector de Pampa Peña Blanca (HUA.F017 y HUA.F107). Las variaciones de las muestras en el tiempo se presentan en la Figura 7.21.

Para el Río Piga se tiene 6 mediciones realizadas en los años 1998, 1999, 2000 y 2001, obteniéndose composiciones químicas similares de los elementos mayoritarios a través del tiempo, a excepción de la muestra tomada durante el periodo de lluvias (marzo de 1999) que presenta ligeramente una mayor concentración de calcio, bicarbonato y sodio, lo cual concuerda con la clasificación del tipo de agua que presenta este río, es decir, bicarbonatada en su composición aniónica variando entre cálcicas y sódicas en su composición catiónica.

En relación al Río Collacagua a la altura de Pampa Peña Blanca se tienen 12 mediciones, realizadas en el punto HUAF.107 en los años 1984, 1986, 1989, 1998, 1999, 2000 y 2001, así como 11 mediciones en el punto HUAF.017 efectuadas en los años 1983, 1984, 1985, 1986, 1987 y 1989. Se observa para los dos puntos que a través del tiempo las concentraciones de cloruros generalmente tienden a disminuir, no importando si corresponde a un periodo de lluvias o no, sin embargo, las concentraciones de bicarbonato, calcio y sodio se mantienen o

incrementan ligeramente, lo cual es coherente con el tipo de agua que presentan, es decir, bicarbonatadas cálcicas y sódicas, con mayor proporción de sodio.

b) Afloramientos de aguas subterráneas

Comprende a un manantial (HUAF.136) en Pampa Peña Blanca, además de las vertientes Huasco Lípez (HUA.F031), Huasco Norte (HUA.F016.3) y Ermitaño (HUAF.016.5), ubicadas al sur y oeste del salar. Las variaciones temporales de las muestras de agua se muestran en las Figura 7.22 y Figura 7.23, analizadas luego en relación a su ubicación.

Respecto al manantial en el sector de Pampa Peña Blanca se tiene 3 mediciones realizadas los años 1993 y 1994, en que se observa que las composiciones de las aguas presentan características muy similares, demostrando una composición constante en el tiempo, sin ser afectada por la época de lluvia o seca. Así también, se evidencia mayores concentraciones de sodio y bicarbonato, concordantes con la composición bicarbonatada sódica que presenta esta muestra de agua.

Para las vertientes que afloran al oeste del salar (Huasco Norte y Ermitaño), se tienen 2 y 3 mediciones, respectivamente, realizadas en los años 1980, 1981 y 1983. En relación a la vertiente Huasco Norte se observa que existen diferencias entre las dos épocas (lluviosa o húmeda y seca) en las que se muestreo. Durante el periodo húmedo se evidencia un ligero incremento de las concentraciones de cloruro y una disminución del sulfato, mientras que durante la época seca se tiene todo lo contrario. A pesar de estos cambios, las concentraciones de calcio, magnesio, sodio y bicarbonato no se ven influenciadas por los periodos de variaciones, lo que podría indicar que esta vertiente recibiría aportes desde el sur del salar y este de la cuenca, donde se tienen aguas de composiciones sulfatadas.

Las aguas de la vertiente Ermitaño durante la época de lluvias presentan incrementos de las concentraciones de bicarbonato y magnesio, así como una disminución del cloruro, ocurriendo lo contrario durante la época seca. Las concentraciones de calcio, sodio y sulfato se estarían manteniendo a través del tiempo. Estas aguas se caracterizan por presentar composiciones bicarbonatadas cálcicas y sódicas, similares a los cursos superficiales y aguas subterráneas en el norte de la cuenca, que se mantienen todo el año.

La vertiente Huasco Lípez al sur del salar cuenta con 3 mediciones realizadas en periodos secos durante los años 1979, 1983 y 1997. En ellas se observa que las concentraciones de calcio, bicarbonato y sulfato se mantienen en el tiempo, no obstante el sodio y cloruro varían. Las mayores concentraciones corresponden al sulfato, calcio y sodio, lo cual concuerda con la composición química de estas aguas de tipo sulfatadas cálcicas y sódicas.














c) Aguas subterráneas

Se tienen 6 puntos de muestreo de pozos ubicados en las pampas Peña Blanca (HUA.T008 y HUA.T040), Sillillica Norte (HUA.T021 y HUA.T043) y Sillillica (HUA.T045 y HUA.T046), así como una muestra de la puntera P8 (HUA.T069), ubicada en el sur del Salar del Huasco. Las variaciones temporales de las muestras de agua se presentan en las Figura 7.25 a Figura 7.27, cuyo análisis se realiza de acuerdo a su ubicación en la cuenca.

En el sector de Pampa Peña Blanca se tiene el pozo de producción P12 (HUA.T040) y otro de exploración E19 (HUA.T008), donde se cuenta con dos mediciones en cada uno, realizadas en los años 2001, 2002 y 2008. Se observa para P12 diferencias entre las concentraciones de calcio, magnesio, sodio, cloro y bicarbonato en las dos mediciones realizadas en época seca en diferentes años (2001 y 2008), sin embargo, las más altas concentraciones corresponden al bicarbonato, calcio y sodio, que corresponde a la clasificación de estas aguas. Al considerar los niveles piezométricos en este pozo no se observaron grandes variaciones en los años de muestreo, atribuyéndose las diferencias encontradas a la profundidad de muestreo, que depende del acuífero atravesado.

Para el pozo E19 se observa incrementos de las concentraciones de sodio y bicarbonato, y disminución de magnesio y calcio durante la época de lluvias, lo que se asocia con la influencia de las primeras lluvias que estarían recargando el acuífero.

En el sector de Pampa Sillillica Norte se cuenta con dos mediciones para cada uno de los pozos de exploración E14 (HUA.T021) y E11 (HUA.T043), llevadas a cabo en los años 2001, 2002 y 2008. Se observa para el pozo E14 variaciones de las concentraciones de elementos mayoritarios al inicio y después de la época de lluvias, variando principalmente el calcio, magnesio, sodio y cloruro, manteniéndose las concentraciones de sulfato y bicarbonato. El pozo E11 presenta ligeras variaciones de los elementos bicarbonato, cloruro, sodio y calcio, manteniéndose también en este caso las concentraciones de sulfato durante la época de lluvias. Es importante indicar que las aguas subterráneas en este sector cambian su composición química debido a la influencia de las rocas andesíticas de la Formación Sillillica, al este de la cuenca, caracterizándose por se aguas de tipo sulfatadas cálcicas, por lo que mantienen su composición aniónica sulfatada durante la época de lluvia y seca.

En el sector de Pampa Sillillica se tiene un pozo de producción P1 (HUA.T045) y uno de exploración E4 (HUA.T046), que cuentan con 3 y 2 mediciones, respectivamente, realizadas en los años 2000 y 2008. Estas fueron tomadas durante la época seca, existiendo ligeras variaciones en las concentraciones de cloruro y sodio para el pozo P1 y adicionalmente el magnesio para el pozo E4, manteniéndose los demás elementos constantes y especialmente el

sulfato, que presenta la mayor concentración y es característico del tipo de aguas que se presenta en esta zona.

La muestra de agua de la puntera P8 (HUA.T069), ubicada al sur del salar, cuenta con dos mediciones en los años 2001 y 2002, efectuadas al inicio y fin de la época de lluvias. Se observa mayores diferencias en la concentración de sulfato y calcio al iniciarse el periodo de lluvias, lo cual concuerda con la composición química de las aguas de las punteras que se dan en este sector del salar (sulfatadas cálcicas).

7.2.4 Elementos minoritarios y trazas

Este apartado presenta una discusión sobre los datos de elementos minoritarios y trazas. El origen de estos elementos se encuentra relacionado a la lixiviación de minerales durante la meteorización del suelo y disolución de especies en la zona no saturada durante la infiltración, y por la interacción agua-roca durante el movimiento del flujo subterráneo. Entre las reacciones que generan el aumento de las especies disueltas se encuentran la oxidación-reducción, precipitación-disolución y la hidrólisis.

Las muestras que se consideraron para su análisis son aquellas que presentaron más de una medición de elementos minoritarios y trazas, no importando si presentaban un error de balance mayor al 10% como se aplicó a los elementos mayoritarios. Esto, porque la contribución en el balance de las cargas de los elementos minoritarios es mínima, y porque las técnicas de análisis para muchos de estos elementos son otras que las utilizadas para los elementos mayoritarios.

En la Figura 7.28 y Tabla 7.8 se presentan los contenidos extremos y distribuciones de los elementos mencionados, la misma que se describe mediante cuartiles representados por diagramas de caja. De ello se observa que los elementos que presentaron mayor cantidad de puntos de muestreo y altas concentraciones corresponden al arsénico, litio, manganeso, hierro, boro, carbonato, dióxido de silicio y silicio.





















Figura 7.28: Distribución de los elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco.

Elemento	Cantidad	Mínimo	Máximo	Mediana	Percentil 25	Percentil 75
Hg	45	0,00037	0,017	0,001	0,001	0,001
Se	31	0,00011	0,001	0,001	0,00065	0,001
Cd	45	0,001	0,01	0,004	0,001	0,01
Co	19	0,002	0,02	0,01	0,01	0,01
Cr	39	0,001	0,02	0,01	0,001	0,01
Mo	45	0,001	0,04	0,008	0,003	0,01
Ni	17	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
Ag	17	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Pb	47	0,001	0,07	0,01	0,001	0,01
Cu	83	0,001	0,27	0,01	0,009	0,02
NO_2	33	0,007	59,8	0,016	0,01	0,03
Zn	68	0,006	27,7	0,0215	0,01	0,05
Al	48	0,006	9,24	0,02	0,009	0,055
As	116	0,0002	47	0,0485	0,009	0,086
N-NH ₃	29	0,001	0,19	0,07	0,03	0,09
NH_4	28	0,013	0,167	0,09	0,0348	0,116
Li	95	0,001	32,5	0,08	0,007	0,174
F	45	0,1	0,62	0,21	0,17	0,3
Mn	126	0,005	14,51	0,115	0,02	0,309
Ι	18	0,0033	1,14	0,0496	0,010475	0,3825
PO_4^{3-}	21	0,06	1,02	0,303	0,189	0,7
В	143	0,02	457	0,9	0,28	1,405
Fe	175	0,002	908	0,4	0,1	2,61
Br	17	0,02	37,5	0,093	0,051	3,74
CO_3	113	0,02	330,3	1	1	18,4
Si	82	0,005	109	13	1,005	42,5
SiO ₂	82	0,01	233,19	27,8	2,15	90,9

Tabla 7.8: Distribución de los elementos minoritarios y trazas.

La distribución de los elementos minoritarios y trazas de las aguas superficiales se presentan en la Figura 7.29 y Tabla 7.9. La mayor cantidad de puntos de muestreo, que coinciden con que presentaron las concentraciones más altas corresponden a los elementos de arsénico, boro, dióxido de silicio, silicio, hierro, litio y carbonato.

Elemento	Cantidad	Mínimo	Máximo	Mediana	Percentil 25	Percentil 75
Hg	17	0,001	0,017	0,001	0,001	0,001
Se	3	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Co	17	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010
Cd	17	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Cr	17	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010
Ag	17	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010
Pb	17	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010
Ni	17	0,010	0,030	0,010	0,010	0,010
Mo	17	0,010	0,040	0,010	0,010	0,010
Cu	54	0,010	0,100	0,010	0,010	0,038
Zn	29	0,010	0,860	0,010	0,010	0,040
As	84	0,000	47	0,057	0,027	0,109
Al	11	0,020	9,240	0,080	0,030	0,185
N-NH ₃	1	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190
Li	57	0,002	32,5	0,140	0,076	0,2
Mn	69	0,010	1,100	0,060	0,010	0,2
PO_4^{3-}	11	0,060	0,303	0,189	0,154	0,263
F	17	0,120	0,600	0,220	0,200	0,380
Ι	16	0,003	1,140	0,058	0,010	0,493
Fe	85	0,030	6,870	0,190	0,080	1,080
В	102	0,020	457	1	0,5	1,428
Br	16	0,02	37,5	0,093	0,051	4,3575
CO_3	54	0,02	205,7	1	0,675	14,225
NO_2	5	0,69	59,8	19,1	3,9	46
Si	43	0,005	106	19,9	12,1	47,8
SiO ₂	43	0,01	226,8	42,62	25,8	102,4

Tabla 7.9: Distribución de los elementos minoritarios y trazas de las aguas superficiales.



Figura 7.29: Distribución de los elementos minoritarios y trazas de las aguas superficiales.

Para el caso de las aguas subterráneas, la distribución de los elementos minoritarios y trazas se presenta en la Figura 7.30 y Tabla 7.10. Se observa que el número de muestras es mayor que el de las aguas superficiales y las concentraciones más altas registradas corresponden al boro, dióxido de silicio, silicio, hierro, manganeso y carbonato, al igual que los elementos presentados en las muestras de las aguas superficiales.

Elemento	Cantidad	Mínimo	Máximo	Mediana	Percentil 25	Percentil 75
Se	28	0,000	0,001	0,001	0,0001	0,001
Hg	28	0,000	0,006	0,001	0,000	0,001
Cd	28	0,001	0,004	0,001	0,001	0,003
Cr	22	0,001	0,020	0,001	0,001	0,004
Co	2	0,002	0,005	0,0035	0,00275	0,00425
Mo	28	0,001	0,014	0,005	0,002	0,007
Cu	29	0,001	0,270	0,007	0,003	0,009
Pb	30	0,001	0,070	0,001	0,001	0,017
NO_2	28	0,007	0,039	0,015	0,010	0,023
As	31	0,001	0,460	0,003	0,001	0,030
Al	37	0,006	0,470	0,014	0,008	0,030
Li	38	0,001	0,510	0,007	0,004	0,031
Ι	1	0,0331	0,0331	0,0331	0,0331	0,0331
Zn	39	0,006	27,7	0,03	0,0135	0,055
N-NH ₃	28	0,001	0,130	0,070	0,027	0,090
NH_4	28	0,013	0,167	0,090	0,035	0,116
F	28	0,100	0,620	0,190	0,165	0,235
Mn	57	0,005	14,510	0,200	0,040	0,680
PO_4^{3-}	10	0,430	1,020	0,715	0,613	0,815
Br	1	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
В	41	0,05	2,8	0,2	0,1	1,2
Fe	90	0,00	908,0	1,1	0,2	9,3
Si	39	0,00	109,0	2,3	0,3	18,6
SiO_2	39	0,01	233,2	5,0	0,7	39,7
CO_3	59	0,02	330,3	1,0	1,0	43,6

Tabla 7.10: Distribución de los elementos minoritarios y trazas de las aguas subterránea	Fabla	abla	la 7.10: Di	stribución	de los	elementos	minorita	rios y tra	zas de l	las aguas	subterránea
--	--------------	------	-------------	------------	--------	-----------	----------	------------	----------	-----------	-------------



Figura 7.30: Distribución de los elementos minoritarios y trazas de las aguas subterráneas.

Para ver la influencia de las sales disueltas en la concentración de los elementos minoritarios, se graficó la conductividad eléctrica versus los elementos que registraron las concentraciones más altas, como son arsénico, boro, litio, carbonato, hierro, manganeso, dióxido de silicio y silicio. Las muestras fueron agrupadas según tipo de fuente en cauces superficiales, aguas subterráneas, afloramientos, aguas superficiales estancadas y precipitación.

La distribución de las concentraciones de arsénico, litio y boro son similares (Figura 7.31 y Figura 7.32), observándose que generalmente las muestras de todas las fuentes presentan concentraciones de los elementos mencionados en el rango de 0,001 a 10 mg/L y conductividades eléctricas que varían de 10 a 1.000 μ S/cm. La excepción fueron las muestras de las aguas superficiales estancadas ubicadas en el mismo salar, las que presentaron las más altas concentraciones de arsénico, boro y litio, en el rango de 1,0 a 1.000 mg/L con conductividades eléctricas mayores a 1.000 μ S/cm. Esto demostraría la importancia de la evaporación que se da en el salar en el incremento de la concentración de estos elementos. También diversos autores atribuyen un origen termal al litio, boro (Risacher et al., 1999) y arsénico (Fernández et al., 2005), asociando este último elemento también al ascenso de fluidos magmáticos y emisiones volcánicas a la atmósfera.

Las aguas superficiales estancadas (lagunas y pozas) y las aguas subterráneas (principalmente las punteras), ubicadas en el mismo salar y su entorno, respectivamente, presentan valores importantes de carbonato (Figura 7.32) variando entre 1,0 y 1.000 mg/L, con conductividades eléctricas superiores a 500 μ S/cm, indicando el efecto de la evaporación en la concentración de este elemento, evidenciado tanto en las aguas superficiales como en las subterráneas.

Respecto al hierro y manganeso, se observa en la Figura 7.33 que su distribución es muy similar, es decir, las concentraciones importantes (0,01 a 1.000 mg/L) de estos elementos se evidencian principalmente en las aguas subterráneas, la que no depende necesariamente de la concentración de las sales disueltas y por lo tanto de la afectación de la evaporación. De acuerdo a Orrego (2002), el origen de estos elementos en la zona norte de Chile es natural.

El contenido de dióxido de silicio y silicio (Figura 7.34) muestra valores disímiles a lo largo de la cuenca, presentando las concentraciones más altas los cauces superficiales (19,0 a 156,4 mg/L) y afloramientos de aguas subterráneas (20,2 a 226,8 mg/L), no importando su ubicación en la cuenca ni su relación con el contenido de sales disueltas. En el caso de las aguas subterráneas, principalmente las muestras de pozos, se tiene algunos valores altos en los sectores de Pampa Peña Blanca (19,1 a 198,5 mg/L), Pampa Sillillica (87,8 y 216,1 mg/L), Pampa Sillillica Norte (50,2 a 233,2), Pampa Rinconada (61,3 y 131 mg/L) y Salar del Huasco (38,0 y 81,0 mg/L). Concentraciones bajas se evidenciaron en el sector de Collacagua (1,2 y 0,55 mg/L) y Pampa Batea (2,34 y 5 mg/L). Las aguas superficiales estancadas presentaron concentraciones moderadas, en el rango de 12,0 a 36,0 mg/L.



Figura 7.31: Distribución de concentraciones de Arsénico y Boro en relación con la conductividad eléctrica para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco.



Figura 7.32: Distribución de concentraciones de Litio y Carbonato en relación con la conductividad eléctrica para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco.



Figura 7.33: Distribución de concentraciones de Hierro y Manganeso en relación con la conductividad eléctrica para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco.



Figura 7.34: Distribución de concentraciones de Dióxido de Silicio y Silicio en relación con la conductividad eléctrica para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco. Con el fin de observar la distribución de los elementos minoritarios a lo largo de la cuenca se consideró aquellos puntos de muestreo que presentan mayor cantidad de datos con concentraciones importantes y coordenadas UTM, de manera de para poder representarlos en un mapa. Las aguas fueron agrupadas teniendo en cuenta el tipo de fuente. El tamaño de los símbolos en los mapas generados es proporcional a las concentraciones medidas de cada elemento.

En la zona del salar se evidencian las más altas concentraciones de arsénico, boro y litio (Figura 7.35 y Figura 7.36), específicamente para las aguas superficiales debido a la evaporación que está afectando la concentración de estos elementos, considerando que los mismos presentan bajas concentraciones en las rocas.

Las aguas subterráneas en el salar y su entorno presentan elevadas concentraciones de carbonato (Figura 7.36), que también se deberían a la evaporación que afecta esta zona y que influencia de manera importante la concentración de este elemento.

Las altas concentraciones de dióxido de silicio y silicio (Figura 7.37) se evidencian tanto en las aguas superficiales como en las aguas subterráneas, no importando su ubicación en la cuenca, y por lo tanto su concentración no estaría afectada por la evaporación. En las aguas subterráneas, de acuerdo a Acosta (2004), la concentración de dióxido de silicio podría estar asociada a la neoformación de minerales de arcilla en el acuífero medio, como resultado de la interacción del silicio disuelto en el agua con los materiales de la Formación Collacagua.

El hierro y manganeso (Figura 7.38) evidencian concentraciones altas en las muestras de las aguas subterráneas, sin importar su ubicación en la cuenca, y en consecuencia tampoco la influencia de la evaporación. Tal como se ha indicado, las concentraciones de estos elementos son de origen natural.



Figura 7.35: Concentraciones totales de boro y arsénico para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco.



Figura 7.36: Concentraciones totales de carbonato y litio para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco.



Figura 7.37: Concentraciones totales de dióxido de silicio y silicio para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco.



Figura 7.38: Concentraciones totales de manganeso y hierro para las muestras de elementos minoritarios y trazas en la cuenca Salar del Huasco.

7.3 Datos Isotópicos y Relación con la Química

Para el desarrollo de este apartado, se ha contado con 128 datos isotópicos de deuterio (²H) y oxígeno-18 (¹⁸O), en 88 puntos de la cuenca, cuya ubicación se observa en la Figura 7.2.

Para el trabajo con estos datos, expresados como δ^2 H y δ^{18} O, se utilizó como referencia la Recta Meteórica Mundial (MWL, por sus siglas en inglés) definida por Craig (1961):

$$\delta^2 H = 8 \cdot \delta^{18} O + 10$$

También se utilizó la recta meteórica sin exceso de deuterio (término libre en la MWL) y la Recta Meteórica Local (LMWL), definida por Aravena et al. (1999) para el norte de Chile:

$$\delta^2 H = 7, 8 \cdot \delta^{18} O + 9, 7$$

Las composiciones isotópicas de cualquier lluvia presentan una relación entre ellas que las sitúa sobre la MWL, y en cada localidad sobre la LMWL, muy parecida a la anterior. Considerando que en el Altiplano chileno la precipitación es la única fuente de recarga de los acuíferos, es muy probable que la composición de las lluvias sea parecida a la de las aguas subterráneas. Sin embargo, parte de las aguas de lluvia no llegan a recargar al acuífero porque son afectadas por la evaporación cuando se encuentran como humedad del suelo. Así, las aguas de recarga en el acuífero son aguas mezcla entre la composición promedio de las lluvias y de éstas con una cierta afección por la evaporación, por lo que su composición se sitúa entre la recta MWL y la recta MWL sin exceso de deuterio.

En la Figura 7.39 se presenta los valores disponibles de δ^2 H y δ^{18} O de las aguas de precipitación, afloramientos de aguas subterráneas y aguas subterráneas de la cuenca del Salar del Huasco y su relación con las rectas MWL, LMWL y MWL sin exceso de deuterio. Se puede apreciar que las aguas de lluvia generalmente se ubican sobre la MWL y LMWL, sin embargo, esta tendencia no se mantiene para las aguas de pozos, punteras, manantiales, vertientes y afloramientos, las que tienden a alejarse de las rectas mencionadas debido probablemente a la evaporación en la zona no saturada de las áreas de recarga. Este proceso enriquece el contenido isotópico de estas aguas, lo que se preserva en las napas.

En relación a las aguas superficiales (Figura 7.40), se observa que las muestras de ríos, lagunas y pozas tienden a alejarse de las MWL, LMWL y MWL sin exceso de deuterio mucho más que las aguas subterráneas, especialmente aquellas muestras de lagunas ubicadas en el Salar del Huasco. Estas últimas se encuentran enriquecidas en su contenido isotópico producto de la evaporación, y se caracterizan por ser aguas de tipo sulfatadas y cloruradas sódicas. Las muestras menos enriquecidas isotópicamente son las correspondientes a ríos y pozas.



Figura 7.39: Relación $\delta^2 H / \delta^{18} O$ de las aguas subterráneas y precipitación en la cuenca del Salar del Huasco.



Figura 7.40: Relación $\delta^2 H/\delta^{18}O$ de las aguas superficiales en la cuenca del Salar del Huasco.

El enriquecimiento isotópico de las muestras de aguas superficiales y subterráneas por efecto de la evaporación, como se ha mencionado anteriormente, se evidencia principalmente en los sectores de Pampa Sillilica Norte, Pampa Huasco y Salar del Huasco (Figura 7.41).



Figura 7.41: Relación $\delta^2 H/\delta^{18}$ O de las aguas en los sectores de la Cuenca del Salar del Huasco.

En el sector de Pampa Sillillica Norte (Figura 7.42) se observa que existe una muestra del pozo de exploración E12 (HUA.T042), enriquecida en su composición isotópica y que se ubica en el gráfico fuera de la MWL y la MWL sin exceso de deuterio. El pH de la muestra es de 8,15 y su conductividad eléctrica de 264 μ S/cm, siendo un agua bicarbonatada cálcica. Su enriquecimiento isotópico estaría dado por efecto de la evaporación que afecta la precipitación y que se estaría preservando en las aguas subterráneas.



Figura 7.42: Relación $\delta^2 H / \delta^{18} O$ de las aguas de pozos en el sector Pampa Sillillica Norte.

También en este sector se hace evidente el enriquecimiento de la muestra de río de código HUA.F109 (Figura 7.43), correspondiente al Río Collacagua en término, de pH igual a 8,15, conductividad eléctrica de 695 µS/cm y de tipo de agua bicarbonatada sódica. Para explicar este enriquecimiento isotópico, se ha considerado la evolución isotópica que presentan los cauces superficiales de la mitad norte de la cuenca de estudio. Se observan bajos contenidos isotópicos en las muestras de los ríos Piga y Collacagua a la altura del caserío Collacagua, sin embargo, aguas abajo de este sector los aportes del Río Batea no son capaces de justificar por si solos el enriquecimiento isotópico que muestra el Río Collacagua a la altura de Pampa Batea, Peña Blanca y menos aún a la latitud de Sillillica Norte. La ausencia de otros aportes superficiales permanentes conocidos, indicaría que la evaporación en el cauce podría ser la causa más probable del enriquecimiento isotópico del Río Collacagua.

La influencia de aportes afectados por hidrotermalismo, que enriquecen también el contenido isotópico, podría ser otra posible causa para los valores encontrados. Sin embargo, aportes de este origen no han sido identificados hasta el momento por ningún autor que ha estudiado la cuenca.



Figura 7.43: Relación $\delta^2 H/\delta^{18}$ O de las aguas de cauces superficiales en la cuenca del Salar del Huasco.

En el sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco se observa que las muestras de pozos y punteras se encuentran agrupadas y tienden a alejarse ligeramente de la MWL y la LMWL (Figura 7.44), debido al efecto de la evaporación. Para el caso de las muestras de punteras ubicadas en el norte, noroeste y oeste del salar (Figura 7.45), se evidencia un mayor alejamiento de las rectas de referencia mencionadas, también debido a un efecto significativo de la evaporación (mayor tiempo de contacto con la atmósfera). Las muestras de las punteras ubicadas en el sur y suroeste del salar no presentan evidencias de evaporación, ya que se ubican entre las rectas de MWL, LMWL y MWL sin exceso de deuterio, a excepción de la muestra de código HUA.T073 correspondiente a la puntera P-17. Esto podría atribuirse a que no existe contacto directo entre el agua subterránea y la atmósfera que permita desarrollar un perfil de fraccionamiento isotópico por evaporación, o que el referido perfil se desarrolla a una menor profundidad que los puntos donde fueron muestreados.



Figura 7.44: Relación $\delta^2 H / \delta^{18} O$ de aguas de punteras en Pampa Huasco y Salar del Huasco.



Figura 7.45: Relación $\delta^2 H/\delta^{18} O$ de aguas de punteras en función de ubicación en el salar.

En relación a los afloramientos de las aguas subterráneas en el Salar del Huasco (Figura 7.46), se evidencia un alto enriquecimiento isotópico de la muestra de agua de vertiente HUA.F093, ubicada al suroeste del salar, que tiene un pH de 7,53 y una conductividad eléctrica de 2.240 μ S/cm. También se aprecia en la Figura 7.46 un ligero enriquecimiento isotópico de la muestra de un manantial (HUA.F051) ubicado al sur del salar, que presenta un pH de 7,66 y una conductividad eléctrica de 6.180 μ S/cm. Por lo general las vertientes ubicadas al sur, oeste y noroeste del salar no presentan evidencias de evaporación, (Figura 7.47).



Figura 7.46: Relación $\delta 2H/\delta 180$ de los afloramientos de aguas subterráneas en el sector del Salar del Huasco.

Las aguas superficiales tomadas en la laguna principal (HUA.F083, HUA.F085, HUA.F086, HUA.F087, HUA.F088), las lagunas ubicadas al norte (HUA.F081), este (HUA.F089), noroeste (HUA.F091) y noreste (HUA.F090) del Salar del Huasco, así como la laguna terminal Huasco Norte (HUA.F095) presentan un gran enriquecimiento isotópico (Figura 7.48). Estas aguas se caracterizan por presentar valores de pH en el rango de 7,71 – 8,67 y conductividades eléctricas entre 678 a 335.000 μ S/cm. Este enriquecimiento se evidencia principalmente en las muestras tomadas en las lagunas ubicadas en el sistema al interior del salar, relacionado con la evaporación que se da allí. Se destaca que las aguas de pozas ubicadas al suroeste del salar (Figura 7.49) no se encuentran afectadas por la evaporación.



Figura 7.47: Relación $\delta 2H/\delta 180$ de los afloramientos de aguas subterráneas en relación a su ubicación en el Salar del Huasco.



Figura 7.48: Relación $\delta^2 H/\delta^{18} O$ de las aguas superficiales el sector del Salar del Huasco.



Figura 7.49: Relación $\delta^2 H/\delta^{18}$ O de las aguas superficiales en relación a su ubicación del Salar del Huasco.

Con el fin de determinar el efecto de la evaporación en las aguas superficiales y subterráneas en el Salar del Huasco, se graficó el isótopo oxígeno-18 (δ^{18} O) en función de la conductividad eléctrica, representando el δ^{18} O la evaporación de las aguas y la conductividad eléctrica el contenido de sales disueltas en éstas. Los gráficos de aguas subterráneas (Figura 7.50) y de afloramientos de aguas subterráneas (Figura 7.51) no evidencian una correlación entre los parámetros. Se observan valores elevados de conductividad eléctrica sin presentar incrementos significativos de δ^{18} O. En la zona en particular, donde se encuentra el valor de alta conductividad hidráulica, no se han observado efectos de evaporación significativos, por lo que puede corresponder a una muestra tomada no en el propio afloramiento sino en una zona difusa, donde haya ocurrido una disolución de sales. El mismo aspecto también es observado en las aguas superficiales (Figura 7.52), a excepción de las muestras de la laguna principal. En el caso de la laguna ubicada al oeste del salar, la conductividad que presenta es muy baja, lo que es coherente con las dos punteras (P3 y P20) ubicadas al oeste del salar, aunque con valores de deuterio y oxígeno-18 más altos. Se ha mencionado que las zonas norte, noroeste y oeste son las que se encuentran sometidas al efecto de la evaporación, pero esta en particular puede recibir un aporte subterráneo sustantivo, que disminuye la concentración de sales en dicho sector.







Figura 7.51: Correlación entre δ^{18} O y Cond. Eléctrica de los afloramientos de aguas subterráneas del sector Salar del Huasco.


Figura 7.52: Correlación entre δ^{18} O y Cond. Eléctrica de las aguas superficiales en el sector del Salar del Huasco.

Para el caso de la poza ubicada al suroeste del salar (Figura 7.52), no se contó con el reporte de laboratorio. El valor de conductividad eléctrica no guarda relación con los valores reportados de las punteras ubicadas en este sector del salar, por lo que puede considerarse un error de medición dada la improbabilidad de esta singularidad.

8 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

El objetivo de este capítulo es caracterizar los acuíferos de la cuenca Salar del Huasco, que corresponde a la cuenca piloto de la I Región de Tarapacá. Para efectos de este estudio, se presentan las unidades hidrogeológicas, sus propiedades hidráulicas y la dirección seguida por el agua subterránea. Se realiza además una estimación de la recarga del sistema hidrogeológico. Cabe señalar que a la fecha ña cuenca Salar del Huasco no ha sido explotada, por lo que se considera que corresponde a un sistema en condición natural de equilibrio.

La mayor parte de la información utilizada para el trabajo presentado a continuación se encuentra disponible en los diversos antecedentes revisados, a excepción de algunas labores de terreno orientadas a medir evaporación, análisis químicos e isotópicos de aguas y recolección de estadísticas de precipitación. Estas fueron realizadas dentro de las actividades del Convenio DGA–PUC (DIHA) para complementar lo que se desglosara de la recopilación, sistematización y análisis de las referencias.

La mayoría de los pozos perforados en la cuenca se encuentran en las partes más bajas de la misma, donde se reconocen las mayores potencias sedimentarias. Agrupando la información litoestratigráfica de pozos, pueden reconocerse tres unidades hidrogeológicas, en que la unidad inferior está constituída por una roca volcánica con potencial acuífero asociado a su permeabilidad secundaria (fracturamiento). Por sobre dicha unidad, se encuentran depósitos sedimentarios terciarios y cuaternarios, que definen otros niveles acuíferos.

Las isopiezas indican que los flujos subterráneos escurren predominantemente en sentido norte-sur, con algunos aportes en sentido noreste-suroeste en el sector de Pampa Sillillica, y este-oeste en Pampa Rinconada. La pendiente del nivel freático muestra un aumento en la medida que crece la distancia hacia el salar, lo que permite suponer una diferencia en la permeabilidad de los suelos o una disminución en la velocidad del flujo asociada a un incremento en la sección pasante.

La conductividad hidráulica (K) y el coeficiente de almacenamiento (S) se estimaron en base al análisis de las pruebas de bombeo disponibles. Sus valores son reportados de acuerdo a las zonas de interés hidrogeológico. En estas zonas se encuentra la Pampa Sillillica, Pampa Rinconada, Sillillica Norte, Pampa Peña Blanca y Pampa Batea, y Río Batea y Caserío Collacagua. Las máximas conductividades son del orden de 61 m/d en el sector de Sillillica Norte, mismo sector donde se reportan las mínimas, inferiores a 1 m/d. Los datos de coeficiente de almacenamiento disponibles en toda la cuenca, indican que el acuífero varía de semiconfinado a confinado. Se discute en este capítulo sobre la conexión hidrogeológica con otras cuencas, en particular sobre aquellas en las que se han planteado hipótesis previas a este estudio como es la Pampa del Tamarugal. Aquí se plantea que la discusión no está cerrada, aunque se han hechos esfuerzos por dilucidarlo usando herramientas isotópicas e hidroquímicas, aunque hasta ahora no completamente enfocada a este aspecto. El modelo conceptual utilizado para entender el funcionamiento de la cuenca considera las únicas salidas probadas del sistema, con lo que se estimó la recarga de largo plazo. Las descargas están formadas principalmente por la evaporación desde el área del salar y la evapotranspiración desde la vegetación en ésta y otras áreas de la hoya hidrográfica. El balance hídrico en la cuenca se realizó considerando la información más fidedigna de la que se dispuso, discutiéndose las posibles fuentes que lleven a un error de cierre más acotado.

8.1 Geometría Acuífera y Unidades Hidrogeológicas

La distribución de los pozos es tal, que éstos se ubican en las partes más bajas de la cuenca, donde se encuentran las mayores potencias sedimentarias. Agrupando la información de los 7 perfiles descritos en el apartado 5.5 (página 86), pueden reconocerse tres unidades hidrogeológicas. La cuenca se conforma por un basamento volcánico fracturado, donde rocas ignimbríticas del Mioceno (Tsih) se distribuyen hacia el oeste de la cuenca y se ponen en contacto, por fallamiento normal, con rocas volcánicas del Mioceno superior – Plioceno, hacia el este. Existen pruebas de bombeo que indican que el alto grado de fracturamiento de estas rocas le otorga un potencial acuífero asociado a permeabilidad secundaria. Entre ambas unidades de roca se forma una depresión estructural, que permite una depositación prolongada de sedimentos terciarios, que conforman al segundo potencial acuífero. Finalmente, se consideran los depósitos sedimentarios cuaternarios también como una unidad hidrogeológica, aunque de poca potencia, que cubre toda la depresión estructural.

Acuífero Superior

Se compone por el conjunto de depósitos sedimentarios que recubren de manera uniforme a las unidades más antiguas. Los depósitos que conforman esta unidad hidrogeológica son los depósitos aluviales (Qal), que se reconocen en Pampa Rinconada; depósitos fluviales (Qf), que se reconocen sobre el lecho del Río Collacagua, depósitos aluviales de ceniza y lapilli (Qipe), en Pampa Sillillica, Ignimbrita Pastillos (Qip) en Pampa Batea; y los depósitos de salar (Qs), que conforman el Salar del Huasco. Excluyendo a Qs, estos depósitos son de alta permabilidad. Como señala Acosta (2004), se trata de depósitos con una conductividad hidráulica importante, de 6 - 60 m/día, sin embargo, su distribución es restringida. En los perfiles hidrogeológicos (ANEXO V), donde se ha representado con color amarillo, se puede observar que mantiene un espesor constante (~50 m) a lo largo del valle del Río Collacagua

(perfil A-A'). En el norte (perfiles U-U' y V-V') se limita a la ribera este del río y la ladera de los centros volcánicos, donde su espesor varía entre 50 y 100 m, alojado principalmente en la Ignimbrita Pastillos. Los perfiles W-W' y X-X' realizados en Pampa Sillillica indican que en este sector se aloja en depósitos de ceniza (Qipe), cuyo espesor promedio es de 50 m y aumenta a 100 m hacia el NNW. En el sector sur de la cuenca se limita a formar una delgada cobertura sobre los acuíferos medio e inferior. Corresponde a depósitos evaporíticos y aluviales.

Acuífero Medio

El acuífero medio está formado por los depósitos terciarios, que se correlacionan con las unidades Media e Inferior de la Formación Collacagua. Esta unidad hidrogeológica se compone por una secuencia rítmica de gravas con altos porcentajes de arcilla (> 50%), y gravas con bajos porcentajes de arcilla (< 50%). Además, es común encontrar entre estos depósitos horizontes de puras gravas o arcillas. Siguiendo el eje principal de la cuenca (Perfil A-A' en ANEXO V), se reconoce en el techo de la unidad una capa de arcilla hacia el sur, y muy altos contenidos de arcilla hacia el norte, lo que tiene efecto semi-confinante. Su espesor es variable, acuñándose en algunos sectores y alcanzando potencias de poco más de 100 m en Pampa Batea (perfiles U-U' y V-V') y hasta 200 m en Pampa Sillillica (perfiles W-W' y X-X'). En estos perfiles que describen las pampas, se reconocen también horizontes más arcillosos y de toba hacia la base de la unidad, reduciendo el potencial hidrogeológico localmente. A pesar de los altos contenidos de arcilla, existen datos que indican que la unidad posee una alta permeabilidad, y corresponde al acuífero principal (Acosta, 2004). En el sector del salar se presenta con ligeras variaciones, ya que su cobertura es muy delgada, litológicamente presenta mayores porcentajes de arcilla y su espesor se mantiene constante, cercano a los 180 m, excepto en los márgenes de la depresión que rellena, cuya base son los depósitos volcánicos del acuífero inferior.

Acuífero Inferior

Se compone por la Ignimbrita Huasco (Tsih) y las lavas del Mioceno superior – Plioceno (TMv – TPv). Corresponde a lo que se podría definir como el basamento de la cuenca sedimentaria. Este basamento constituye un medio altamente fracturado, permitiendo el almacenamiento del recurso. Estos paquetes formacionales configuran un medio heterogéneo, ya que además de la variabilidad espacial en el desarrollo de fracturas, se presentan intercalaciones de lavas, tobas y zonas de alteración, como señala Acosta (2004). Perforaciones realizadas en el marco del mismo estudio, indican que su espesor superaría los 250 m en la parte central de la cuenca. Al este del salar, donde una importante zona de falla incrementa la permeabilidad de la roca, se han estimado conductividades de 0,5 y 13 m/d (Acosta, 2004).

8.2 Piezometría del Acuífero

Con el fin de determinar los niveles de agua subterránea en la cuenca Salar del Huasco, se llevó a cabo mediciones en gran parte de los sondajes habilitados, durante los trabajos de campo realizados en septiembre de 2008. Así también, se ha recopilado información de tipo puntual de diferentes estudios que han efectuado mediciones de niveles piezométricos en la referida cuenca.

La ubicación de los puntos de medición se presenta en la Tabla 8.1. La información correspondiente a ubicación y elevación de los pozos fue tomada de Acosta (2004). Este trabajo es uno de los que aporta más datos en la cuenca, y cuya información es coincidente con los valores determinados durante la construcción de los mismos y la información proporcionada por Modelos de Elevación Digital. Los antecedentes de los pozos E25, E27 y P14 corresponden a mediciones efectuadas por INVEREX (2000-2002), ya que éstos no fueron considerados por Acosta.

Dogo	Tononimio	Coordenadas U	TM (PSAD 56)	Elevación
F OZO	roponnina	Norte	Este	(msnm)
E7	Pampa Rinconada	7.752.890,390	525.800,154	3.819,304
E8	Pampa Rinconada	7.751.913,575	525.912,975	3.816,806
E9	Pampa Rinconada	7.753.802,010	525.700,823	3.826,926
E10	Pampa Rinconada	7.754.812,297	525.594,408	3.839,194
P5	Pampa Rinconada	7.752.924,238	525.789,721	3.819,117
P6	Pampa Rinconada	7.751.957,054	525.912,249	3.816,729
P7	Pampa Rinconada	7.753.770,668	525.716,349	3.826,539
E1	Pampa Sillillica	7.765.349,765	520.502,198	3.894,611
E2	Pampa Sillillica	7.765.996,470	521.615,835	3.928,470
E3	Pampa Sillillica	7.764.203,319	520.985,728	3.883,067
E4	Pampa Sillillica	7.763.086,665	521.476,793	3.862,967
E5	Pampa Sillillica	7.766.498,664	520.358,307	3.899,015
E6	Pampa Sillillica	7.767.647,579	520.217,440	3.905,578
P1	Pampa Sillillica	7.765.368,885	520.535,575	3.895,584
P2	Pampa Sillillica	7.767.653,126	520.257,621	3.907,010
P3	Pampa Sillillica	7.766.497,123	520.398,203	3.900,326

Tabla 8.1: Listado de puntos de medición de niveles de agua subterránea en la cuenca Salar del Huasco.

Dozo	Toponimio	Coordenadas U	TM (PSAD 56)	Elevación
F OZO	ropomma	Norte	Este	(msnm)
P4	Pampa Sillillica	7.763.075,942	521.439,467	3.862,205
E11	Sillillica Norte	7.771.072,000	516.779,000	3.829,331
E12	Sillillica Norte	7.771.075,000	516.792,000	3.829,121
E13	Sillillica Norte	7.771.111,000	517.781,000	3.846,208
E14	Sillillica Norte	7.772.227,000	516.693,000	3.837,017
E15	Sillillica Norte	7.772.205,000	516.701,000	3.836,965
E16	Sillillica Norte	7.773.315,000	516.830,000	3.841,043
E17	Sillillica Norte	7.772.682,000	517.838,000	3.844,729
E27	Sillillica Norte	7.770.791,000	514.885,000	3.872,990
P8	Sillillica Norte	7.771.074,000	516.811,000	3.829,144
P8A	Sillillica Norte	7.771.097,000	516.755,000	3.829,428
P9	Sillillica Norte	7.772.697,000	517.834,000	3.844,965
P10	Sillillica Norte	7.773.309,000	516.790,000	3.840,897
P11	Sillillica Norte	7.771.101,000	517.780,000	3.846,216
P14	Sillillica Norte	7.770.830,000	514.879,000	3.872,430
E18	Peña Blanca	7.777.863,000	516.757,000	3.855,446
E19	Peña Blanca	7.780.062,000	516.112,000	3.864,143
E20	Peña Blanca	7.776.523,000	518.983,000	3.962,465
E24	Peña Blanca	7.780.032,000	516.122,000	3.863,920
E26x	Peña Blanca	7.780.380,000	514.184,000	4.023,380
P12	Peña Blanca	7.780.033,000	516.145,000	3.864,092
E21	Pampa Batea	7.780.888,000	519.593,000	4.025,783
E22	Río Batea	7.782.944,000	520.287,000	4.011,286
E25	Río Batea	7.782.900,000	520.261,000	4.009,860
P13	Río Batea	7.782.905,000	520.272,000	4.009,560
E23	Caserío Collacagua	7.783.842,000	517.413,000	3.900,402
J-10	Pampa Sillillica	7.766.376,930	517.667,310	3.835,773
J-G	Pampa Peña Blanca	7.776.054,000	516.750,000	3.847,216
Hsc-Sur	Salar Sur	7.753.936,040	512.689,950	3.786,223
P-Erm	Salar Norte	7.757.706,000	518.401,000	3783,955

Tabla 8.1: Listado de puntos de medición de niveles de agua subterránea en la cuenca Salar del Huasco (Continuación)

Los registros de nivel de agua subterránea obtenidos el 2008 durante el desarrollo del presente estudio (Tabla 8.2) se comparan con mediciones previas, como las efectuadas por INVEREX durante la construcción y monitoreo de los pozos de exploración (años 2000 a 2002), así como con los datos tomados por Collahuasi– GP Consultores en 2002 y los presentados por Acosta (2004). Los valores de la profundidad del nivel estático medidos en las diferentes campañas fueron correlacionados con las cotas de terreno y las alturas de brocal, asociadas a cada pozo con el fin de obtener el nivel de las aguas subterráneas en relación al nivel medio del mar. No se cuenta con datos de altura de brocal para los pozos E27 y P14, debido a esto se les asignó un valor de 0,41 m equivalente a la altura de brocal media de todos los pozos que poseen información. Por su parte, no se cuenta con ningún registro de nivel en el pozo E25.

De los valores presentados en la Tabla 8.2, se observa que los niveles del agua subterránea durante los años 2001, 2002 y 2008, en la mayoría de los pozos no presentan variaciones significativas, por lo que se asume que el sistema acuífero se encuentra en equilibrio, lo que es consistente con el hecho de que no ha sido explotada a la fecha.

La profundidad de las aguas subterráneas posee una fuerte relación con la topografía de la cuenca y con la red de drenaje principal, revelando una probable conexión hidráulica entre el acuífero y el Río Collacagua. Los rangos de profundidad observados en los distintos sectores de la cuenca se describen a continuación. En la Figura 8.1 se muestra los pozos con cota de niveles de la napa de acuerdo al trabajo realizado por Acosta (2004).

- Pampa Rinconada: valor medio de 39 m, con un rango comprendido entre 32 y 53 m. Los pozos habilitados en la zona se ubican a una elevación media de 3.823 msnm y se encuentran en las cercanías de quebradas con escurrimientos esporádicos.
- Pampa Sillillica: Las profundidades del nivel estático van desde los 65 a los 97 m, con una media de 89 m. La elevación media de los sondajes es de 3.890 msnm y se ubican a 4 km de distancia del Río Collacagua.
- Sillillica Norte: Si bien los pozos ubicados en esta zona presentan una elevación mayor a la registrada en Pampa Rinconada, con una media de 3.840 msnm, los niveles estáticos son más someros, con una profundidad media de 21 m, y valores mínimos y máximos de 11 y 47 m. A diferencia de lo ocurrido en Pampa Rinconada, los sondajes de Sillillica Norte fueron instalados en las cercanías del Río Collacagua (alrededor de 400 m de distancia)
- Peña Blanca: La gran mayoría de los pozos habilitados presenta profundidades menores a 3 m, las excepciones son los pozos E26x y E20, con profundidades de 86 y 102 m, respectivamente. Estos dos pozos se ubican a más de 2 km del Río Collacagua, mientras que los restantes se distancian del cauce en unos 200 m.

Tabla	8.2: Medicion	les de nivel esté	ítico (NE) de	e agua subteri	ránea en l	la Cuenca de	l Salar del Hu	lasco.		
Pozo	NE Construcción (1) [m]	NE Construcción (1) [msnm]	NE INVEREX (2) [m]	NE INVEREX (2) [msnm]	NE Acosta (3) [m]	NE Acosta (3) [msnm]	NE CMDIC-GP (4) [m]	NE CMDIC-GP (4) [msnm]	NE PUC-DGA (5) [m]	NE PUC-DGA (5) [msnm]
E7	34,94	3784,83	34,77	3785,00	34,76	3785,00	34,73	3785,04	34,67	3785,10
E8	32,67	3784,58	32,47	3784,78	32,46	3784,79	32,49	3784,76	32,50	3784,76
E9	42,41	3785,02	42,24	3785,19	42,23	3785,20	42,23	3785,20	42,22	3785,21
E10	54,05	3785,56	53,93	3785,68	53,92	3785,69	53,92	3785,69	53,91	3785,70
P5	34,58	3784,93	34,42	3785,09	34,42	3785,09	34,44	3785,07	34,46	3785,05
P6	32,40	3784,66	32,44	3784,62	32,40	3784,66	32,44	3784,62	32,45	3784,61
P7	41,85	3785,19	41,88	3785,16	41,85	3785,19	41,89	3785,15	41,89	3785,16
E1	89,32	3805,79	88,74	3806,37	88,75	3806,36	88,67	3806,44	88,69	3806,42
E2	122,80	3806,30	121,30	3807,80	121,30	3807,80	121,25	3807,85	ı	ı
E3	80,65	3802,79	80,37	3803,07	80,38	3803,06	80,37	3803,07	80,52	3802,92
E4	65,90	3797,48	65,36	3798,02	65,37	3798,01	65,35	3798,03	65,44	3797,94
E5	91,40	3807,93	90,75	3808,58	90,74	3808,59	90,72	3808,61	ı	ı
E6	95,67	3810,37	95,30	3810,74	95,31	3810,73	95,33	3810,71	ı	ı
P1	90,07	3806,09	90,19	3805,97	90,22	3805,95	90,08	3806,08	90,06	3806, 10
P2	97,20	3810,34	97,23	3810,31	97,28	3810,26	97,19	3810,35	ı	I
P3	92,84	3807,98	92,57	3808,25	92,60	3808,21	92,58	3808,24	ı	I
P4	65,09	3797,55	64,71	3797,93	64,72	3797,92	64,72	3797,92	64,88	3797,76
E11	12,35	3817,29	12,52	3817,12	12,22	3817,42	11,99	3817,65	11,75	3817,89
E12	11,85	3817,69	13,01	3816,53	11,76	3817,78	11,55	3817,99	11,40	3818,14
E13	25,22	3821,32	25,49	3821,05	25,60	3820,94	25,67	3820,87	25,05	3821,49
E14	19,97	3817,39	19,82	3817,54	19,70	3817,66	19,63	3817,73	I	I
E15	15,60	3821,74	15,32	3822,02	15,17	3822,16	13,77	3823,57	I	I
E16	13,04	3828,35	13,06	3828,33	12,95	3828,45	12,97	3828,42	12,63	3828,77
E17	22,11	3822,96	20,96	3824,11	20,77	3824,30	20,28	3824,79	20,75	3824,32
E27	47,70	3825,70	I	I	ı	I	47,33	3826,07	I	I
P8	12,17	3817,35	27,65	3801,87	11,92	3817,60	11,31	3818,21	11,69	3817,83

	NE PUC-DGA (5) [msnm]	3817,72	3823,98	3827,92	3820,48	ı	ı	ı	I	3860,39	I	3862,99	I	I	I	I	I	I	ı	I	I	
lación)	NE PUC-DGA (5) [m]	11,95	21,42	13,36	26,35	ı	ı	ı	ı	3,72	ı	1,27	ı	ı				ı		·	I	
asco (Continu	NE CMDIC-GP (4) [msnm]	3817,52	3823,93	3827,91	3820,39	3825,97	3853,55	3863,23	3859,98	3860,66	I	3862,75	3931,40	3931,56	I	3931,25	3888,17	3809,41	ı	I	I	
Salar del Hui	NE CMDIC-GP (4) [m]	12,15	21,47	13,37	26,44	46,87	2,20	1,12	102,84	3,45	ı	1,51	94,73	80,22	ı	78,59	12,51	27,52		ı	ı	
a Cuenca del	NE Acosta (3) [msnm]	3817,28	3823,62	3827,66	3820,09	ı	3853,59	3861,96	3859,96	3860,25	3937,13	3861,31	3931,29	3931,50	4009,86	3931,14	3888,04	3809,15	3841,70	3782.90	3783,63	
ánea en l	NE Acosta (3) [m]	12,39	21,78	13,61	26,73	ı	2,16	2,40	102,86	3,86	86,43	2,95	94,85	80,28	ı	78,70	12,64	27,78	5,96	3,68	1,05	
agua subterr	NE INVEREX (2) [msnm]	ı	3823,52	3826,85	3819,88	ı	3853,52	ı	3859,99	ı	ı	ı	3931,17	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	I	
tico (NE) de	NE INVEREX (2) [m]	ı	21,88	14,43	26,95	ı	2,23	ı	102, 83	ı	ı	ı	94,96	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	I	
s de nivel está	NE Construcción (1) [msnm]	3817,03	3823,40	3827,49	3833,90	3825,69		3863,04	ı	3859,11	3937,13	3859,64	ı	3931,26		3930,98	3887,97				ı	
.2: Medicione	NE Construcción (1) [m]	12,64	22,00	13,79	12,93	47,15	I	1,31	I	5,00	86,43	4,62	I	80,52	I	78,86	12,71	ı	ı	I	ı	- : sin medición
Tabla 8	Pozo	P8A	6d	P10	P11	P14	E18	E19	E20	E24	E26x	P12	E21	E22	E25	P13	E23	J-10	J-G	Hsc-Sur	P-Erm	Nota:

- : sin medición

(1) Mediciones realizadas durante la construcción de pozos (2000 - 2002).

(2) Mediciones realizadas en los años 2000-2002.

(3) Nivel estático medio año 2001.

(4) Mediciones realizadas en noviembre-diciembre de 2002.

(5) Mediciones realizadas en septiembre de 2008.



Figura 8.1: Pozos y cotas de nivel del agua subterránea en la cuenca Salar del Huasco.

De la lista presentada en la Tabla 8.1, los únicos pozos habilitados en el acuífero superior corresponden a E12, E15 y E24. Analizando la información de estos tres sondajes, es posible establecer una relación entre los acuíferos profundos y el que se desarrolla en el estrato superior. El piezómetro E12 tiene una profundidad total de 35 m y fue habilitado a 19 m de distancia del pozo P8, el cual posee una profundidad de 240 m. Las mediciones disponibles permiten establecer que el sondaje E12 tiene un nivel estático cerca de 0,3 m superior al registrado en P8. Alrededor de 2 km al norte se encuentra el piezómetro E15 (30 m de profundidad) separado a 24 m del pozo E14 (220 m de profundidad). Los niveles registrados muestran una diferencia de 4,5 m a favor del sondaje E15. Finalmente, el piezómetro E24 se habilitó junto al sondeo P12 (23 m de distancia). El primero tiene una profundidad total de 18 m, mientras que el segundo tiene 168 m. En este caso la diferencia observada fue inversa a la de los otros dos casos con, un nivel estático en E24 ubicado 1,1 m bajo el de P12.

En base a lo anterior, es posible concluir en forma preeliminar que en las cercanías de la desembocadura del Río Piga el acuífero medio-inferior posee un mayor potencial hidráulico que el acuífero superior. Alrededor de 7 km al sur, en el sector de Sillillica Norte, el acuífero superior presenta niveles piezométricos mayores, por lo que recargaría al acuífero medio e inferior.

En la Figura 8.2 se muestra el mapa de isopiezas de la cuenca, representativo la situación de los acuíferos medio e inferior, según los datos de nivel medidos por Acosta (2004). De la figura es posible evidenciar que los flujos subterráneos escurren predominantemente en sentido norte-sur con algunos aportes en sentido noreste-suroeste en el sector de Pampa Sillilica y este-oeste en Pampa Rinconada, siempre con zona de descarga en el salar.

El pozo ubicado más norte en la cuenca presenta un nivel piezométrico de 3.888 msnm, mientras que las cotas registradas en la cercanía del salar alcanzan los 3.780 msnm. Esta diferencia se traduce en un gradiente hidráulico de $3,8x10^{-3}$. El gradiente medio desde el sector de Sillillica Norte hasta el salar es de $2,5x10^{-3}$ y entre el Caserío Collacagua y Sillillica Norte el gradiente hidráulico aumenta a $5,5x10^{-3}$.

En el sector de Pampa Sillillica se observa un gradiente aproximado de $2,8x10^{-3}$, es decir un 25% menor que el gradiente determinado en sentido preferencial de escurrimiento. Finalmente, la zona de Pampa Rinconada muestra un bajo gradiente hidráulico de sólo $8,0x10^{-4}$. En la Tabla 8.3 se presentan los gradientes calculados y los pozos utilizados en su determinación.



Figura 8.2: Superficie equipotencial de las aguas subterráneas en la cuenca del Salar del Huasco.

Desde zona	Hacia zona	Pozos usados	Gradiente
Caserío Collacagua	Salar	E23 – Lagunas	$3,9x10^{-3}$
Sillillica Norte	Salar	P8 – Lagunas	$2,4x10^{-3}$
Caserío Collacagua	Sillillica Norte	E23 – P8	5,5x10 ⁻³
Pampa Sillillica NE	Pampa Sillillica SO	E2 - E3	$2,8x10^{-3}$
Pampa Rinconada	Salar	E9 – Lagunas	8,0x10 ⁻⁴

Tabla 8.3: Gradientes Hidráulicos calculados en Salar del Huasco.

Con respecto a los posibles flujos regionales, la topografía de la zona pareciera generar una discontinuidad hidrogeológica principalmente en los márgenes oeste y este de la cuenca, sin embargo, no se descarta la existencia de flujos subterráneos a través de fracturas o desde el sector norte de la cuenca y hacia el sur.

La Laguna Huantija, ubicada en la zona de descarga de la cuenca de Laguna Lagunillas tiene una elevación de 4.017 msnm. Asumiendo que dicha laguna es representativa del nivel piezométrico de las aguas subterráneas de la cuenca, la diferencia de cota entre el acuífero y el pozo E23 sería de 129 m, estableciendo un gradiente hidráulico de $1,0x10^{-2}$. En este contexto, la información de niveles permite suponer la presencia flujos aportantes desde la cuenca de Laguna Lagunillas.

Collahuasi– GP Consultores en los años 2002 y 2003, y posteriormente el año 2007, construyeron una batería de punteras al interior del salar del Huasco con el objetivo de determinar las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas y conocer la profundidad de las napas. Durante las labores realizadas en los años 2002 y 2003 se construyeron 40 punteras, de entre 1 y 6 m de profundidad, principalmente en las cercanías de las lagunas terminales del Salar. Por su parte, el año 2007 se instalaron otras 40 punteras de un metro de profundidad, las que fueron distribuidas uniformemente al interior del salar. Las coordenadas y elevación de las punteras existentes en el Salar del Huasco se muestran en la Tabla 8.4.

Id	Puntara	Prof (m)	Coordenadas U	TM (PSAD 56)	Elevación
Iu	I uniti a	1 101. (III <i>)</i>	Norte (m)	Este (m)	(msnm)
02-1	1	1,0	7.759.797,6	513.173,5	3.787,6
02-2	2	5,0	7.759.809,2	513.157,4	3.788,3
02-3	3	2,0	7.757.601,3	511.722,0	3.782,2

Tabla 8.4: Listado de punteras instaladas en el Salar del Huasco.

ы	Duntoro	D rof (m)	Coordena	das UTM	Elevación
Iu	I unter a	1 101. (III <i>)</i>	Norte (m)	Este (m)	(msnm)
02-4	4	5,0	7.757.455,4	511.889,4	3.780,2
02-5	5	1,0	7.753.771,6	513.866,7	3.783,0
02-6	6	3,9	7.753.754,1	513.866,9	3.783,1
02-7	7	1,0	7.751.681,9	517.178,1	3.781,9
02-8	8	6,0	7.751.698,8	517.182,5	3.781,9
02-9	9	-	7.753.389,0	521.445,0	-
02-10	10	-	7.753.382,0	521.431,0	-
02-11	11	1,0	7.757.936,4	517.357,7	3.786,0
02-12	12	5,0	7.757.930,2	517.382,2	3.786,4
02-13	13	1,0	7.758.910,2	516.049,9	3.788,0
02-14	14	4,0	7.758.919,5	516.041,8	3.788,0
02-15	15	-	7.778.854,0	516.245,0	-
02-16	16	-	7.778.860,0	516.178,0	-
02-17	17	5,0	7.755.468,9	512.350,4	3.780,1
02-18	18	5,0	7.752.176,1	517.046,9	3.780,9
02-19	19	5,0	7.755.857,9	516.661,6	3.780,6
03-20	20	2,0	7.758.540,0	512.535,7	3.780,3
03-21	21	2,0	7.757.788,3	513.083,6	3.781,2
03-21A	21A	4,0	7.757.793,0	513.079,2	3.781,0
03-22	22	4,0	7.757.787,1	513.084,0	3.781,2
03-23	23	4,0	7.757.476,3	513.171,8	3.780,9
03-24	24	4,0	7.757.349,1	513.179,5	3.780,6
03-25	25	4,0	7.757.215,9	513.266,2	3.780,5
03-26	26	4,0	7.756.937,7	513.374,8	3.780,6
03-27	27	5,0	7.756.629,8	513.164,5	3.780,7
03-29	29	3,0	7.756.432,9	513.230,5	3.780,6
03-28	28	5,0	7.756.569,9	513.466,5	3.780,4
03-30	30	5,0	7.756.376,3	513.248,6	3.780,7
03-31	31	4,0	7.756.037,7	513.308,9	3.780,5
03-32	32	2,0	7.755.996,6	513.248,1	3.780,5
03-33	33	4,0	7.755.305,1	512.587,8	3.780,5
03-34	34	6,0	7.756.936,3	512.394,1	3.780,1
03-35	35	4,0	7.757.516,4	512.682,3	3.780,3
03-36	36	4,0	7.757.064,8	511.886,0	3.780,4

Tabla 8.4: Listado de punteras instaladas en el Salar del Huasco (Continuación)

ы	Duntono	Drof (m)	Coordena	das UTM	Elevación
Iu	runtera	F 101. (III <i>)</i>	Norte (m)	Este (m)	(msnm)
03-37	37	4,0	7.754.535,3	513.271,9	3.780,9
03-38	38	4,0	7.751.670,4	517.084,7	3.782,2
03-39	39	4,0	7.751.650,4	516.549,7	3.784,1
03-40	40	6,0	7.751.763,2	516.346,9	3.783,7
07-1	CS1	1,0	7.759.262,5	513.406,7	3.785,1
07-2	CS2	1,0	7.758.604,1	512.462,1	3.781,2
07-3	CS3	1,0	7.757.445,3	511.836,4	3.781,4
07-4	CS4	1,0	7.756.292,3	511.878,2	3.781,2
07-5	CS5	1,0	7.755.645,1	512.055,0	3.781,1
07-6	CS6	1,0	7.757.864,7	514.191,4	3.782,5
07-7	CS7	1,0	7.757.640,9	513.533,1	3.781,7
07-8	CS8	1,0	7.753.663,7	520.435,0	3.786,9
07-9	CS9	1,0	7.754.967,5	515.810,9	3.781,5
07-10	CS10	1,0	7.756.339,3	515.063,2	3.781,5
07-11	CS11	1,0	7.757.515,3	513.281,3	3.781,4
07-12	CS12	1,0	7.756.725,1	513.384,8	3.781,4
07-13	CS13	1,0	7.755.974,0	513.356,6	3.781,5
07-14	CS14	1,0	7.753.892,9	517.609,2	3.781,4
07-15	CS15	1,0	7.754.151,7	518.853,9	3.781,4
07-16	CS16	1,0	7.754.334,2	514.830,3	3.781,6
07-17	CS17	1,0	7.752.982,1	519.039,0	3.781,0
07-18	CS18	1,0	7.752.176,4	518.019,7	3.781,999
07-19	CS19	1,0	7.752.809,5	516.844,7	3.781,401
07-20	CS20	1,0	7.752.591,0	517.356,5	3.781,253
07-21	CS21	1,0	7.755.044,7	516.369,8	3.780,909
07-22	CS22	1,0	7.751.794,9	517.112,8	3.782,241
07-23	CS23	1,0	7.752.328,0	516.212,9	3.782,1
07-24	CS24	1,0	7.752.797,9	515.067,6	3.781,3
07-25	CS25	1,0	7.754.946,7	512.774,6	3.781,5
07-26	CS26	1,0	7.753.877,2	514.036,9	3.781,4
07-27	C9	1,0	7.758.437,2	514.739,3	3.785,2
07-28	C10	1,0	7.757.112,3	515.887,8	3.782,4
07-29	C11	1,0	7.756.535,2	517.168,1	3.781,0
07-30	C12	1,0	7.755.830,2	518.116,1	3.781,1

Tabla 8.4: Listado de punteras instaladas en el Salar del Huasco (Continuación)

Id	Puntara	Prof (m)	Coordena	das UTM	Elevación
Iu	1 unter a	1 101. (III <i>)</i>	Norte (m)	Este (m)	(msnm)
07-31	C13	1,0	7.755.171,8	518.792,2	3.781,0
07-32	C14	1,0	7.755.041,7	520.821,9	3.787,0
07-33	C26	1,0	7.755.008,2	514.236,6	3.781,6
07-34	C27	1,0	7.754.375,1	515.809,0	3.781,6
07-35	P2	1,0	7.759.750,2	513.304,3	3.786,5
07-36	P3	1,0	7.755.441,5	513.245,2	3.781,7
07-37	P5	1,0	7.752.494,0	515.222,7	3.784,0
07-38	P6	1,0	7.752.729,6	515.464,8	3.781,6
07-39	P7	1,0	7.752.920,1	515.573,8	3.781,4
07-40	P11	1,0	7.751.644,6	517.192,5	3.783,1

Tabla 8.4: Listado de punteras instaladas en el Salar del Huasco (Continuación)

Fuente: [Collahuasi- GP Consultores, 2003, 2004, 2007]

Los datos de niveles de las aguas subterráneas al interior del salar se muestran en la Tabla 8.5. Como se observa, durante las campañas realizadas el 2004, gran parte de las punteras construidas presentaron niveles piezométricos levemente superiores a la superficie del terreno, lo que revelaría la presencia de un estrato superficial impermeable y un acuífero confinado o semi-confinado. Sin embargo, las mediciones realizadas en abril del 2007 en el nuevo set de punteras no reflejan dicho fenómeno. Esta situación puede ser explicada por la diferencia en la profundidad de las punteras construidas en ambos períodos o puede deberse a un leve descenso en los niveles piezométricos. Si se consideran las punteras instaladas durante los años 2002 y 2003 con una profundidad de 1 metro, se observa que ninguna de ellas presenta niveles surgentes. Por lo tanto, la configuración podría corresponder a un acuífero superficial de baja potencia separado por un estrato impermeable de un acuífero inferior de mayor carga hidráulica.

La Figura 8.3 presenta la ubicación de todas las punteras existentes en el área del salar y los niveles piezométricos de acuerdo a las mediciones realizadas en enero de los años 2004 y 2007. El prefijo POX representa el año durante el cual las punteras fueron construidas. La superficie cubierta por lagunas corresponde a la digitalización de una imagen satelital captada en noviembre de 2006.

Tabla 8.5: Mediciones de niveles de agua subterránea en punteras instaladas dentro del Salar del Huasco.

	uð	0-04	15_f	40-Ac	20-fe	-04 -04	rde	-07	iii	-07	ana	0.8
71		-0-2			11-67		au.		mn -	10-1		00-
DI	Prof. (mbnt)	Cota (msnm)										
02-1	0,33	3787,25	I	1	I		ı	Ţ	1	1		1
02-2	-0,12	3788,38	ı		ı		ı	ı			ı	ı
02-3	0,04	3782,20	ı		ı		ı	ı			ı	ı
02-4	0,62	3779,58	ı		ı		ı	ı	·			ı
02-5	0,32	3782,71	ı		ı		ı	ı	·			ı
02-6	3,10	3780,04	ı		ı		·	ı	ı	·	·	ı
02-7	0,77	3781,15	ı	·	ı	·	ı	ı	ı	ı	·	ı
02-8	-0,08	3781,93	ı		ı		·	ı	ı	·	·	ı
02-9	ı		ı	·	ı		ı	ı	·	ı	·	ı
02-10	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı			·	·
02-11	0,54	3785,42	ı		ı		·	ı	·	·	·	ı
02-12	0,53	3785,83	ı		ı		ı	ı	·			ı
02-13	·		ı		ı		ı	ı	ı	·	ı	ı
02-14	1,08	3786,96	ı		ı		ı	ı	·			ı
02-15	·		ı		ı		ı	ı	ı	·	·	·
02-16	ı	ı	ı	ı	I	ı	·	ı	ı		ı	ı
02-17	-0,09	3780,22	ı		ı		ı	ı			ı	ı
02-18	0,03	3780,84	ı		ı		·	ı	·	·	·	ı
02-19	3,38	3777,27	ı		ı		ı	ı			·	·
03-20	-0,11	3780,43	-0,15	3780,47	0,10	3780,22	ı	ı	·	ı	·	ı
03-21	0,09	3781,10	0,03	3781,16	0,27	3780,92	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-21A	-0,05	3781,09	ı	ı	I	I	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-22	0,06	3781,12	ı	·	ı	,	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-23	-0,17	3781,10	ı	ı	ı	I	ı	ı	ı	ı	·	ı
03-24	-0,22	3780,85	ı	ı	-0,20	3780,83	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-25	-1,06	3781,52	ı	ı	-0,44	3780,91	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-26	1,24	3779,40	ı		ı		ı	ı	·		,	ı
03-27	-0,11	3780,76	I	ı	-0,11	3780,76	ı	ı	ı	ı	ı	I

Tabla 8.5: Mediciones de niveles de agua subterránea en punteras instaladas dentro del Salar del Huasco (Continuación)

)		-							
	en	e-04	15-f(eb-04	29-fe	b-04	ab	r-07	inį	n-07	ene	-08
Id	Prof.	Cota	Prof.	Cota	Prof.	Cota	Prof.	Cota	Prof.	Cota	Prof.	Cota
	(mbnt)	(msnm)	(mbnt)	(msnm)	(mbnt)	(msnm)	(mbnt)	(msnm)	(mbnt)	(msnm)	(mbnt)	(msnm)
03-28	0,31	3780,08	ı	ı	ı	ı	ı	I	ı	I	ı	I
03-29	-0,02	3780,66	ı	ı	0,06	3780,58	ı	ı	ı	I	ı	ı
03-30	-0,89	3781,58	ı	ı	ı	·	·	I	ı	I	ı	I
03-31	-0,24	3780,72	ı	·	-0,24	3780,72	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-32	-0,23	3780,72	ı	ı	-0,23	3780,72	ı	I	ı	ı	ı	I
03-33	1,36	3779,16	ı	·	·	·	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-34	-0,12	3780,22	ı	ı	ı	ı	ı	I	I	ı	I	I
03-35	0,33	3779,99	0,58	3779,74	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-36	-0,15	3780,57	ı		ı	·	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-37	0,19	3780,69	ı		ı	·	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-38	-0,19	3782,43	ı	ı	ı	ı	ı	I	ı	ı	I	I
03-39	-0,82	3784,90	-0,85	3784,93	-0,84	3784,92	ı	ı	ı	ı	ı	ı
03-40	-0,72	3784,41	-0,70	3784,39	-0,69	3784,38	ı	ı	ı	I	ı	ı
07-1	ı		ı	·	·	·	0,00	3785,05	0,02	3785,03	0,02	3785,03
07-2	ı		ı	·	·	·	0,27	3780,92	-0,03	3781,21	0,00	3781,18
07-3	ı		ı	·	·	·	0,69	3780,68	0,75	3780,62	0,41	3780,96
07-4	ı		ı		·	·	0,37	3780,85	0,03	3781,19	0,09	3781,13
07-5	ı		ı		·	·	0,21	3780,92	0,22	3780,91	0,03	3781,10
07-6	ı	ı	ı		·		0,49	3782,06	0,53	3782,02	0,32	3782,23
L-70	ı		ı	·	·	·	0,72	3781,00	0,76	3780,95	0,20	3781,52
07-8	ı		ı	·	·	·	0,90	3785,95	0.96	3785,89	0,49	3786,37
6-20	ı		ı		·		0,77	3780,69	0.88	3780,58	1,32	3780,14
07-10	ı		,		ı		0,73	3780,79	0.93	3780,59	0,89	3780,63
07-11	ı		ı		ı	·	0,53	3780,83	0,51	3780,85	0,07	3781,29
07-12	ı	ı	ı	·	·	·	0,55	3780,83	0,75	3780,64	0,74	3780,64
07-13	ı	·	ı	ı	ı	ı	0,60	3780,91	0,84	3780,68	0,62	3780,89
07-14	ı	ı	ı		·	·	*	*	*	*	*	*
07-15	ı		ı		ı		0,63	3780,79	0,73	3780,69	0,68	3780,74
07-16	I	ı	ı	ı	ı	ı	0,61	3780,99	0,74	3780,86	0,61	3780,98

460625	COPIA
V	$\mathbf{}$

Tabla 8.5:	Medicion	es de nivel	les de agua	subterráne	a en punte	ras instala	das dentro	del Salar d	lel Huasco) (Continua	ción)	
	en	e-04	15-fe	b-04	29-fe	b-04	ab	r-07	inį	n-07	ene	-08
Id	Prof. (mbnt)	Cota (msnm)	Prof. (mbnt)	Cota (msnm)	Prof. (mhnt)	Cota (msnm)	Prof. (mbnt)	Cota (msnm)	Prof. (mbnt)	Cota (msnm)	Prof. (mhnt)	Cota (msnm)
07-17	1	1	-	-	1	-	0,25	3780,72	0,68	3780,30	0,05	3780,93
07-18	ı	ı	ı	ı	ı	ı	0,84	3781,16	*	*	ı	ı
07-19	ı	ı	ı	ı	ı	ı	0,38	3781,03	0,50	3780,90	0,23	3781,17
07-20	ı	·	·	·	ı	·	0,22	3781,03	0,32	3780,94	0,01	3781,25
07-21	ı	ı	ı	ı	ı	ı	0,43	3780,48	0,48	3780,43	0,59	3780,32
07-22	ı	ı	ı	ı	ı	I	0,18	3782,06	0,00	3782,24	0,00	3782,24
07-23	ı	ı	ı	ı	ı	I	*	*	*	*	0,16	3781,97
07-24	ı	,	ı	·	ı	ı	*	*	ı	ı	ı	ı
07-25	ı	ı	ı	ı	ı	ı	0,74	3780,72	0,85	3780,61	0,64	3780,82
07-26	ı	·	ı	ı	ı	ı	*	*	0,14	3781,22	0,00	3781,37
07-27	ı	·	ı	ı	ı	ı	*	*	-0,10	3785,27	*	*
07-28	ı	ı	ı	ı	ı	I	0,85	3781,59	0,77	3781,67	0,52	3781,93
07-29	ı	ı	ı	ı	ı	ı	0,21	3780,79	0,28	3780,72	0,11	3780,89
07-30	ı	ı	ı	ı	ı	ı	0,27	3780,80	0,33	3780,74	$0,\!22$	3780,85
07-31	ı			·	·	·	0,30	3780,69	0,38	3780,61	0,10	3780,89
07-32	ı			·	ı	·	0,90	3785,87	0,91	3785,86	0,44	3786,33
07-33	ı	·	ı	ı	ı	ı	0,49	3781,09	0,51	3781,07	0,41	3781,17
07-34	·				ı		0,72	3780,86	0,81	3780,77	*	*
07-35	·				·		0,00	3786,52	-0,21	3786,72	0,00	3786,52
07-36	ı			·	ı		*	*	*	*	*	*
07-37	ı	·	ı	ı	·	ı	0,04	3783,99	0,04	3783,99	0,03	3784,01
07-38	ı	·		·	·		0,63	3780,98	0,82	3780,79	0,03	3781,58
07-39	ı	ı	·	ı	ı	ı	0,51	3780,90	0,36	3781,05	0,05	3781,36
07-40	ı			ı			0,93	3782,23	0.98	3782,18	0,30	3782,86
						formation	louin o					

Fuente: [Collahuasi- GP Consultores, 2004]

- Sin información de nivel * puntera seca (profundidad mayor a 1m)



Figura 8.3: Punteras instaladas en Salar del Huasco.

De la figura es posible observar que la posición del nivel freático en las inmediaciones del salar es superior al nivel superficial de las lagunas, lo que permitiría un flujo subterráneo hacia la zona ocupada por ellas. De esta forma, su origen sería de tipo mixto, con aportes provenientes de vertientes ubicadas en el extremo oeste (Ermitaño y Huasco Norte) y sur (V. Sur, Huasco Lípez y Jalsuri) del Salar y en, menor medida, desde las aguas subterráneas.

En el sector norte las punteras P02-12 y P02-14 presentan niveles freáticos superiores a 3785 msnm, existiendo un gradiente hidráulico que favorece el flujo hacia las lagunas interiores de 1,8 E-3. Por el este, considerando las punteras P07-8 y P07-17, es posible calcular un gradiente hidráulico de 3,6 E-3 entre el margen oriental del salar y el sistema Jalsuri. Por el sur, en el sector de Huasco Lípez, las punteras P07-20 y P07-22 determinan un gradiente favorable hacia la laguna de 1,5 E-3. Finalmente, en el sector oeste del salar se aprecia un leve descenso en los niveles a medida que nos acercamos a las lagunas. Utilizando las mediciones realizadas en las punteras P07-5 y P02-17, el gradiente hidráulico obtenido es de 2,4 E-3.

Destaca el nivel observado en la puntera P02-19. Con una profundidad del nivel freático de 3.777,2 msnm, tiene una cota 3 m menor que las registradas en las 4 punteras que lo rodean (P07-10, 21, 29 y 30). Este piezómetro tiene una profundidad de 5m por lo que podría representar el nivel del acuífero inferior, lo cual mostraría flujos descendentes de agua desde los estratos superiores. Esta situación es contradictoria con las surgencias observadas en gran parte de las punteras instaladas en el período 2002-20003, las que reflejan un mayor nivel de energía en el acuífero inferior. De la misma forma, el nivel registrado es alrededor de 2,5 m menor que la cota superficial existente en las lagunas.

8.3 Constantes Elásticas

Las constantes elásticas en los acuíferos de Salar del Huasco se estimaron usando la información de pruebas de bombeo registradas en los antecedentes revisados. De acuerdo a la información disponible, se han construido 46 sondajes a la fecha: 2 pozos de exploración (H-1 y otro no identificado) fueron perforados en 1978, otros 2 pozos de exploración (J-G y J-10) fueron construidos como parte del proyecto JICA-DGA-PCI (1995) en 1993. Los 42 pozos restantes fueron habilitados durante la campaña de exploración hidrogeológica que realizó INVEREX Ltda., entre los años 2000 y 2002, para la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC). Cabe señalar que de estas 42 perforaciones, 27 son pozos de exploración y se encuentran identificados con la letra E-(n° pozo) y 15 corresponden a pozos de producción, identificados con la letra P-(n° pozo).

Los pozos habilitados en la cuenca se encuentran distribuidos sobre las pampas denominadas Batea, Peña Blanca, Sillillica y Rinconada, y sobre el lecho del Río Collacagua, tal como se muestra en la Figura 8.4. En la Tabla 8.6 se presentan las características generales de ubicación y habilitación de cada uno de los pozos en la cuenca del Salar del Huasco, los cuales se agruparon de acuerdo al sector donde se encuentran. Cabe señalar que sobre los dos pozos, H1 y el otro no identificado construidos en el año 1978, no se ha encontrado información alguna de sus características y ubicación.

Con el fin de caracterizar y determinar los parámetros hidráulicos de los acuíferos en la cuenca Salar del Huasco, se llevaron a cabo entre los años 2000 y 2002 pruebas de bombeo de gasto constante en 31 pozos perforados (20 de exploración y 11 de producción), además de pruebas de gasto variable en 12 pozos (10 de producción y 4 de exploración).

Los datos obtenidos de las pruebas de bombeo han sido analizados con el software Aquifertest 4.2, aplicando los métodos de Theis (1935), Cooper & Jacob (1946), Hantush y Jacob (1955) y recuperación de Theis (1935), usados para acuíferos confinado, semiconfinado y libre. Del mismo modo, se ha recopilado y comparado los resultados de las interpretaciones de las pruebas de bombeo efectuadas por JICA-DGA-PCI (1995), INVEREX (2000; 2002), GP Consultores (2003) y Acosta (2004), las cuales se presentan en el ANEXO II: "Resultados de Análisis Pruebas de Bombeo en Antecedentes".

En la Tabla 8.7 se presentan los valores de los parámetros hidráulicos del acuífero obtenidos con la interpretación de las pruebas de bombeo. Dicha interpretación se ha realizado considerando los pozos de observación cercanos, los mismos que de acuerdo a Acosta (2004) representan valores confiables.

La discusión de los resultados se realiza de manera agrupada de acuerdo a los sectores del acuífero en donde se ubican los pozos y se presenta a continuación:

Sector Pampa Sillillica

Este sector comprende los pozos de producción P1, P2 y P3, y sus pozos de exploración correspondientes E1, E6 y E5 (ver Figura 8.4).

Los mejores ajustes obtenidos fueron con los métodos correspondientes a acuíferos confinados como Theis y Cooper & Jacob, de acuerdo a lo determinado por INVEREX (2000-2002) y Acosta (2004).

Los valores de T, considerando sólo los pozos de observación y los métodos de mejor ajuste, varían de $3.946 \text{ m}^2/\text{d}$ a $5.357 \text{ m}^2/\text{d}$, los resultados de K se encuentran entre 24 y 47 m/d y los valores de S entre 5,36 E-04 y 1,06 E-03.

Sector Pampa Rinconada

En este sector se encuentran los pozos de producción P5 y P6 y sus respectivos pozos de exploración E7 y E8. El mejor ajuste se obtuvo aplicando el método de Hantush, empleado para acuíferos semi-confinados, al igual como fue determinado por INVEREX (2000-2002) y Acosta (2004).

Los valores de T, teniendo en cuenta sólo los pozos de observación y el método de mejor ajuste, son de 2.837 m²/d y 3.946 m²/d. Los resultados de K son de 18,2 m/d y 21,6 m/d y S de 8,85 E-06 y 1,62 E-03.

Sector Sillillica Norte

Comprende los pozos P8A, P9, P10, P11 y P14, con sus respectivos pozos de exploración E11, E12, P8, E17, E16, E13 y E27. El método de Hantush, aplicado para acuíferos semiconfinados, presentó el mejor ajuste en la mayoría de los pozos.

Los valores de T, considerando sólo los pozos de observación y el método de mejor ajuste, varía entre $114 \text{ m}^2/\text{d} \text{ y } 12.211 \text{ m}^2/\text{d}$; los valores de K se encuentran entre 0,5 m/d a 61 m/d.

Pampa Peña Blanca y Pampa Batea

No se contó con información de pruebas de bombeo en este sector, sin embargo, se presentan los resultados obtenidos por Collahuasi- GP Consultores (2003), y que cuentan con las gráficas de los ajustes realizados.

Este sector comprende al pozo P12 y al pozo de observación E19. Los valores de T, considerando sólo el pozo de observación y los métodos aplicados para acuíferos confinados, varían entre $314 \text{ m}^2/\text{d} \text{ y } 376 \text{ m}^2/\text{d}$. El valor de K se encuentra entre 1,9 m/d a 2,3 m/d y S varía entre 8,74 E-04 y 5,0 E-04.

Río Batea y Caserío Collacagua

Tampoco para este sector se contó con información de pruebas de bombeo, sin embargo, se presentan los resultados obtenidos por Collahuasi- GP Consultores (2003), ya que cuentan con las gráficas de los ajustes realizados.

Comprende al pozo P13 y al pozo de observación E22. Los valores de T, considerando sólo el pozo de observación y los métodos aplicados para acuíferos confinados, varían entre 4.464 m^2/d y 5.774 m^2/d ; los valores de K entre 44,8 y 57,9 m/d y S de 4,71 E-03 a 4,24 E-03.

S	
2	2
8	ä
3	<u>N</u>
4	\circ

Tabla 8.6: Características de sondajes construidos en la cuenca del Salar del Huasco

Dozo	Tononimia	Coordenae	das UTM	Elevación	Profundidad	Diámetro	Largo	Zonas Rannadas hahilitadas
070 1	mmmodor	Norte (m)	Este (m)	(mnsm)	(m)	Habilitación (m)	Collar (m)	
Ε7	Pampa Rinconada	7.752.890,4	525.800,2	3.819,3	252	0,1524	0,306	102-204; 210-216; 222-228; 234-240
E8	Pampa Rinconada	7.751.913,6	525.913,0	3.816,8	164	0,1524	0,465	102-156
E9	Pampa Rinconada	7.753.802,0	525.700,8	3.826,9	177	0,1524	0,410	66-78; 84-96; 108-114; 120-138; 150-174
E10	Pampa Rinconada	7.754.812,3	525.594,4	3.839,2	160	0,1524	0,390	60-84; 84-96; 102-108; 114-120; 126-132; 138-144
P5	Pampa Rinconada	7.752.924,2	525.789,7	3.819,1	250	0.4064	0,340	84-108; 114-138; 144-174; 180-192; 198- 204; 210-216
P6	Pampa Rinconada	7.751.957,1	525.912,3	3.816,7	134	0.4064	0,398	66-89; 96-125
ΡŢ	Pampa Rinconada	7.753.770,7	525.716,3	3.826,5	177	0.4064	0,515	54-78; 84-96; 102-138; 150-162; 168-174
E1	Pampa Sillillica	7.765.349,8	520.502,2	3.894,6	250	0,1524	0,580	82-94; 100-106; 118-224; 130-136; 148- 160; 166-184; 190-196; 202-220; 226-232; 238-244
E2	Pampa Sillillica	7.765.996,5	521.615,8	3.928,5	250	0,1524	0,620	93-123; 123-129; 135-147; 153-165; 171- 201; 207-213; 237-249
E3	Pampa Sillillica	7.764.203,3	520.985,7	3.883,1	250	0,1524	0,420	93-123; 123-135; 141-153; 159-195; 201- 207; 213-219; 225-231; 237-243
E4	Pampa Sillillica	7.763.086,7	521.476,8	3.863,0	223	0,1651	0,460	78-192; 198-204
E5	Pampa Sillillica	7.766.498,7	520.358,3	3.899,0	204	0,1651	0,380	96-192
E6	Pampa Sillillica	7.767.647,6	520.217,4	3.905,6	255	0,1651	0,520	102-174; 180-192; 204-216; 228-240
P1	Pampa Sillillica	7.765.368,9	520.535,6	3.895,6	246	0.4064	0,500	96-150; 156-168; 180-240
P2	Pampa Sillillica	7.767.653,1	520.257,6	3.907,0	250	0.4064	0,610	108-156; 162-174; 192-240
P3	Pampa Sillillica	7.766.497,1	520.398,2	3.900,3	219	0.4064	0,550	96-150; 156-165; 171-201
$\mathbf{P4}$	Pampa Sillillica	7.763.075,9	521.439,5	3.862,2	198	0.4064	0,490	78-120; 126-132; 138-192
E11	Sillillica Norte	7.771.072,0	516.779,0	3.829,3	246	0,1651	0,345	60-72; 78-108; 114-132; 138-156; 162-180; 186-198; 204-246
E12	Sillillica Norte	7.771.075,0	516.792,0	3.829,1	35	0,1651	0,383	17-23; 29-35
E13	Sillillica Norte	7.771.1111,0	517.781,0	3.846,2	252	0,1651	0,360	66-90; 96-108; 114-132; 144-150; 156-162
E14	Sillillica Norte	7.772.227,0	516.693,0	3.837,0	220	0,1651	0,365	66-78; 90-138; 150-156; 162-204; 210-216
E15	Sillillica Norte	7.772.205,0	516.701,0	3.837,0	30	0,1524	0,425	18-30

Tabla	18.6: Característic	as de sondaj	es construid	los en la cue	enca del Sal	ar del Huasco	(continuac)	ión)
Pozo	Toponimia	Coordena Norte (m)	das UTM Este (m)	Elevación P (msnm)	rofundidad (m)	Diámetro Habilitación (m)	Largo Collar (m)	Zonas Ranuradas habilitadas
E16	Sillillica Norte	7.773.315,0	516.830,0	3.841,0	250	0,1524	0,290	71-89; 101-133; 119-125; 137-185; 190-196; 209-214: 221-227; 245-248
E17	Sillillica Norte	7.772.682,0	517.838,0	3.844,7	252	0,1651	0,330	49-60; 67-78; 85-96; 103-108; 115-120; 133- 150; 157-162; 175-180; 187-207; 216-246
E27	Sillillica Norte	7.770.791,0	514.885,0	3.873,0	250	ı	ı	84-90; 96-250
P8	Sillillica Norte	7.771.074,0	516.811,0	3.829,1	240	0,5588 (1)	0,345	*
P8A	Sillillica Norte	7.771.097,0	516.755,0	3.829,4	230	0.4064	0,315	72-114; 120-150; 156-204; 210-224
6d	Sillillica Norte	7.772.697,0	517.834,0	3.845,0	246	0.4064	0,493	84-96; 102-114; 120-150; 156-180; 186-210; 216-240
P10	Sillillica Norte	7.773.309,0	516.790,0	3.840.9	248	0.4064	0,310	72-108; 120-132; 138-156; 162-204; 228-234
P11	Sillillica Norte	7.771.101,2	517.780,0	3.846,2	234	0.4064	0,380	73-108; 121-132; 139-156;163-204; 229-234
P14	Sillillica Norte	7.770.830,0	514.879,0	3.872,4	240	0.4064	ı	84-90; 96-138; 144-234
E18	Peña Blanca	7.777.863,0	516.757,0	3.855,4	180	0,1524	0,305	84-114; 120-150; 156-162; 168-178
E19	Peña Blanca	7.780.062,0	516.112,0	3.864,1	168	0,1524	0,170	60-66; 72-90; 96-108; 114-120; 126-132; 138- 144; 150-156
E20	Peña Blanca	7.776.523,0	518.983,0	3.962,5	186	0,1651	0,319	90-108; 120-150; 156-162; 168-180
E24	Peña Blanca	7.780.032,0	516.122,0	3.863,9	18	0,1524?	0,185	618
E26x	Peña Blanca	7.780.380,0	514.184,0	4.023,4	280	ı	0,175	156-180; 186-198; 220-244; 256-274
P12	Peña Blanca	7.780.033,0	516.145,0	3.864,1	180	0.4064	0,172	66-84; 90-120; 126-132; 144-150; 162-174
E21	Pampa Batea	7.780.888,0	519.593,0	4.025,8	174	0,1651	0,395	90-132; 138-168
E22	Río Batea	7.782.944,0	520.287,0	4.011,3	180	0,1524	0,490	90-126; 132-150; 150; 174
E25	Río Batea	7.782.900,0	520.261,0	4.009,9	60	ı	ı	38-56
P13	Río Batea	7.782.905,0	520.272,0	4.009,6	180	0.4064	0,280	102-120; 126-174
E23	Caserío Collacagua	7.783.842,0	517.413,0	3.900,4	204	0,1524	0,280	72-96
J-10	Pampa Sillillica	7.766.376,9	517.667,3	3.835,8	207	I	1,160	
J-G	Pampa Peña Blanca	7.776.054,0	516.750,0	3.847,2	157	ı	0,44	
H-1	I	I	ı	ı	ı	ı	I	

*: Pozo que no fue entubado; -: Sin información.

Fuentes: [INVEREX (2000; 2002), Collahuasi- GP Consultores (2003; 2005) y Acosta, O. (2004)]



Figura 8.4: Ubicación de pozos de exploración y producción en la cuenca del Salar del Huasco

460625 COPIA

Tablέ	1 8.7: P1	ropied£	ndes hidrá	íulicas del a	cuífero de la	a cuenca Sa	alar del F	Huasco.					
	Pozo (Caudal	L	Transmisivida (n	id Hidráulica 1 ² /d)	-T		Conductivida (1	d Hidráulica m/d)	- K	Coef. de	Almacenami	ento - S
F0Z0	Obs.	(L/s)	Theis	Cooper y Jacob	Hantush	Recup. Theis	Theis	Cooper y Jacob	Hantush	Recup. Theis	Theis	Cooper y Jacob	Hantush
P1	*	95	1.440	1.440	1.192,32	·	9,2	9,2	7,6	·	ı	·	ı
P1	E1		4.507,2	4.564,8	4.507,2	ı	27,9	28,3	27,9	ı	2,67E-03	2,42E-03	2,67E-03
P2	*	95	4.219,2	4.219,2	2.203,2	ı	27,7	27,7	14,5	ı	ı	ı	ı
P2	E6		4.622,4	3.945,6	3.830,4	·	28,9	24,7	24,0	·	1,06E-03	1,88E-03	2,11E-03
P3	*	95	1.857,6	2.174,4	747,36	·	14,7	17,2	5,9		ı	·	ı
P3	E5		5.356,8	5.356,8	3.945,6	ı	47,3	47,3	34,8	ı	1,80E-04	1,24E-04	5,36E-04
P5	*	75	2.923,2	5.328	1.192,32	3.945,6	13,6	24,7	5,5	18,3	ı		·
P5	E7		7.300,8	3.945,6	3.945,6	4.406,4	33,6	18,2	18,2	20,3	1,36E-08	8,78E-06	8,85E-06
P6	*	60	551,52	2.606,4	266,4	7.185,6	5,4	25,7	2,6	70,8	ı		·
P6	E8		20.880	3945,6	2.836,8	6.580,8	158,8	30,0	21,6	50,1	9,93E-10	1,31E-03	1,62E-03
P8A	*	50	n.a.	n.a.	n.a.	884,16	n.a.	n.a.	n.a	4,1	ı	ı	ı
P8A	E11		1.163,5	884,16	861,12	884,16	5,0	3,8	3,7	3,8	1,39E-04	4,79E-04	4,79E-04
P8A	E12		1.612,8	1.612,8	1.398, 24	ı	70,0	70,0	60,7	ı	8,26E-03	4,86E-03	8,15E-03
P8A	P8		12.42,7	1.192,32	590,4	ı	5,4	5,2	2,6	ı	6,22E-02	5,31E-02	7,41E-02
6d	*	60	360	360	440,64	360	1,6	1,6	2,0	1,6	ı	ı	ı
6d	E17		705,6	884,16	705,6	655,2	3,1	3,8	3,1	2,8	1,31E-02	8,07E-03	1,31E-02
P10	*	50	113,62	80,64	74,88	80,64	0,5	0,3	0,3	0,3	I	ı	ı
P10	E16		201,6	146,88	113,90	360	0,9	0,6	0,5	1,5	1,62E-03	2,83E-03	3,80E-03
P11	*	40	139,82	139,68	114,91	146,88	0,7	0,7	0,6	0,7	ı	ı	ı
P11	E13		339,84	338,4	256,32	360	1,5	1,5	1,1	1,6	1,98E-03	1,16E-03	4,67E-03
P14	*	85	558,72	557,28	331,2	ı	2,9	2,9	1,7	ı	I	ı	ı
P14	E27		15.552	13.075,2	12.211,2	ı	76,8	64,6	60,3	ı	9,38E-05	2,79E-04	6,40E-04
n.a: N	o ajusta	*: sin	ı pozo de ol	bservación	-: no realiza	ldo							

e I

8.4 Conexión con otras cuencas

En diversos estudios se ha planteado la relación entre el Salar del Huasco y el flujo subterráneo que alimenta a los acuíferos de la Pampa del Tamarugal. Margaritz et al. (1990) señalan un posible flujo regional que se infiltraría en el Altiplano y alcanzaría el relleno sedimentario de la zona central mediante los sistemas de fracturas de las rocas paleozoicas y mesozoicas. Se ha señalado también que la principal recarga de la Pampa del Tamarugal es producida por las precipitaciones que ocurren en la zona alta de las quebradas en la falda occidental de la cordillera, que luego desembocan en la depresión central (Margaritz et al., 1989; Houston, 2002). Este fenómeno se combinaría con flujos subterráneos responsables de los afloramientos de agua permanentes en la misma ladera (p. ej. Pica, Quebrada de Alona, Quebrada de Caya) cuya recarga se atribuye a flujos regionales producidos por la fusión de nieve en el Altiplano (Margaritz et al., 1989; Margaritz et al., 1990).

En el estudio de la geoquímica de la cuenca del Salar de Pintados, Risacher et al. (1999) establecen que las recargas principales a este sistema serían por la Quebrada de Tarapacá y otras quebradas menores, cuyos flujos descenderían por la ladera colindante a la cuenca del Salar del Huasco. Esta hipótesis se apoya en la cuña de agua bicarbonatada que penetra en la pampa desde la ladera occidental de la cordillera, específicamente en el sector ubicado entre Pica y la Quebrada Chacarillas (Figura 8.5). Sin embargo, al analizar la relación que podría existir entre la hidrogeoquímica de los salares del Huasco y de Pintados, Risacher et al. (1999) utilizando principalmente Mg como elemento guía, no observa una relación directa. Las aguas cercanas a la cordillera poseen los valores más bajos de Mg, mientras que las del Salar del Huasco poseen concentraciones sustancialmente mayores que las de otras cuencas altiplánicas. Concluyen que difícilmente habría una infiltración importante desde el relleno sedimentario de la cuenca Salar del Huasco, y atribuyen las diferencias de Mg a la litología. A pesar de esta conclusión, el Salar del Huasco como parte de un mosaico de salares del Altiplano que en conjunto contribuirían a la recarga de la Pampa del Tamarugal, podría aportar sus aguas ricas en Mg, pero éstas se diluirían al generarse una mezcla de aguas con distintas composiciones químicas. Este potulado puede apoyarse en el hecho de que el mismo estudio menciona como un punto interesante el que en Pica se reconocen cuatro tipos distintos de agua, que incluyen algún contenido de magnesio.

En la misma línea, Tröger y Gerstner (2004, Ref. 14) planteó que las estructuras de orientación aproximada norte-sur que se encuentran al oeste del salar constituyen una barrera hidráulica para el flujo subterráneo proveniente de este lado de la hoya hidrográfica. Esto debido a que son transversales a la topografía y a los flujos de agua subterránea inferidos, definiendo como parte del graben una divisoria hidrogeológica (ver Figura 3.11 y Figura 3.12 en páginas 33 y

34, respectivamente). El mismo autor, de forma similar a lo planteado por Risacher et al. (1999), descarta la posibilidad de que las aguas del acuífero sedimentario de Huasco estén vinculadas al sector de Pica u otras áreas afluentes a la Pampa del Tamarugal debido a la composición química de las aguas.



Fuentes: [Google Earth, 2009; Risacher et al., 1999]

Figura 8.5: Relación espacial entre los salares del Altiplano y los tipos de agua zonificados en la cuenca del Salar de Pintados por Risacher et al., 1999. Las flechas indican la dirección que seguiría el flujo de acuerdo a la composición química de las aguas.

Los datos isotópicos de que se dispone, respaldan el hecho de que la recarga al sector acuífero de Pica proviene de los Altos de Pica, en alturas que superan los 3.500 msnm. En el estudio realizado por el convenio DGA – CCHEN (S.I.T. Nº 48, 1998, Ref. 21 de este estudio) se descarta el hecho de que el agua subterránea de los sectores en la parte alta de la cuenca Pampa del Tamarugal provenga de la cuenca Salar del Huasco, debido al afloramiento de vertientes en la parte oeste del propio salar. Además, se apoyan en la edad relativa de las aguas del acuífero de Huasco, que presenta datación (^{14}C y ^{3}H) similar al de otras cuencas

endorreicas de la zona, como la misma Pampa del Tamarugal y finalmente en el error de cierre de balance que entrega el Balance Hídrico de Chile (1987) con la información hasta esa fecha disponible. Salvo esta última conclusión, las otras no parecen concluyentes sobre el tema, aunque son elementos que representan interesantes tesis sobre la conexión. La falta de un monitoreo continuo de precipitación, magnitud y contenido isotópico, dificulta realizar conclusiones certeras respecto a las zonas de recarga de los acuíferos en estas cuencas.

Siguiendo con el postulado de Tröger y Gerstner (2004), el estudio motivó la realización de la investigación "Antecedentes Levantamiento Geofísico TEM Salar del Huasco" realizado el 2006 (Ref. 19), cuya conclusión indica que las fallas de orientación aproximada norte-sur no serían limitantes para los flujos subterráneos desde el oeste de la cuenca con dirección al salar, dado que han producido un fracturamiento que ha inducido estructuras más pequeñas de forma transversal, a través de las cuales habrían escurrimientos hacia la depresión. El modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca, adoptado en los antecedentes y en el presente estudio, considera que el área de la cuenca hidrogeológica está constituída por toda el área de drenaje de la cuenca hidrográfica.

Igualmente, se plantea en el presente estudio que las fallas principales de orientación NNE-SSW sobre las que se discute, podrían eventualmente representar caminos preferenciales que transporten una fracción del agua de recarga en la sección oeste de la cuenca hacia la Pampa del Tamarugal. Retomando la discusión planteada por Risacher et al. (1999) sobre la posible influencia de la cuenca del Salar del Huasco sobre la Quebrada de Chacarilla (Figura 8.6), se tienen algunas evidencias que mantienen en pie la discusión. Por un lado existen lineamientos estructurales que se podrían comportar como fracturas de flujo preferencial, por otro, la mezcla de composiciones químicas encontradas en Pica y, finalmente, afloramientos de agua y parches de vegetación en la cabecera de Quebrada Alona (Figura 8.7) indican que ésta se mezclaría con los aportes provenientes del sur (Quebrada Caya) para dar lugar a bofedales aguas abajo en la Quebrada de Chacarilla.

Una vez más, y en beneficio de zanjar este asunto, se propone la utilización de colectores de precipitación para análisis isotópicos funcionando continuamente, junto a pluviómetos que permitan cuantificar la magnitud de estos aportes, lo que ayudaría a establecer la altura de recarga de las cuencas como Pintados y Salar del Huasco, del mismo modo que caracterizar hidrogeoquímicamente las aguas de las quebradas Alona, Caya y Chacarilla de forma independiente, que permitiría aportar más antecedentes para esta eventual relación recarga – descarga.



Figura 8.6: Vista regional donde se destacan las estructuras de la Hoja Collacagua y las quebradas que desembocan en la Pampa del Tamarugal. La flecha con orientación aproximada norte-sur indica la eventual dirección de un flujo captado por la zona de drenaje poniente de la cuenca. El cuadro en la confluencia de las quebradas Chara y Caya se presenta en detalle en la Figura 8.7.



Fuente: [Google Earth, 2009. Imagen del 28.02.2006] Figura 8.7: Zonas con vegetación en las nacientes de la Quebrada de Alona.

Por otra parte, la información piezométrica diponible en la cuenca Salar del Huasco está concentrada en el valle de Collacagua y las pampas aledañas, donde se ha realizado la principal exploración a la fecha. Además, se cuenta con información de pozos operados en la cuenca Lagunillas, por Compañía Minera Cerro Colorado (CMCC) de BHP Billiton. Los niveles piezométricos reportados en el informe semestral de enero - junio de 2007 (Ref. 20), indican que la cota del agua subterránea estaría más alta que la registrada en los pozos de Huasco, así como de sus afloramientos que forman sistemas vegetacionales donde el agua subterránea aparece en superficie y evapora a la atmósfera. Usando los niveles de terreno del raster de que se dispuso (Ref. 2) y contrastando con la información de Google Earth para mantener una referencia, los niveles del pozo P-4 en Lagunillas (más cercano a la cuenca Salar del Huasco), se encuentran a una cota en el rango aproximado de 4.010 - 4.017 msnm. Por su parte, la Laguna Huantija que es el principal cuerpo de agua en la cuenca Lagunillas presenta una cota aproximada igual a 4.017 msnm. En Huasco, los niveles de los pozos más septentrionales varían entre 3.860 y 3.930 msnm. Una eventual descarga desde Lagunillas a la cuenca Salar del Huasco se puede estudiar usando elementros químicos traza e isótopos, así como apoyándose en antecedentes geofísicos en las zonas de más probable conexión, para conocer el material de subsuperficie y las estructuras que estarían permitiendo u orientando este paso.
8.5 Estimación de la Recarga

La recarga de los acuíferos altiplánicos tiene como fuente principal la precipitación, que se infiltra en zonas de mayor permeabilidad, favorecida por eventos de mayor magnitud que son capaces de saturar el suelo y conducir agua hasta el acuífero. Otras fuentes comunes de recarga corresponden a usos consuntivos como el riego, pero su influencia en la zona de estudio es despreciable. De igual forma, la recarga desde cursos superficiales también se considera menor respecto de aquella que se produce por precipitación.

En cuencas con una fuerte influencia volcánica y tectónica, como las del Altiplano y la Puna, la presencia de estructuras condiciona la conexión entre cuencas, a través de las cuales se producen tanto recargas como descargas que sustentan flujos de tipo regional. También existen cuencas hidrogeológicas que se extienden más allá de los límites definidos por las divisorias de agua superficial, compartiendo recursos subterráneos a través de rellenos sedimentarios.

A continuación se presentan las recargas estimadas de acuerdo a la metodología escogida en este estudio, que considera la litología de superficie de las cuencas, la influencia de los cauces en la geomorfología y los montos de precipitación en distintas bandas de altura.

8.5.1 Recarga del Sistema

La recarga en la cuenca del Salar del Huasco en la I Región tiene como fuente principal las precipitaciones que se producen en la cordillera que la rodean. Este sector sólo constituye una zona de transferencia del agua subterránea hacia las zonas más bajas de la cuenca, donde se presentan rellenos de depósitos aluviales y depósitos evaporíticos (salares), que corresponden a los sectores con mayor potencial hidrogeológico reconocido en esta cuenca. Debido al carácter endorreico de la cuenca de Huasco, la única descarga que presentan es la evaporación, por lo que la calidad de las aguas empeora, debido al aumento de la concentración de sales, a medida que se avanza desde la cabecera de la cuenca hacia las zonas bajas.

A continuación se realiza una estimación de la recarga media anual de largo plazo, estimada por medio de balances de masa y de coeficientes de infiltración y escorrentía que ponderan las características hidráulicas de las unidades litológicas presentes. La recarga por precipitación se calculó como la suma de una recarga directa (R_D) dada por la precipitación que cae sobre los depósitos sedimentarios, y una recarga lateral o de piedemonte (R_L), producida por la precipitación que cae sobre la roca impermeable o semipermeable de la cuenca aportante. La Figura 8.8 presenta un esquema de los términos del balance hídrico que se realiza en cada unidad litológica, para la recarga directa y la lateral.

460625 COPIA

El balance hídrico en un volumen de control establece que las entradas menos las salidas al sistema son iguales al cambio en el almacenamiento. Cuando este balance se realiza en el largo plazo, sobre intervalos de tiempo mayores a 1 año, el cambio en el almacenamiento es despreciable.



Figura 8.8: Esquema conceptual del balance hídrico en las unidades litológicas para estimar la recarga en el sistema piloto (a) Recarga directa. (b) Recarga lateral

Para estimar la recarga directa (R_D) se aplica el siguiente balance en el volumen de control (Figura 8.8a):

 $PP \cdot A_{RD} = ET + Q + R_D.$

Siendo *PP* la precipitación $[LT^{-1}]$, A_{RD} es el área de la unidad litológica $[L^2]$, ET es la evapotranspiración $[L^3T^{-1}]$, y *Q* son los escurrimientos superficiales $[L^3T^{-1}]$. En zonas áridas la escasez de precipitaciones y la elevada evapotranspiración potencial en suelos con baja cobertura vegetal produce que la mayor parte de la precipitación se evapore sin lograr escurrir superficialmente. Por consiguiente, el término *Q* de la ecuación anterior puede despreciarse, de tal manera que una parte precipitación se devuelve a la atmósfera como evapotranspiración y otra se infiltra transformándose en recarga. La parte de la precipitación que se infiltra puede calcularse mediante un coeficiente de infiltración (*C_I*), por lo tanto, la evapotranspiración se determina con la siguiente expresión:

 $ET = (1 - C_I)PP \cdot A_{RD}.$

Finalmente la recarga directa (R_D) se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_D = C_I \cdot PP \cdot A_{RD}.$$

Donde C_I es un coeficiente de infiltración estimado entre 0,05 y 0,30 dependiendo del grado de permeabilidad y consolidación de la unidad litológica analizada.

La recarga lateral (R_L) se produce en unidades litológicas impermeables o semipermeables, donde ocurren pequeños escurrimientos a partir de los cuales se origina la recarga (Figura 8.8b). El volumen de control puede dividirse en dos partes, la primera donde se producen los escurrimientos y la segunda que corresponde a los cauces desde donde se produce la recarga. El balance hídrico en el primer volumen de control establece:

$$PP \cdot A_{RL} = ET_1 + Q_1.$$

Siendo *PP* la precipitación $[LT^{-1}]$, A_{RL} es el área de la unidad litológica $[L^2]$, ET_1 es la evapotranspiración $[L^3T^{-1}]$, y Q_I son los escurrimientos superficiales $[L^3T^{-1}]$. La evapotranspiración puede estimarse en función de precipitación (*PP*) mediante un coeficiente de escurrimiento (*C_E*), de tal manera que:

$$ET_1 = (1 - C_E)PP \cdot A_{RL}.$$

Por lo tanto:

$$Q_1 = C_E \cdot PP \cdot A_{RL}$$

Donde, C_E es un coeficiente de escorrentía, que se estimó en 0,13 para las cuencas altiplánicas, de acuerdo a "Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la Cuenca del Salar se Coposa" (DICTUC, 2005). Realizando el balance en la segunda parte del volumen de control se tiene:

$$Q_1 = ET_2 + Q + R_L.$$

Siendo ET_2 la evapotranspiración, la que puede estimarse en función de un coeficiente de infiltración (C_1):

$$ET_2 = (1 - C_I)Q_1$$
.

Combinando con el balance realizado en la primera parte del volumen de control y despreciando el escurrimiento Q, por tratarse de una zona árida se obtiene finalmente la recarga lateral (R_L):

$R_{\scriptscriptstyle L} = C_{\scriptscriptstyle I} \cdot C_{\scriptscriptstyle E} \cdot PP \cdot A_{\scriptscriptstyle RL} \, .$

El valor del coeficiente de infiltración (C_I) depende de la magnitud y duración de cada evento de precipitación, de la textura del suelo y condición antecedente de humedad. Sin embargo, para estimar la recarga en el largo plazo es posible despreciar los efectos de los eventos individuales de precipitación y de la condición antecedente de humedad, de tal manera que C_I tenga dependencia solamente en la textura del suelo. Xu et al. (2005) determinó para cuencas semiáridas un coeficiente de escorrentía promedio de 0,31 en suelos con alta permeabilidad. Por otra parte, Wang et al. (2008) estimaron un valor de C_I de 0,082 para suelos de permeabilidad baja en zonas semiáridas. Con estas consideraciones se estimaron un conjunto de valores para el coeficiente C_I en función de la permeabilidad cualitativa de las unidades litológicas, los cuales se presentan en la Tabla 8.8.

Tabla 8.8: Valores del coeficiente de infiltración (C_I) en función de la permeabilidad cualitativa de las unidades litológicas.

Permeabilidad cualitativa	C_I
Alta	0,30
Media a Alta	0,25
Media	0,20
Media a Baja	0,15
Baja	0,10
Muy Baja	0,05

La metodología para el cálculo de la recarga no considera los efectos de la morfología local del terreno y condiciones de almacenamiento en el suelo, introduciendo cierta incertidumbre a los valores de recarga. Por consiguiente, se estableció una variación de $\pm 20\%$ en los valores de C_E y C_I de tal forma de obtener un rango de los valores de la recarga de largo plazo en la cuencas del sistema piloto.

Con el fin de introducir el efecto de la variación espacial de la precipitación en la estimación de la recarga, la cuenca del sistema piloto fue dividida en bandas de altura de 500 metros, donde la precipitación a la altura media de la banda se considera representativa de esa zona. Los valores de la precipitación en cada banda fueron obtenidos del mapa de isoyetas medias anuales (Figura 6.26).

Las unidades litológicas al interior de la cuenca fueron obtenidas de la Carta Geológica de Chile, Hoja Collacagua, escala 1:250.000 (Vergara y Thomas, 1984) y mediante fotointerpretación utilizando el programa Google Earth. La asignación de la permeabilidad cualitativa a estas unidades se realizó en función de la descripción litológica y fotointerpretación, identificando las zonas con mayor infiltración donde se presentan cauces difusos. Adicionalmente se verificó con los resultados de pruebas infiltración realizadas en la cuenca por Acosta (2004). En la Figura 8.9 se presenta la distribución espacial de las unidades litológicas junto con la permeabilidad cualitativa.

460625 COPIA



Figura 8.9: Unidades litológicas y características hidráulicas presentes en la cuenca del sistema piloto de la I Región.

Con el fin de validar los valores de los coeficientes C_I y C_E utilizados en el cálculo de la recarga, se compararon los resultados obtenidos con las estimaciones realizadas en el "Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la Cuenca del Salar se Coposa" (DICTUC, 2005) para las subcuencas Río Piga en Collacagua y Río Collacagua en Peñablanca. Estas subcuencas se localizan al interior de la cuenca del Salar del Huasco según se muestra en la Figura 8.9. En el estudio realizado por DICTUC (2005) la recarga se calculó mediante un modelo lluvia-escorrentía a nivel diario basado en el modelo HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2000) y considera relaciones para estimar la escorrentía directa y el flujo base generado por la cuenca, así como también el almacenamiento en el suelo y los acuíferos. Los procesos básicos considerados en este modelo son la precipitación, escurrimiento, infiltración, evaporación y percolación profunda.

Utilizando los valores originales de los coeficientes C_E y C_I y realizando una variación del ±20% se obtuvieron valores de la recarga mínima, media y máxima en las subcuencas del Río Piga en Collacagua y Río Collacagua en Peñablanca, los que se presentan en forma consolidada en la Tabla 8.9 y Tabla 8.10, respectivamente. Adicionalmente se compara con los resultados obtenidos en otros estudios. La Tabla 8.11 y Tabla 8.12 presenta el detalle del calculo de la recarga en las subcuencas del Río Piga en Collacagua y Río Collacagua en Peñablanca, respectivamente.

Fuente	Area	PP	Reca	rga Mí	nima	Rec	arga Me	edia	Reca	rga Má	xima
	(km ²)	(mm)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)
DIHA-PUC (2009)	205,2	153,2	19,8	128,6	13,1	24,9	162,3	16,5	30,2	196,5	19,9
DICTUC (2005)	216,1	173,8	24,8	169,9	14,3	32,9	225,4	18,9	39,2	268,6	22,6
Acosta (2004)	201,4	183,5	26,2	167,6	14,3	36,3	232,1	19,8	40,5	258,6	22,1

Tabla 8.9: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en Río Piga en Collacagua.

Tabla 8.10: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en Río Collacagua en Peñablanca.

Fuente	Area	PP	Reca	rga Mí	nima	Rec	arga Me	edia	Reca	rga Má	xima
	(km ²)	(mm)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)
DIHA-PUC (2009)	518,4	150,5	22,0	361,4	14,7	27,7	454,5	18,5	33,4	548,8	22,3
DICTUC (2005)	465,2	158,1	15,9	234,7	10,1	29,4	433,5	18,6	34,9	515,3	22,1
Acosta (2004)	443,4	180,7	27,7	389,5	15,3	41,2	578,6	22,8	48,1	676,6	26,6

Ŋ	4
62	Б
0	0
4	0

a.	
la 8.11. Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Piga en Collacague	

		Recarga	Mínima						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	Ы	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	R	tecarga	
(msm)				(km ²) ((mm/año)		(mm/año)	(L/s)	(W PP)
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	0,3	139,2	0,10 0,12	1,7	0,0	1,2
3.908-4.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	2,8	139,2	0,24	33,4	3,0	24,0
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	4,2	139,2	0,20	27,8	3,7	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,2	149,6	0,10 $0,04$	0,6	0,0	0,4
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	43,5	149,6	0,10 0,12	1,9	2,6	1,2
4.000-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	42,3	149,6	0,24	35,9	48,2	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	14,6	149,6	$0,10 \ 0,08$	1,2	0,6	0,8
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	53,8	149,6	0,20	29,9	51,1	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,5	167,6	0,10 0,04	0,7	0,0	0,4
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	12,3	167,6	0,10 0,12	2,1	0,8	1,2
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	13,1	167,6	0,24	40,2	16,7	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	15,1	167,6	$0,10 \ 0,08$	1,4	0,7	0,8
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	0,6	167,6	0,20	33,5	0, 6	20,0
5 000 5 110	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	179,2	0,24	43,0	0, 6	24,0
0+1.0-000.0	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,4	179,2	$0,10 \ 0,08$	1,5	0,1	0,8
Cuenca Completa				205,2	153,2		19,8	128,6	13,1

	-
D	
N	
9	4
Q	0
Q.	()
$\mathbf{\nabla}$	$\mathbf{\overline{\mathbf{v}}}$

1 auta 0.111. Va	icato ao 1a 100ai ga 011 1a suucachea ao	TIND TIER CIT	Uniavagua (UU	וותוומכו	(111)					
		Recarge	ı Media							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	C_{E}	C	R	ecarga	
(msm)				(km ²) ((mm/año)			(mm/año)	(L/s)	(% PP)
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	0,3	139,2	0,13	0,15	2,7	0,0	2,0
3.908-4.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	2,8	139,2		0,30	41,8	3,8	30,0
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	4,2	139,2		0,25	34,8	4,6	25,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,2	149,6	0,13	0,05	1,0	0,0	0,7
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	43,5	149,6	0,13	0,15	2,9	4,0	2,0
4.000-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	42,3	149,6		0,30	44,9	60,2	30,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	14,6	149,6	0,13	0,10	1,9	0,9	1,3
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	53,8	149,6		0,25	37,4	63,8	25,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,5	167,6	0,13	0,05	1,1	0,0	0,7
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	12,3	167,6	0,13	0,15	3,3	1,3	2,0
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	13,1	167,6		0,30	50,3	20,9	30,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	15,1	167,6	0,13	0,10	2,2	1,0	1,3
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	0,6	167,6		0,25	41,9	0,8	25,0
5 000 5 148	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	179,2		0,30	53,7	0,8	30,0
0+1.0-000.0	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,4	179,2	0,13	0,10	2,3	0,1	1,3

Tabla 8.11. Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Piga en Collacagua (Continuación)

16,5

24,9 162,3

153,2

205,2

Cuenca Completa

വ	A
3	d
9	Q
4	0

	0	Recarda							
		Inclaiga r	VI 4A11114						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad 7	lipo de Recarga	Área	ЪР	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	R	ecarga	
(msnm)				(km ²) ((mm/año)		(mm/año)	(L/s)	(% PP)
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	0,3	139,2	$0,16\ 0,18$	3,9	0,0	2,8
3.908-4.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	2,8	139,2	0,36	50,1	4,5	36,0
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	4,2	139,2	0,30	41,8	5,6	30,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,2	149,6	0,16 0,06	1,4	0,0	0,9
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	43,5	149,6	$0,16\ 0,18$	4,2	5,8	2,8
4.000-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	42,3	149,6	0,36	53,8	72,3	36,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	14,6	149,6	0,16 $0,12$	2,8	1,3	1,9
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	53,8	149,6	0,30	44,9	76,6	30,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,5	167,6	0,16 0,06	1,6	0,0	0,9
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	12,3	167, 6	$0,16\ 0,18$	4,7	1,8	2,8
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	13,1	167,6	0,36	60,3	25,1	36,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	15,1	167,6	0,16 $0,12$	3,1	1,5	1,9
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	0,6	167,6	0,30	50,3	0,9	30,0
5 000 5 148	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	179,2	0,36	64,5	6,0	36,0
0+1.0-000.0	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,4	179,2	$0,16 \ 0,12$	3,4	0,2	1.9
Cuenca Completa				205,2	153,2		30,2	196,5	19,9

Tabla 8.11. Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Piga en Collacagua. (Continuación)

22	Z
00	Р
46	C

en Peñablanca.
Collacagua
del Río
a subcuenca
n lá
la recarga e
de
Cálculo
12.
Tabla 8.

		Recarga	Mínima						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	CECE	_	Recarga	
(msnm)				(km^2)	(mm/año)		(mm/año)	(L/s)	(% PP)
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	4,0	139,9	0,10 $0,1$	2 1,7	0,2	1,2
3.847-4.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	17,8	139,9	0,2	.4 33,6	18,9	24,0
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	34,9	139,9	0,2	0 28,0	31,0	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	3,6	150,1	0,10 0,0	0,6	0,1	0,4
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	85,5	150,1	0,10 $0,1$	2 1,9	5,1	1,2
4.000-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	77,6	150,1	0,2	.4 36,0	88,6	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	24,2	150,1	0,10 0,0	8 1,2	1,0	0,8
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	170,7	150,1	0,2	0 30,0	162,5	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	4,9	157,2	0,10 0,0	0,7	0,1	0,4
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	22,2	157,2	0,10 $0,1$	2 2,0	1,4	1,2
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	13,9	157,2	0,2	.4 37,7	16,6	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	22,2	157,2	0,10 0,0	8 1,3	0,9	0,8
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	34,5	157,2	0,2	0 31,4	34,4	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,7	166,0	0,10 0,0	0,7	0,0	0,4
5.000-5.200	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	166,0	0,2	.4 39,8	0,6	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,5	166,0	0,10 0,C	8 1,4	0,1	0,8
Cuenca Completa				518,4	150,5		22,0	361,4	14,7

2,0

2,0

0,7

1,3

0,7 2,0 0,7

1,3

1,3

30,0 25,030,0 25,0 30,0 25,0 30,0 18,5 (W PP) Recarga 0,3 7,9 1,5 0,21, 4, 143,0454,5 (mm/año) (L/s) 23,7 38,7 45,0 110,8 2,2 20,7 0,0 0,7 0,10,1203,1 42,0 35,0 2,0 37,5 1,02,9 1,047,2 27,7 39,3 49,8 2,0 2,7 3,1 1,1 2,20,150,300,250,150,300,100,25 0,300,100,25 0,05 0,300,100,13 0,15 0,13 0,05 0,13 0,05 Ū 0,130,13 0,130,130,130,13 Ű (mm/año) 139,9139,9 157,2 157,2 166,0166,0139,9 157,2 157,2 166,0150,5 150,1 150,1157,2 150,1 150,1 150,1 РР 17,8 34,9 1.5 (km^2) 4,0 3,6 85,5 77,6 24,2 4, 9, 22,2 13,9 22,2 34,5 170,7 0,5 518,4 0,7 Área Permeabilidad Tipo de Recarga Lateral Directa Directa Lateral Directa Lateral Directa Lateral Lateral Directa Lateral Directa Lateral Directa Lateral Lateral Recarga Media Media a Baja Media a Baja Media a Alta Media a Baja Media a Alta Media a Alta Muy Baja Muy Baja Muy Baja Alta Baja Alta Baja Alta Alta Baja Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH Centros volc. erosionados, ign. y salar Centros volc. erosionados, ign. y salar Centros volc. erosionados, ign. y salar Unidad Litológica Centros y depósitos volc. Centros y depósitos volc. Centros y depósitos volc. Dep. sedimentarios Dep. sedimentarios Dep. sedimentarios Dep. sedimentarios Ignimbritas Ignimbritas Ignimbritas Cuenca Completa Banda de altura 4.500-5.000 5.000-5.200 3.847-4.000 4.000-4.500 (mnsm)

Tabla 8.12. Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Collacagua en Peñablanca. (Continuación)

36,0 30,0 36,0 30,0 30,0 36,0 36,0 22,3 (W PP) Recarga 28,4 46,5 11,42,2243,8 24,9 51,6548,8 0,5 0,2 54,1 133,0 0,2 0,0 0,9 0,2 (mm/año) (L/s) 2,1 3,1 42,04,2 2,8 45,056,6 50,4 1,52,9 1,633,4 47,2 59,8 3,9 1,4 4 4 3,1 0,360,360,360,300,300,360,300,120,16 0,18 0,16 0,18 0,16 0,18 0,16 0,12 0,16 0,06 0,16 0,12 0,16 0,06 0,16 0,06 Ū 0,16Ű (mm/año) 139,9139,9 157,2 157,2 166,0166,0139,9 150,1 150,1157,2 157,2 157,2 166,0150,5 150,1 150,1 150,1 РР 17,8 34,9 0,5 1.5 (km^2) 4,0 3,6 85,5 77,6 24,2 4, 9, 22,2 13,9 22,2 34,5 170,7 518,4 0,7 Área Permeabilidad Tipo de Recarga Lateral Directa Directa Lateral Directa Lateral Directa Lateral Lateral Directa Lateral Directa Lateral Directa Lateral Lateral Recarga Máxima Media a Baja Media a Alta Media a Baja Media a Baja Media a Alta Media a Alta Muy Baja Muy Baja Muy Baja Alta Baja Alta Baja Alta Alta Baja Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH Centros volc. erosionados, ign. y salar Centros volc. erosionados, ign. y salar Centros volc. erosionados, ign. y salar Unidad Litológica Centros y depósitos volc. Centros y depósitos volc. Centros y depósitos volc. Dep. sedimentarios Dep. sedimentarios Dep. sedimentarios Dep. sedimentarios Ignimbritas Ignimbritas Ignimbritas Cuenca Completa Banda de altura 4.500-5.000 5.000-5.200 3.847-4.000 4.000-4.500 (mnsm)

0,9

2,8

1,9

0,9

1,9

2,8

0,9

1,9

2,8

Tabla 8.12. Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Collacagua en Peñablanca. (Continuación)

Se observa que los valores de recarga en los diferentes estudios para las dos subcuencas son similares a los obtenidos aplicando los coeficientes C_I y C_E , especialmente en la subcuenca del Río Collacagua en Peñablanca. Por consiguiente, el método de cálculo de la recarga de largo plazo mediante coeficientes de escorrentía e infiltración entrega una buena estimación si se compara con métodos que utilizan series de precipitación y escurrimientos a nivel diario y mensual. Aplicando este método a la cuenca del Salar del Huasco y realizando una variación del ±20% en los coeficientes C_E y C_I se obtuvieron valores de la recarga mínima, media y máxima, los que se presentan en forma consolidada en la Tabla 8.13. Adicionalmente se compara con los resultados obtenidos en otros estudios. La Tabla 8.14 presenta el detalle del calculo de la recarga en la cuenca del Salar del Huasco.

Tabla 8.13. Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en la cuenca del Salar del Huasco.

Fuente	Area	PP	Re	carga Mí	nima	Re	ecarga Me	edia	Re	carga Má	xima
	(km ²)	(mm)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)
DIHA-PUC (2009)	1.470,7	145,2	19,7	920,1	13,8	24,8	1.158,7	17,3	30,0	1.400,6	20,9
Acosta (2004)	1.498,1	163,2	24,0	1.140,2	13,5	33,2	1.579,1	18,1	43,2	2.051,8	25,1

വ	
N	-
9	<u> </u>
0	0
9	Ö
\mathbf{A}	<u> </u>

1 auja 0.14. Ca	licuto de la tecaiza en la cuenca del da	TIAL UCI ITUASUL								
		Recarga	Mínima							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	C_E	C	R	lecarga	
(msnm)				(km ²)	(mm/año)			(mm/año)	(L/s)	(% PP)
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	112,8	134,1	0,10	0,12	1,7	6,0	1,2
	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	170,0	134,1		0,24	32,2	173,5	24,0
0.112-4.000	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	10,0	134,1	0,10	0,08	1,1	0,4	0,8
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	187,9	134,1		0,20	26,8	159,8	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	11,3	146,9	0,10	0,04	0,6	0,2	0,4
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	206,3	146,9	0,10	0,12	1,8	12,0	1,2
4.000-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	146,6	146,9		0,24	35,3	163,8	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	99,5	146,9	0,10	0,08	1,2	3,9	0,8
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	330,1	146,9		0,20	29,4	307,5	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	26,3	164,9	0,10	0,04	0,7	0,6	0,4
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	22,1	164,9	0,10	0,12	2,1	1,4	1,2
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	14,9	164,9	-	$0,\!24$	39,6	18,7	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	62,1	164,9	0,10	0,08	1,4	2,7	0,8
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	62,9	164,9		0,20	33,0	68,9	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	2,7	177,2	0,10	0,04	0,7	0,1	0,4
5.000-5.234	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	177,2		0,24	42,5	0,6	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,8	177,2	0,10	0,08	1,5	0,1	0,8
Cuenca Completa				1.470.7	145.2			19.7	920.1	13.8

Tabla 8.14. Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar del Huasco.

273

വ	
2	2
8	ä
3	X
4	U

Tabla 8.14. Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar del Huasco. (Continuación)

		Recarge	a Media						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЬР	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	R	ecarga	
(mnsm)				(km^2)	(mm/año)		(mm/año)	(L/s)	(% PP)
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	112,8	134,1	0,13 0,15	2,6	9,4	2,0
	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	170,0	134,1	0,3(40,2	216,8	30,0
0.112-4.000	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	10,0	134,1	0,13 0,10	1,7	0,6	1,3
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	187,9	134,1	0,25	33,5	199,7	25,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	11,3	146,9	0,13 0,05	1,0	0,3	0,7
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	206,3	146,9	0,13 0,15	2,9	18,7	2,0
4.000-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	146,6	146,9	0,3(44,1	204,8	30,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	99,5	146,9	0,13 0,10	1,9	6,0	1,3
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	330,1	146,9	0,25	36,7	384,4	25,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	26,3	164,9	0,13 0,05	1,1	0,9	0,7
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	22,1	164,9	0,13 0,15	3,2	2,3	2,0
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	14,9	164,9	0,3(49,5	23,4	30,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	62,1	164,9	0,13 0,10	2,1	4,2	1,3
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	62,9	164,9	0,25	41,2	86,1	25,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	2,7	177,2	0,13 0,05	1,2	0,1	0,7
5.000-5.234	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	177,2	0,3(53,1	0,8	30,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,8	177,2	0,13 0,10	2,3	0,1	1,3
Cuenca Completa				1.470,7	145,2		24,8	1.158,7	17,3

274

വ	
2	2
8	5
3	<u> </u>
4	\mathbf{O}

0,9 (% PP) 2,8 36,0 1,930,0 0,9 36,0 1,930,0 0,9 2,8 36,0 1,930,0 36,0 1,920,9 2,8 13,5 0,8 239,6 0,5 245,8 260,2 27,0 8,7 461,3 0,9 1,33,3 103,4 0.230,0 1.400,6 28,16,1 0,1(L/s) Recarga (mm/año) 3,8 2,5 40,2 52,9 2,7 4,6 59,4 49,5 63,8 3,3 48,3 1,51,4 44,1 3,11,7 4,1 0,36 0,360,360,300,300,360,300,16 0,18 134,1 0,16 0,12 146,9 0,16 0,06 146,9 0,16 0,18 146,9 0,16 0,12 164,9 0,16 0,06 164,9 0,16 0,18 164,9 0,16 0,12 0,16 0,06 0,16 0,12 Ū Ъ С 177,2177,2 134,1 146,9 146,9164,9 164,9 177,2 134,1 134,1 145,2 (mm/año) РР 112,8 170,0 10,0187,9 206,3 146,6 99,5 14,9 65.9 (km²) 11,326,3 22,1 62,10,5 1,8330,1 2,7 1.470,7 Área Permeabilidad Tipo de Recarga Lateral Directa Lateral Lateral Lateral Recarga Máxima Media a Baja Media a Baja Media a Alta Media a Alta Media a Baja Media a Alta Muy Baja Muy Baja Muy Baja Baja Baja Alta Baja Alta Alta Alta Baja Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH Centros volc. erosionados, ign. y salar Centros volc. erosionados, ign. y salar Centros volc. erosionados, ign. y salar Unidad Litológica Centros y depósitos volc. Centros y depósitos volc. Centros y depósitos volc. Centros y depósitos volc. Dep. sedimentarios Dep. sedimentarios Dep. sedimentarios Dep. sedimentarios Ignimbritas Ignimbritas Ignimbritas Cuenca Completa Banda de altura 3.772-4.000 4.000-4.500 4.500-5.000 5.000-5.234 (msnm)

Tabla 8.14. Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar del Huasco. (Continuación)

8.5.2 Recarga desde otras cuencas

Considerando lo discutido en el apartado 8.4 "Conexión con otras cuencas" (página 254), se ha planteado una eventual recarga al Salar del Huasco desde Lagunillas, en el norte, sin embargo, no hay evidencias suficientes ni estimaciones de su probable magnitud.

Los modelos conceptuales vigentes sobre el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca Salar del Huasco no incluyen a Laguna Lagunillas como una zona de aporte, aunque ambas cuencas han sido definidas hidrográficamente como una sola en algunos de los antecedentes revisados. Se sugiere estudiar este potencial vínculo entre las cuencas para aclarar la influencia de la explotación en Lagunillas sobre el comportamiento de los recursos hídricos de Huasco.

A pesar de esto, y en forma preliminar, se estima que por la somera profundidad del nivel freático en la zona de descarga por evaporación, la presencia de lagunas y la explotación actual en Lagunillas, la recarga se equilibraría con la suma de estos componentes de la descarga en la cuenca, mostrando que de existir una conexión entre ambas cuencas ésta sería de poca magnitud.

8.6 Descarga del sistema

La descarga se produce normalmente en la forma de escurrimientos superficiales o subterráneos, así como también por evapotranspiración desde lagunas, napas someras y plantas. Por efecto de la explotación o intervención antrópica, ésta se produce normalmente a través de obras de captación como pozos y drenes. La cuenca estudiada en el sistema piloto de la I Región corresponde a una cuenca cerrada, por lo que no existen en forma natural descargas de tipo superficial y predominan las descargas por evapotranspiración.

En la cuenca del Salar del Huasco no se reconocen descargas subterráneas de origen antrópico y carácter permanente, pero si se asumen descargas de carácter superficial de este tipo debido a derechos de agua regularizados. Descargas hacia otras cuencas de forma natural no se han concluido con certeza, aunque existen postulados de que esto podría ocurrir.

A continuación se tratan las descargas de la cuenca del Salar del Huasco, a través de las distintas fuentes, que tienen como objetivo cuantificar las salidas del sistema para efecto del balance hídrico.

8.6.1 Descargas por evaporación

Se estimaron las descargas por evaporación desde superficies de agua libre (lagunas y cauces superficiales), desde sistemas de vegetación (vegas y bofedales) y desde las napas freáticas someras ubicadas bajo los suelos del salar.

8.6.1.1 Evaporación desde cuerpos de agua libre

Un método comúnmente utilizado para estimar la evaporación desde lagunas consiste en relacionar su magnitud con mediciones realizadas en tanques evaporímetros (E_T). La diferencia entre ambas mediciones se corrige aplicando un coeficiente de ajuste (K_T) a la evaporación de tanque observada (Linsley, 1977). De esta forma, la tasa de evaporación desde superficies libres (E_0) quedará definida por la expresión:

 $E_0 = K_T \cdot E_T$

Donde E_0 y E_T se expresan en (mm/día) y K_T es un parámetro adimensional.

Considerando la tasa media de evaporación de tanque registrada en las estaciones 'Collacagua' (DGA) y 'Salar del Huasco' (Collahuasi – GP Consultores), ambas ubicadas dentro de la cuenca (Figura 8.10), se generaron dos escenarios para determinar los flujos de descarga por evaporación. Para el primer escenario (E1) se adoptó el valor medio registrado en la estación

Collahuasi (4,1 mm/d), mientras que para el segundo escenario (E2) la evaporación de tanque se definió en base a la tasa media histórica de la estación Collacagua (6,1 mm/d). Aplicando un factor de corrección de tanque de 0,60 a ambas mediciones (coeficiente utilizado por la DGA en tanques evaporímetros instalados en el Altiplano), se obtuvo una tasa de evaporación desde superficies libres de 3,32 mm/d para el escenario 1 y de 3,97 mm/d para el escenario 2.

Ambos evaporímetros son Clase A, del U. S. Weather Bureau, para los cuales el coeficiente de tanque empírico usado se adecúa a las características climáticas y vegatacionales de la zona. De acuerdo a Shuttleworth (1993), el coeficiente utilizado para áreas con humedad relativa baja (< 40%) y condiciones de viento moderado se mueve en el rango de 0,45 – 0,7; donde 0,6 aparece como un valor apropiado.



Figura 8.10: Estaciones de evaporación de tanque consideradas en cuenca Salar del Huasco.

Para estimar el área ocupada por lagunas, se procesaron imágenes satelitales Landsat, captadas en noviembre de 2006, a partir de las cuales se determinó una superficie de 2,57 km². Otras zonas de agua libre donde ocurre evaporación, son aquellas correspondientes a escurrimientos superficiales. Los principales cauces presentes en la cuenca corresponden a los ríos Piga y Collacagua. Sus secciones fueron divididas en tramos a los que se ha asignando un ancho característico. El área estimada para cauces superficiales permanentes fue de 0,39 km². La Tabla 8.5 muestra una comparación de las descargas estimadas por evaporación desde superficies libres, entre el presente estudio y las propuestas por otros autores.

	, <i>,</i>	
Estudio	Lagunas salar	Cauces superficiales
DGA – PUC (DIHA), E1	99	14
DGA – PUC (DIHA), E2	118	16
Acosta (2004)	178	25
CMDIC – GP Consultores verano (2008)	102	-
Collahuasi-GP Consultores invierno (2008)	160	-

Tabla 8.15: Evaporación desde superficies de agua libre (L/s).

Los caudales de evaporación desde lagunas para los dos escenarios evaluados son similares a los adoptados por Collahuasi– GP Consultores para el período de verano, pero son hasta 35% menores que los propuestos por estos autores para el invierno y por Acosta (2004). La estimación del caudal evaporado desde cauces superficiales realizada por Acosta, presenta diferencias superiores al 80% y 50% con respecto a los escenarios 1 y 2 planteados en este estudio.

8.6.1.2 Evaporación desde vegas y bofedales

En diversos sectores de la cuenca, principalmente en el nacimiento de vertientes y en escurrimientos superficiales permanentes, se desarrollan pequeños sistemas vegetales mixtos denominados vegas y bofedales, que corresponden a formaciones que se establecen en un ambiente edáfico caracterizado por una condición de saturación permanente, presentando una gran diversidad biológica (Salazar et al., 2001).

Para evaluar la evapotranspiración asociada a estos complejos vegetales, se utilizó la información de los tanques evaporímetros Clase A (E_T), aplicándoles un factor de corrección de tanque (K_T) para obtener la evapotranspiración de un cultivo de referencia (E_{cr}). El factor de corrección depende de las condiciones de instalación y del clima predominante en la zona donde está ubicado el instrumento, como se discute en Shuttleworth (1993).

La relación se expresa como:

$$E_{cr} = K_T \cdot E_T$$

Con E_T y E_{cr} en mm/día y K_T adimensional.

Para determinar la evaporación de tanque en vegas y bofedales, se utilizó la información de la estación 'Collacagua', corregiéndola según el gradiente de evaporación determinado en la sección 6.4.2 (0,933 mm/año·metro). Así, la tasa de evaporación de tanque en un cierto bofedal *i*, quedará determinada por:

$$E_{T(i)} = \left(C_{coll} - C_{(i)}\right) \cdot \frac{0.933}{365} + E_{T(coll)}$$

Donde $E_{T(coll)}$ es la evaporación de tanque media en la estación 'Collacagua' (6,1 mm/día), $C_{(i)}$ representa la cota del bofedal *i* (msnm), C_{coll} corresponde a la cota de la estación 'Collacagua' (3.990 msnm) y $E_{T(i)}$ es la evaporación de tanque trasladada al bofedal *i*.

Por otra parte, la relación entre la evapotranspiración de referencia y la que experimenta un suelo con vegetación está dominada por un factor de corrección conocido como coeficiente de cultivo (K_c), el cual depende del tipo de cultivo y de su etapa de desarrollo, entre otros factores.

De esta forma la demanda hídrica de vegas y bofedales queda definida por:

$$ET_c = K_c \cdot E_{cr}$$

Donde ET_c representa la evapotranspiración de las plantas (mm/día). Para estimar el valor de E_{cr} se utilizan las dos ecuaciones planteadas más arriba, primero la de tanque en la cota de la vega o bofedal, a la que luego se le aplica el factor de corrección K_T . La cota asignada al sistema vegetal seleccionado se obtuvo a partir de las imágenes Landsat de Google Earth, siendo la misma fuente usada para la definición de su área.

Salazar et al. (2001) caracterizaron los diferentes grupos vegetacionales que conforman un sistema bofedal ubicado en la cuenca de Isluga. En el trabajo se identificaron 7 unidades a las que se le asignaron coeficientes de cultivo en función del período del año. En el presente estudio sólo se realizó una discretización areal de las zonas con vegetación, sin distinguirse a qué tipo correspondía, por lo que el coeficiente K_c utilizado correspondió al promedio de los propuestos por Salazar et al. para las diferentes unidades, excluyendo los determinados para afloramientos de agua en superficie.

Por simplificación, se ha utilizado un valor único de K_c , que intenta agrupar las condiciones medias de la vegetación durante el periodo de tiempo que se desea estudiar. En este caso particular, el objetivo es aproximarse a la descarga de largo plazo.

El área cubierta por vegas y bofedales se determinó a través del análisis de imágenes satelitales de Google Earth, captadas entre septiembre de 2004 y diciembre de 2006. Se identificaron alrededor de 50 sistemas con un área total de 2,03 km². El caudal de descarga por evapotranspiración desde vegas y bofedales fuera del salar se estimó en el presente estudio en 58 L/s. Acosta (2004), reconoció una superficie de bofedales fuera del área del salar de 2,52 km², determinando un flujo de evapotranspiración de 102 L/s.

Por su parte, el área de vegetación determinada dentro del área del salar fue de 1,55 km² en el presente estudio, con descargas por evapotranspiración de 48 L/s. La Tabla 8.16 presenta un cuadro comparativo con otras estimaciones realizadas en la zona del salar. Se observa que el caudal propuesto es similar a los de GP Consultores, pero representan el 28% de la magnitud estimada por Acosta en 2004.

Estudio	Área vegetación (km²)	Evapotranspiración (L/s)
DGA – PUC (DIHA)	1,55	48
Acosta (2004)	7,04	170
Collahuasi-GP Consultores verano (2008)	1,63	65
Collahuasi-GP Consultores invierno (2008)	0,95	21

Tabla 8.16: Evaporación desde vegas y bofedales en el entorno del Salar del Huasco.

8.6.1.3 Evaporación desde suelo del salar y su entorno

En base a las mediciones de evaporación realizadas con la metodología del domo en la cuenca del Salar del Huasco, se construyó una curva de evaporación versus profundidad de la napa. La metodología empleada y el detalle de las labores que se realizaron se presentan en la Parte VII del presente estudio (Medición de la Evaporación Mediante Método del "Domo").

En particular, en la hoya hidrográfica Salar del Huasco se realizaron mediciones de evaporación desde el suelo en 16 puntos, distribuidos en 4 zonas. Adicionalmente, se cuantificó la evaporación desde superficies libres en 3 de las cuatro zonas mencionadas. Esto se realizó en tanques plásticos de dimensiones conocidas, los que fueron previamente graduados cada 1 mm.

La Figura 8.11 presenta un esquema con la ubicación de las zonas y el detalle con los puntos en que se midió. Se muestran además las profundidades del nivel freático asociadas, las que abarcaron el rango comprendido entre 0,1 y 3,34 m. Los círculos de color azul representan los puntos donde se evaluó evaporación superficial.

La Figura 8.12 muestra la curva de ajuste propuesta para la cuenca. Se observa un alto grado de dispersión en las tasas registradas para profundidades de saturación similares, sin embargo, es posible distinguir una tendencia común para el conjunto de datos disponibles. Los valores son presentados como tasas diarias de evaporación desde los suelos, las que fueron normalizadas en función de las tasas de evaporación desde superficies libres obtenidas durante el mismo período de medición.



Figura 8.11: Puntos de medición evaporación III Región.

Las relaciones analíticas que describen dicha curva pueden expresarse como:

$$E_N = e^{-5.7 \cdot z}$$
 Z < 0,27
 $E_N = 0.083 \cdot z^{-0.714}$ Z > 0,27

Donde E_N representa la tasa de evaporación normalizada (sin unidades) y z la profundidad del nivel freático asociado a dicha tasa (m). Para obtener valores de evaporación desde napas freáticas en la zona, los valores obtenidos de las relaciones anteriores deben ser multiplicados por la evaporación desde superficies libres correspondientes a la zona de estudio.

Al igual que en la evaluación de las descargas por evaporación desde superficies libres, se han evaluado dos escenarios. El primero de ellos corresponde a la utilización de la tasa de evaporación media de la estación 'Salar del Huasco' (Collahuasi– GP Consultores) y el segundo consideró la evaporación registrada en la estación Collacagua (DGA). Los valores de tanque fueron corregidos por un factor de 0,6; obteniéndose tasas de evaporación desde superficies libres de 3,32 mm/d para el escenario1 y de 3,97 mm/d para el escenario2



Figura 8.12: Curva evaporación-profundidad de la napa ajustada en la cuenca Salar del Huasco.

Para estimar las descargas desde el acuífero se discretizó la superficie del salar determinando aquellas representativas de diferentes profundidades de la napa. Las curvas de isoprofundidad trazadas se muestran en la Figura 8.13, mientras que la Figura 8.14 presenta la superficie asociada a cada banda de profundidad del nivel saturado.

La relación entre la topografía del terreno y la elevación del nivel freático se obtuvo a partir de la información proporcionada por 40 punteras distribuidas homogéneamente sobre el área del salar (Collahuasi– GP Consultores, 2008). Los registros de nivel fueron efectuados por Collahuasi– GP Consultores en enero de 2007 y se presentan en la Tabla 8.5.

El área de evaporación (Ae) definida alcanzó los 74 km², considerando aquellos suelos donde la profundidad del nivel freático fuera menor a 10 metros. Cerca del 60% de Ae presenta napas más someras a 1 m.



Figura 8.13: Curvas de isoprofundidad de la napa en el Salar del Huasco.



Figura 8.14: Áreas por banda de isoprofundidad Salar del Huasco.

En la Tabla 8.17 se resumen los flujos de evaporación obtenidos para las distintas bandas de isoprofundidad. Los flujos estimados para el salar fueron de 480 y 575 L/s para los dos escenarios evaluados. Es posible apreciar que menos del 5% de las descargas totales se manifiestan cuando las napas se encuentran a más de 1,5 m de profundidad. Por lo tanto, los errores cometidos al omitir la evaporación generada desde napas más profundas podrían ser bajos.

	Ductundidad	Á maa	Escer	nario 1	Esce	nario 2
Banda	Profunctionad	Area	Evap.	Descarga	Evap.	Descarga
	(m)	(km ²)	(mm/día)	(L/s)	(mm/día)	(L/s)
0,0-0,1	0,05	6,009	2,49	176,87	2,98	211,56
0,1-0,2	0,15	3,927	1,41	68,04	1,69	81,38
0,2-0,3	0,25	5,201	0,80	53,04	0,95	63,44
0,3-0,4	0,35	4,860	0,58	32,75	0,70	39,17
0,4-0,5	0,45	4,621	0,49	26,02	0,58	31,13
0,5-0,6	0,55	5,055	0,42	24,67	0,50	29,51
0,6-0,7	0,65	5,124	0,37	22,19	0,45	26,55
0,7-0,8	0,75	3,798	0,34	14,85	0,40	17,76
0,8-0,9	0,85	3,544	0,31	12,68	0,37	15,16
0,9-1,0	0,95	3,134	0,29	10,35	0,34	12,38
1,0-1,5	1,25	3,912	0,23	10,62	0,28	12,71
1,5-2,0	1,75	1,839	0,18	3,93	0,22	4,70
2,0-2,5	2,25	2,010	0,15	3,59	0,18	4,29
2,5-3,0	2,75	2,146	0,13	3,32	0,16	3,97
3,0-3,5	3,25	1,794	0,12	2,46	0,14	2,94
3,5-4,0	3,75	1,561	0,11	1,94	0,13	2,31
4,0-4,5	4,25	1,107	0,10	1,25	0,12	1,50
4,5-5,0	4,75	0,974	0,09	1,02	0,11	1,22
5,0-6,0	5,5	2,507	0,08	2,36	0,10	2,83
6,0-7,0	6,5	3,203	0,07	2,68	0,09	3,21
7,0-8,0	7,5	3,287	0,07	2,48	0,08	2,97
8,0-9,0	8,5	2,627	0,06	1,82	0,07	2,17
9,0-10	9,5	2,204	0,06	1,41	0,07	1,68
Total		74,4		480,4		574,5

Tabla 8.17: Descargas por evaporación Salar del Huasco.

En la Tabla 8.18 se presenta una comparación entre las descargas por evaporación desde los suelos obtenidas en el presente estudio con otras estimaciones disponibles. Se observa que el valor estimado por Collahuasi– GP Consultores para el período de verano es considerablemente mayor que el resto de las aproximaciones. Los valores registrados representan diferencias de un 30% con respecto a los propuestos por Acosta (2004) y por Collahuasi– GP Consultores para el invierno.

Estudio	Área (km²)	Evaporación (L/s)
DGA – PUC (DIHA)	74,4	480 - 575
Acosta (2004)	54	687
CMDIC – GP Consultores verano (2008)	46	1.454
CMDIC – GP Consultores invierno (2008)	46	398

Tabla 8.18: Evaporación desde los suelos del salar.

8.6.1.4 Resumen de las descargas por evaporación

En la Tabla 8.19 se resumen los resultados de evaporación obtenidos, diferenciando las descargas producidas en la zona del salar y las que se presentan en el resto de la cuenca.

Diversos autores han estimado las descargas por evaporación en el Salar del Huasco. A continuación se listan aquellos trabajos revisados en los antecedentes disponibles.

- La Dirección General de Aguas (DGA, 1987), estimó el flujo de evaporación desde lagunas y salares en 650 L/s.
- Considerando mediciones de evaporación desde los suelos realizadas en la Pampa del Tamarugal, JICA-DGA (1995) propuso valores para las descargas desde el sistema acuífero de 574 L/s.
- Acosta (2004) cuantificó las descargas totales de la cuenca, con resultados que rondan los 1.200 L/s.
- Collahuasi GP Consultores (2008) evaluó la evaporación desde el Salar del Huasco, obteniendo flujos de 1.630 L/s para períodos estivales y de 580 L/s durante el invierno.

Al determinar las descargas de un sistema debe tenerse en consideración el volumen de control sobre el cual se trabajó (salar, acuífero, cuenca). Por este motivo, las comparaciones realizadas con las estimaciones propuestas por la DGA, JICA y Collahuasi–GP Consultores, deben considerar sólo los caudales determinados en el salar, mientras que la comparación con Acosta debe incluir todas las descargas de la cuenca.

Sactor	Área	Caudal (L/s)	
	(km ²)		
Salar			
Lagunas	2,57	99 – 118	
Vegas y bofedales	1,55	48	
Suelo	77,02	480 - 575	
Total salar		627 – 741	
Resto cuenca			
Vegas y bofedales	2,03	58	
Cauces superficiales	0,39	14 - 16	
Total cuenca		699 - 815	

Tabla 8.19: Descargas por evaporación Salar del Huasco estimadas en el presente estudio.

Los caudales estimados en los diferentes estudios para la zona del salar son del mismo orden de magnitud que los determinados con la curva regional (evaporación versus profundidad del nivel saturado) propuesta en esta investigación.

8.6.2 Descarga hacia otra cuenca

Del mismo modo que para las recargas desde otras cuencas, se ha revisado en el apartado 8.4, "Conexión con otras cuencas" (página 254), una eventual descarga desde el Salar del Huasco hacia la cuenca de la Pampa del Tamarugal. Esta descarga se produciría a través del importante diaclasamiento y fracturamiento que hay en la zona de Altos de Pica, captando parte de la recarga en el sector oeste de la hoya hidrográfica de Huasco.

Se han realizado varios estudios que descartan esta posibilidad, basados en información geofísica, hidrogeoquímica e isotópica. No se han estimado valores de descarga y los modelos conceptuales vigentes, incluido el planteado en el presente estudio, consideran que la cuenca hidrogeológica recibe el aporte de toda el área delimitada por la cuenca hidrográfica. En el presente estudio también, se sugiere que una evidencia que contribuiría a descartar o afirmar la conexión es estudiando las aguas de la Quebrada Alona, que tiene entre sus afluentes a la Quebrada Chara (ver Figura 8.6 y Figura 8.7 en páginas 257 y 258, respectivamente), que aparece como una proyección del fallamiento y los lineamientos al oeste del Salar del Huasco.

Se requiere, ciertamente, un monitoreo continuo de las variables hidrológicas, isotópicas e hidrogeoquímcas, principalmente, que resultan de mayor interés para realizar esta comparación.

8.6.3 Descarga a través de vertientes naturales

La laguna permanente del Salar del Huasco y algunas lagunas esporádicas son alimentadas superficialmente por numerosas vertientes que brotan en los márgenes occidental y sur del salar, las que por lo general se manifiestan a mayor altitud que los cuerpos lagunares a los que descargan, con una baja proporción de sólidos disueltos (500-1.000 μ S/cm) y a elevadas temperaturas (15° C) en comparación con la temperatura media dominante a esas alturas (5°C) (Acosta, 2004).

De las vertientes identificadas, las de mayor relevancia son las denominadas Huasco Norte, Ermitaño, Huasco Lípez, Jalsuri y Huasco Sur, según orden de importancia (Figura 8.15). La Dirección General de Aguas realizó mediciones sistemáticas de caudales en dos vertientes ubicadas en el contorno oeste del salar, a saber, V. Huasco Norte y V. Ermitaño. En las vertientes del sector sur, Collahuasi–GP Consultores ha realizado algunas campañas de monitoreo, en las que se han realizado aforos puntuales, evaluado la calidad de las aguas afloradas y evaporadas, y analizado los requerimientos hídricos de los humedales que ellas abastecen.

El sistema de lagunas terminales de evaporación esta compuesto por tres lagunas permanentes identificadas como laguna Grande (o laguna permanente), laguna Jalsure y sistema de lagunas interiores y dos lagunas estacionales denominadas laguna Huasco Norte y Laguna 1 (L1). Su ubicación se muestra en la Figura 8.15.

A través del análisis de imágenes satelitales Landsat captadas en el período 1973 – 2005 e imágenes de alta resolución Quickbird entre los años 2005 y 2007, Collahuasi–GP Consultores estimó la superficie de los espejos de agua en los 5 sistemas reconocidos. La Tabla 8.20 muestra los valores medios, máximos y mininos resultantes.

0					
Laguna/Parámetro	Permanente	Jalsuri	L1	Sistema interior	Huasco Norte
Promedio	215,7	39,8	70,6	15,53	18,03
Mínima	125,2	6,1	0,2	5,84	0,32
Máxima	406,2	145,6	364,7	43,47	47,89

Tabla 8.20: Área lagunas del Salar del Huasco en hectáreas (ha).

La Vertiente Huasco Norte es también conocida como Huasco Grande o Corriente. Se sitúa en el extremo noroeste del salar donde brota agua dulce (~600 μ S/cm) alrededor de 4 m por sobre el nivel de la laguna principal, a una temperatura de 15,5° C y con un caudal medio de 26 L/s según los aforos realizados por la Dirección General de Aguas. Las condiciones de temperatura y salinidad del mantantial difieren considerablemente de las observadas en el

acuífero superior y en la laguna principal, por lo que se trataría de aguas provenientes de flujos más profundos que logran aflorar en superficie a través de grietas o fisuras. El sistema Huasco Norte presenta el mayor bofedal existente en el salar con una superficie de vegetación estimada en 0,5 km², según mediciones realizadas en diciembre de 2003.



Figura 8.15: Descargas a través de vertientes naturales en el Salar del Huasco.

La Vertiente Ermitaño está alrededor de 2,5 km al sur del sistema Huasco Norte. Los aforos realizados por la DGA determinan un caudal promedio de 23 L/s con una desviación estándar de 4 L/s. En este caso, el afloramiento se produce alrededor de 2 m por sobre el nivel medio registrado en las lagunas.

La Vertiente Huasco Sur está ubicada inmediatamente al oeste del sistema Huasco Lípez, y no descarga agua superficial a la laguna principal en forma continua, sin embargo, existe un canal que evidencia su conexión al menos en forma esporádica. Por el momento no se cuenta con mediciones directas del caudal aportante hacia la laguna permanente, pero se ha estimado el consumo evapotranspirativo del humedal en 1,7 L/s, con una variación estacional entre 1,2 y 2,5 L/s. El área de vegetación asociada al humedal alimentado por el afloramiento es de 0,049 km². Por su parte, la calidad de las aguas de abastecimiento al sistema ha sido evaluada en función de la conductividad eléctrica, reportandose valores entre 900 y 1.000 μ S/cm.

El sistema Huasco Lípez se ubica en el sector sur del salar y debido a su constitución morfológica, puede ser dividido en dos subsistemas, este y oeste (Figura 8.15). Los afloramientos del agua subterránea se manifiestan en áreas relativamente grandes pero bien definidas, desde donde escurren en dirección norte, alimentando bofedales y recargando finalmente la laguna permanente del salar. Las áreas de vegetación asociadas a ambos humedales poseen superficies de 0,13 y 0,02 km² para los sistemas oeste y este, respectivamente. De los dos subsistemas establecidos, sólo el Este aporta aguas a la laguna en forma continua. De acuerdo a aforos efectuados cada 15 días durante enero y febrero de 2004 en tres secciones del sistema Huasco Lípez Este (Figura 8.16 (e)), los caudales aportantes hacia la laguna permanente son de 17,5 L/s, de los cuales 11,5 L/s corresponden a la sección B y 6 L/s al punto de aforo C. En la cabecera del afloramiento (punto A), el caudal estimado varió entre 4,3 y 5,3 L/s. En el sector oeste, la demanda evapotranspirativa del humedal, representativa del caudal máximo que no generaría escurrimientos remanentes hacia la laguna permanente, ha sido estudiada por GP Consultores, entregando valores de 0,6 L/s (entre 0,4 y 1,0 L/s) en el punto A; 1,1 L/s (entre 0,7 y 1,6 L/s) para la zona B y de 3,1 L/s (entre 2,1 y 4,6 L/s) para el sector C (Figura 8.16 (d)). Las conductividades electricas registradas varían entre los 900 y 1.000 µS/cm, valores que se mantienen relativamente constantes hasta descargar en la laguna permanente.

El humedal Jalsuri, ubicado en el extremo sureste del salar es alimentado por un afloramiento de agua subterránea de tipo puntal y esporádico, con un caudal, medido por GP Consultores en enero de 2004, de 10,5 L/s. Esta agua escurre superficialmente hacia el norte, formado pequeñas lagunas de evaporación y un humedal de 0,10 km². Superficialmente, el sistema no se encuentra conectado a la laguna permanente. En relación a sus parámetros físico-químicos, Collahuasi-GP Consultores midió en enero de 2004 una conductividad eléctrica de 896 µS/cm.

En la zona central del salar, inmediatamente al norte de la laguna permanente existe una surgencia de relativa importancia, la cual alimenta superficialmente la laguna (Figura 8.15). En el sistema identificado, denominado Chullumpine, no se han realizado mediciones directas de caudal, pero mediante la realización de balances hídricos se ha estimado un flujo de 16 L/s.

En la Tabla 8.21 se muestra un cuadro resumen con la ubicación de las principales vertientes detectadas en el Salar del Huasco, adicionalmente se presenta el caudal determinado en cada una de ellas y el método de estimación utilizado.

Vertiente	Ubicación UTM		Cuadal	Facha	Mátada	Fuonto
	Este	Norte	(L/s)	recha	Metodo	Fucilite
Huasco Norte	513.200	7.759.784	26	Varias [†]	Aforo	DGA
Ermitaño	511.765	7.757.548	23	$Varias^{\dagger}$	Aforo	DGA
Huasco Sur	515.328	7.752.415	2,5	dic-03	Dda EVT*	GP Consultores
Huasco Lipez Oeste						
А	516.266	7.751.988	1	dic-03	Dda EVT*	GP Consultores
В	516.493	7.751.898	1,6	dic-03	Dda EVT*	GP Consultores
С	516.457	7.751.712	4,6	dic-03	Dda EVT*	GP Consultores
Huasco Lípez Este						
А	517.090	7.751.533	4,5	ene-04	Aforo	GP Consultores
В	517.090	7.751.533	11,5	ene-04	Aforo	GP Consultores
С	517.138	7.751.804	6,0	ene-04	Aforo	GP Consultores
Jalsuri	519.400	7.751.612	10,5	ene-04	Aforo	GP Consultores

Tabla 8.21: Estimación de caudales en vertientes aportar	antes a lagunas del Salar del Huasco.
--	---------------------------------------

[†] Varias: corresponde al promedio de varias fechas en que se ha medido.

* Dda EVT: demanda evapotranspirativa.

460625 COPIA



Figura 8.16: Vertientes ubicadas en Salar del Huasco

293

8.6.4 Descargas a través de obras de captación

En la cuenca Salar del Huasco no existen derechos de agua subterránea otorgados, sino sólo solicitudes por parte de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), que aún se encuentran en trámite por parte de la Dirección General de Aguas.

Respecto de las aguas superficiales, algunos derechos solicitados han sido denegados, mientras que otras solicitudes de regularización fueron enviadas al Juez de Letras, por lo que debe chequearse en el Conservador de Pozo Almonte como en el Tribunal la situación legal de estos derechos. Para todos los efectos, la DGA considera estas solicitudes como entregadas, las que se muestran en la Tabla 8.22.

Tabla 8.22: Derechos de agua superficial solicitados en la cuenca Salar del Huasco por la Asociación Indigena Aymará (AIA) Laguna del Huasco. Las coordenadas están en datum PSAD 56, Huso 19 Sur. Todos corresponden al expediente NR-0103-789.

Captación	Ejercicio	Uso	Q. Sol	Coordenadas UTM	
			(L/s)	Norte	Este
Quebrada Coyacoyani	P/C	Agricola	0,22	7.755.552	524.408
Quebrada Rinconada	P/C	Agricola	5,0	7.755.404	524.552
Vertiente Jalsure	P/C	Agricola	16,0	7.751.558	519.456
Vertiente Umakechina	P/C	Agricola	12,0	7.751.454	517.304
Vertiente Huascolipe Nº2	P/C	Agricola	1,0	7.751.802	517.000
Vertiente Huascolipe Nº1	P/C	Agricola	1,5	7.751.906	517.204
Vertiente Huascolipe N°3	P/C	Agricola	0,22	7.752.650	515.154
Vertiente Huascolipe Nº4	P/C	Agricola	13,0	7.752.758	515.154
Vertiente Huascolipe N°5	P/C	Agricola	0,5	7.752.702	515.000
Vertiente Kakavinto	P/C	Agricola	0,22	7.754.254	512.852
Vertiente Huasco Grande	P/C	Agricola	20,0	7.757.000	511.608
Vertiente Chullumpire	P/C	Agricola	24,0	7.754.956	513.704
Vertiente Baño Del Lalo	P/C	Agricola	0,22	7.758.256	511.652
Vertiente Lukas	P/C	Agricola	0,22	7.760.582	513.504
Vertiente Huasco Grande Nº1	P/C	Agricola	24,0	7.759.504	513.504
Total			118,10		

P/C: Permanente y continuo; Q. Sol: Caudal solicitado.
8.7 Balance Hídrico

De acuerdo a lo revisado en éste y los anteriores capítulos, el dominio del estudio consistió en la unidad hidrográfica y las unidades hidrogeológicas del Salar del Huasco. Esta cuenca es de tipo endorreico, por lo que no tienen salidas de carácter superficial y las descargas principales corresponden a los flujos de evaporación desde lagunas y napas someras en la zona del salar, que se emplaza en la depresión de la hoya.

Tal como se discutió en el apartado 8.5, la recarga tiene como fuente principal la precipitación que consituiría percolación profunda, estimada usando coeficientes de infiltración, como función de las características litológicas del terreno y la geomorfología de cada zona (pendiente, remarcación de cauces, erosión y fracturamiento). Estos coeficientes fueron asignados a partir de una revisión bibliográfica y la calibración de coeficientes de escorrentía usando las estaciones de aforo disponibles en la cuenca. La estimación de la recarga debe ser considerada con la incertidumbre implícita que ésta tiene, a lo que se suma el que en la zona de estudio no se cuenta con una larga data de información hidrometeorológica, siendo limitada para algunos parámetros y sectores. El método adoptado para su evaluación ha dado resultados consistentes con otras estimaciones realizadas con anterioridad, las que se han basado en métodos distintos, pudiendo ser comparadas. Cabe aquí mencionar que la recarga determinada corresponde a un valor para toda la cuenca y no únicamente para él o los acuíferos más relevantes o potentes. Del mismo modo, las descargas fueron estimadas para todo el sistema estudiado, lo que permite cotejarlas con las entradas realizando un balance hídrico.

En resumen, se discretizó la superficie de control (cuenca superficial) en 5 zonas, asignándoles permeabilidad de muy baja a alta (Figura 8.9, página 264). En particular, algunas zonas de rellenos y depósitos sedimentarios están dominadas por una permeabilidad alta, como son Pampa Rinconada, Pampa Huasco, Pampa Porquesa y parte de Pampa Sillillica. Una permeabilidad media a alta se distribuye ampliamente en la cuenca de acuerdo a la clasificación presentada, donde queda incluida la Pampa Guañare, la mayor parte de la Pampa Sillillica y el sector al sur del salar. Una proporción considerable de esta superficie corresponde a ignimbritas, con un fracturamiento y diaclasamiento propio de esta zona que favorece notablemente las condiciones de infiltración. De otro lado se encuentran las zonas con permeabilidades muy bajas, donde clasifican las rocas intrusivas y sedimentarias mezosoicas, que dentro de la cuenca se ubican en algunos conos de los estratovolcanes en la divisoria de aguas al este.

Por otra parte, en el depocentro de la cuenca se desarrolla el salar, donde se concentran las descargas por evaporación desde lagunas y napas freáticas cercanas a la superficie. Otras

descargas en la cuenca corresponden a aquellas por evapotranspiración desde bofedales y de manera general, de sistemas vegetacionales hidrófilos, que se encuentran saturados o parcialmente saturados durante todo el año. No existen descargas subterráneas de carácter antrópico, de acuerdo a la información de derechos de la DGA, aunque sí se tiene algunos derechos de aguas superficiales que se consideran otorgados por parte de la autoridad.

A continuación se establece el balance de la cuenca, tomando en cuenta las recargas y descargas estimadas para cada una. Como se ha mencionado en otras partes de este capítulo, el volumen de control considerado para el estudio está conformado por la cuenca superficial y subterránea.

La forma en que se utilizan los recursos disponibles tiene relación con la ubicación y distribución de las captaciones, si éstas tienen un uso consuntivo o no, y con los impactos ambientales que puedan ocasionar como producto de su magnitud y de las variables anteriormente mencionadas, entre otros. Estas interacciones pueden ser evaluadas a través de la construcción y operación de modelos numéricos, que permiten simular las condiciones de un acuífero bajo distintos escenarios hipotéticos. En los siguientes párrafos se presenta una síntesis y discusión sobre las entradas y salidas de las cuencas piloto estudiadas en el presente documento.

Modelo conceptual Salar del Huasco

La pendiente del terreno de la cuenca Salar del Huasco conduce los escurrimientos superficiales hacia la depresión que se encuentra al sur, donde se emplaza el salar. Los flujos que se aprecian en esta zona corresponden a las vertientes que afloran en el borde de la zona ocupada por la costra de sal, los más importantes son Huasco Norte, Ermitaño y Huasco Lípez, que a su vez alimentan los sistemas lagunares en esta área.

Otros escurrimientos superficiales se desarrollan en la cuenca, siendo el principal el Río Collacagua, que nace en el norte de la cuenca y corre en dirección franca al sur para infiltrarse antes de llegar al salar. En época de crecidas puede alcanzarlo, mientras que el resto del año se infiltra unos 10 km antes. El Collacagua nace de la unión de dos tributarios al norte, en el sector denominado El Tojo. El principal tributario es el Piga, por el este, que drena las pampas Piga y Porquesa, pasando por el Caserío Collacagua, mientras por el oeste converge el otro tributario, la Quebrada Chaquina.

Los escurrimientos subterráneos por su parte, reconocidos e inferidos con los datos piezométricos, químicos, isotópicos y la litología, muestran un comportamiento similar. Las precipitaciones, tanto líquidas como sólidas, se infiltran en las zonas de mayor permeabilidad en los llanos y en las zonas altas. Otros escurren por las zonas de menor hasta infiltrarse en

zonas de mejores características hidráulcias para ello, si los eventos son lo suficientemente capaces de producir un flujo superficial o subsuperficial. Finalmente, el reservorio principal de la cuenca se encuentra en el valle norte-sur ocupado por el Collacagua, donde los flujos de agua subterránea siguen en dirección hacia el salar. La Figura 8.17 muestra estos patrones de flujo, que como se mencionó, han sido revisados en los capítulos precedentes.

La recarga total de la cuenca en un escenario medio de largo plazo fue estimada en 1.160 L/s, lo que considera unicamente los aportes por precipitación, dado que no se han probado otras entradas al sistema.

Las descargas de la cuenca quedan definidas por la evaporación desde lagunas y napas someras en el área del salar, y sistemas vegetacionales mixtos alimentados por afloramientos de agua subterránea, como primera fuente. Estos sistemas vegetacionales se encuentran repartidos principalmente en el entorno del salar y en otras donde hay afloramientos de vertientes, primordialmente en los tributarios al Río Collacagua.

El balance se establece en toda la superficie de la cuenca y los acuíferos del Salar del Huasco. Los valores estimados de entrada y salida del volumen de control se presentan en la Tabla 8.23.

Entradas (IN)	Mínimo (L/s)	Medio (L/s)	Máximo (L/s)
Recarga precipitación	920,1	1.158,7	1.400,6
Desde otras cuencas	-	-	-
Total entradas	920,1	1.158,7	1.400,6
Salidas (OUT)			
Evaporación*	699,0	757,0	815,0
Extracciones**	118,1	118,1	118,1
Hacia otra cuenca	-	-	-
Total salidas	817,1	875,1	933,1
Balance (IN – OUT)	103,0	283,6	467,5
Porcentaje de discrepancia [†]	11%	24%	33%

Tabla 8.23: Entradas y salidas de toda la cuenca Salar del Huasco.

* Considera los flujos desde cuerpos de agua libre, vegetación y napas freáticas someras.

** Consideran las extracciones superficiales asumidas por la DGA, dado que no hay derechos de agua subterránea aprobados.

[†] Resultado del balance con respecto al valor de las entradas al sistema (en valor absoluto).



Figura 8.17: Patrones de flujo superficial y subterráneo en la cuenca Salar del Huasco.

Frente a estos resultados, se han planteado cuatro posibles situaciones que explicarían las diferencias entre las entradas y las salidas del sistema, llamado término de discrepancia (siguiendo la nomenclatura del Balance Hídrico de Chile, 1987). Las situaciones expuestas más abajo pueden explicar la diferencia entre los caudales de entrada y de salida del sistema, tanto de forma conjunta como separada, dependiendo de dónde esté la fuente de error.

Situación 1: Metodología usada y/o su aplicación. El término de discrepancia puede atribuirse al error en la estimación de los parámetros de la ecuación del balance hídrico. Esto es, un error en la metodología con que se abordó el problema o bien en la aplicación de ésta o ambas cosas.

Al revisar los valores de recarga obtenidos, éstos resultan comparables con los propuestos por otros estudios, encontrándose en un rango aceptable de acuerdo a las características climáticas, tamaño y geología de las cuencas. Como se discute en el apartado 8.5 (página 259), el porcentaje de la precipitación que se transforma en percolación profunda al acuífero para el escenario promedio es de un 17%, valor que es razonable para una hoya hidrográfica de las características del Salar del Huasco, y aún sobre la media del promedio de las cuencas del Altiplano que se han estimado en el presente estudio.

A diferencia de las otras cuencas estudiadas en este estudio, la cuenca Salar del Huasco cuenta con información hidrometeorológica de una data razonable, aunque su cobertura espacial, en el caso de las precipitaciones, es acotada al sector de Collacagua. A pesar de esto, las isoyetas trazadas responden a un análisis de carácter regional, que utilizan información de estaciones ubicadas desde la costa chilena a la cordillera, además de los datos disponibles de estaciones en Argentina y Bolivia. Las estaciones disponibles monitorean unicamente la precipitación líquida, siendo la caída de nieve durante los meses del invierno en el hemisferio sur un elemento cuya medición puede aportar sustantivamente al conocimiento de la hidrología de la cuenca.

Interesa recalcar que la estimación de recarga en el área de estudio reflejan valores razonables para un área de las características de esta cuenca endorreica del Altiplano de la Región de Tarapacá.

En la estimación de las descargas por evaporación es donde se encuentra mayor incertidumbre. La mayor proporción de estas descargas se produce desde las lagunas y napas someras en el área del salar, donde las estimaciones realizadas en el presente estudio son menores a las hechas por Collahuasi–GP Consultores y Acosta, presentadas en el apartado 8.6. Estas diferencias están asociadas a los siguientes aspectos: • La información de niveles. Actualmente se dispone de información de buena calidad sobre niveles del agua subterránea dentro del salar, debido a la instalación de una serie de punteras que permiten caracterizar con una buena cobertura espacial la profundidad del nivel saturado. La interpolación de los datos provistos por Collahuasi – GP Consultores da como resultado el mapa mostrado en la Figura 8.13, que es similar a lo presentado por Collahuasi – GP Consultores en sus reportes para estimar la descarga. Los valores finales difieren por el hecho de que la variación de la evaporación con la profundidad del nivel saturado que estos autores utilizan es diferente de la propuesta en este estudio, lo que es descrito en los siguientes dos puntos.

Los niveles usados por Acosta (2004) están basados en los datos medidos por JICA – DGA (1995) y de la Poza Ermitaño, para caracterizar el área del salar y la zona húmeda al norte de éste. Para ello, consideró una división de todo este sector de descarga por evaporación en 3 zonas, con profundidades discretas de 0,2; 0,4 y 0,6 m. Con la información actualmente disponible, comentada en el párrafo anterior, se cuenta con datos más claros de la variación del nivel saturado en la zona que se discute, por lo que resulta más conveniente usar dicha información.

• La curva de evaporación versus profundidad de la napa. En el presente estudio se ha propuesto una curva de evaporación versus profundidad de la napa en base a las mediciones realizadas en la cuenca con el método del domo (Figura 8.12, página 283), las que muestran coherencia con otros métodos utilizados en otras zonas del norte de Chile (Johnson, 2009). En el caso de Collahuasi – GP Consultores, éstos defininen una curva con las observaciones que tienen en lisímetros instalados en la cuenca. Finalmente, Acosta (2004) utilizó la curva propuesta por Grilli y Vidal (1986), en las tres profundidades que abordó, corrigiendo por la altura a la que se hicieron las mediciones de la curva (Salar de Atacama) y la altura del Salar del Huasco en que se encontraba trabajando.

De este modo, las curvas en cuestión representan otra diferencia en la estimación de las descargas por evaporación. Resulta más confiable lo planteado por el presente estudio y lo hecho por Collahuasi – CP Consultores, dado que utilizaron datos medidos *in situ*. Aún así, los valores difieren considerablemente para la evaluación realizada por Collahuasi – GP Consultores en verano (Tabla 8.18), donde utilizan una evaporación potencial del mes de diciembre.

• La evaporación potencial. Los valores de evaporación potencial utilizados en el presente estudio corresponden a los que se desprenden del gradiente regional determinado en el capítulo hidrológico de este documento. Este gradiente considera los valores de todas las estaciones en las 4 primeras regiones del país, dado que reportan un comportamiento

similar con la altitud (ver Figura 6.49). Los valores fueron seleccionados de acuerdo a la cota en que se encuentra la zona de estudio y corregidos por un coeficiente de tanque de 0,65, seleccionado de acuerdo a como se especifica en el apartado 8.6.1. En el caso de Collahuasi – GP Consultores, se tomaron las mediciones realizadas en los tanques evaporímetros instalados en la vecindad del salar, junto a los lisímetros utilizados para proponer una curva de evaporación coherente. El factor de corrección usado para determinar la evaporación potencial (~0,7) difiere del propuesto en el presente estudio, pero se encuentra en un rango aceptable dadas las incertudumbres. Acosta (2004), por su parte, no utilizó factor de corrección de tanque para el promedio de largo plazo de la estación Collacagua, aludiendo a la ubicación en un sector angosto del valle del Río Collacagua flanqueada por cerros, así como a la mayor temperatura que habría en la zona del salar resulta ser menor que la medida en Collacagua, lo que indica que dicho estudio habría sobreestimando la evaporación potencial, reportando flujos netos mayores a los de este estudio y el de Collahuasi – GP Consultores.

• Superficie de lagunas y zonas de descarga. Otra de las fuentes de diferencias consiste en las áreas desde donde se produce evaporación. Este factor depende de la técnica de medición utilizada para su cálculo, así como el o los años de los que se dispone información. Los distintos autores presentan varias diferencias en este sentido.

Otra de las descargas por evaporación es la que se desprende de la vegetación altiplánica (evapotranspiración), para la cual se asumió un coeficiente de corrección promedio de acuerdo al tipo de vegetación más común en esta zona (Salazar et al., 2001). En la sección 8.6.1.2 se discute sobre esto, entregandose valores de descarga referenciales, que han sido más detallados en los antecedentes expuestos en este documento. Collahuasi – GP Consultores entrega un rango de valores, de acuerdo a su estimación realizada para los periodos de invierno y verano, donde lo propuesto por DGA – PUC en este documento aparece como representativo de un promedio de ambas condiciones.

Se debe tener en cuenta que el trabajo hidrogeológico por si mismo contiene cierta incertidumbre, asociada a la variabilidad espacial y temporal de los parámetros con que se trabaja. Lo que queda es mantener un buen control de aquellos elementos que aparecen como manejables, que ciertamente contribuyen a acotar el error y a identificar otras posibles fuentes.

Situación 2: Se están produciendo cambios en el almacenamiento. Una segunda situación para justificar el término de discrepancia entre las entradas y salidas del sistema estudiado (cuenca Salar del Huasco), consiste en asumir que se está produciendo un cambio en el almacenamiento. La ecuación del balance indica que:

IN (entradas) – OUT (salidas) = Δ S (cambios en el almacenamiento).

Dado que los valores resultantes de ΔS en la Tabla 8.23 son positivos, el almacenamiento en la cuenca estaría aumentando. Al observar los niveles piezométricos monitoreados en los pozos de CMDIC en el valle de Collacagua y las pampas aledañas (Tabla 8.1 y Tabla 8.2), se puede suponer que existe una condición de equilibrio en esta zona, como se discute en el apartado 8.2. Aunque los datos tienen una data cercana a 10 años, se puede concluir que el acuífero se encuentra en un régimen estacionario y que no habría cambios en el almacenamiento. Por lo mismo, se descarta esta posibilidad.

Situación 3: Salidas subterráneas no considerados hacia otras cuencas. En el apartado 8.4 se discute sobre la conexión con otras cuencas, donde se plantea las descargas desde la cuenca Salar del Huasco hacia la cuenca Pampa del Tamarugal. Estas han sido estudiadas, siguiendo el patrón de las aguas observadas por Risacher et al. (1999) y lo propuesto por Tröger y Gerstner (2004). En la mayoría de los antecedentes se ha descartado, sin embargo, en el presente estudio se propone la descarga a través de las fallas de orientación NNE–SSW al oeste del salar, que estarían vinculadas a la Quebrada Chara, una de las tributarias de la Quebrada Alona que descarga en el Salar de Pintados.

Situación 4: Extracciones actuales son mayores a lo supuesto. Una cuarta situación posible es que del sistema se esté extrayendo más agua de lo que se encuentra otorgado, lo que resulta difícil de conocer en la mayoría de las cuencas altiplánicas con la información de que se dispone. Sin embargo, se considera que en Huasco existe un mayor conocimiento en este sentido, siendo incluso probable que algunas aguas superficiales otorgadas se encuentren sin aprovechamiento en forma continua y permanente.

9 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente estudio fue realizado como una Acción de Apoyo entre la Dirección General de Aguas (DGA) y el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DIHA–PUC), para compilar la información disponible y realizar algunos trabajos complementarios de gabinete y terreno, que dan forma a una línea base sobre el conocimiento de cómo funciona hidrogeológicamente el sistema piloto de la Región de Tarapacá (cuenca Salar del Huasco). Este propósito se complementa con el de identificar los estudios necesarios para avanzar hacia un mejor conocimiento, que repercutan en una mejor gestión de los recursos hídricos. En esta zona, el uso del agua sustenta las actividades minera y ganadera, así como ambientes lacustres donde habitan flora y fauna autóctona.

Siguiendo el objetivo propuesto, este documento presenta una caracterización hidrogeológica de la cuenca piloto Salar del Huasco. Los contenidos abarcan una descripción de la hidrografía y geomorfología, hidrología y geología de las cuencas, así como de la hidrogeoquímica e isotopía de las aguas colectadas ellas. A continuación se alude a las principales conclusiones de los capítulos que conforman el documento.

Fisiografía

La geomorfología regional del norte de Chile ha sido caracterizada por Börgel (1983), encontrándose la zona de estudio en los sectores de la Precordillera Andina y los Cordones Prealtiplánicos. Estas son franjas de orientación norte-sur, que definen la cadena de cerros que forma la divisoria de aguas al oeste (Altos de Pica) y el resto de la cuenca, respectivamente.

La hoya hidrográfica del Salar del Huasco es una cuenca endorreica con forma ovalada y una extensión de 1.471 km², que alberga un valle longitudinal norte-sur por donde corre el Río Collacagua, que fluye hacia el salar ubicado en el sur de la cuenca. El salar y las lagunas que se desarrollan en esa zona son el punto más bajo de la cuenca, con 3.770 msnm, siendo la cotá media los 4.165 msnm. Al sector del humedal y el salar converge la topografía de la cuenca, que tiene en promedio una pendiente cercana al 12%, donde el Cerro Coumtucsa o Yarbicoya es la mayor cota (5.220 msnm) y se ubica en el sector de Altos de Pica.

Localmente, la cuenca está marcada por tres tipos de relieves que definen su geomorfología. Éstos son los relieves estructurales y de erosión, relieves volcánicos y formas de acumulación. La mitad oeste de la cuenca está dominado casi completamente por glacis de erosión, correspondiente al relieve de tipo estructural y volcánico desarrollado en el área de la Ignimbrita Huasco. El lado este de la cuenca presenta más variedad, conteniendo en los valles (pampas Batea, Sillillica y Rinconada) formas de acumulación del tipo glacis de acumulación, y en las zonas altas variado relieves volcánicos como estratovolcanes y cordones volcánicos. La zona del salar está primordialmente ocupada por llanuras lacustres.

Geología

La configuración de la cuenca del Salar del Huasco se habría producido durante el Terciario medio, luego de la migración del frente volcánico. Durante el Jurásico la posición del arco coincide con la actual Cordillera de la Costa, para luego migrar hasta su ubicación actual, en la Cordillera Occidental.

El origen de esta cuenca se relaciona con el alzamiento tectónico de la actual región del Altiplano, que producto de la erosión dejó luego al descubierto las rocas paleozoicas y mesozoicas que afloran hoy día al noroeste del salar. En este período la cuenca se encontraba abierta hacia el oriente, sin embargo la actividad del nuevo cordón volcánico (Cordillera Occidental) termina por convertirla en una cuenca cerrada.

Las rocas más antiguas afloran en el sector noroeste del área y se depositaron durante el Paleozoico (Formación Collahuasi). Las secuencias sedimentarias marinas y continentales del Jurásico se atribuyen a la evolución de una cuenca de trasarco (Formación Quehuita), que en el Cretácico Superior da inicio a un período de volcanismo (Formación Cerro Empexa). Estas características se intensifican durante el Mioceno, generándose grandes extensiones de depósitos piroclásticos (Formación Altos de Pica). Durante el Plioceno- Pleistoceno se producen sucesivos episodios volcánicos en que se van intercalando unidades de lavas, tobas y depósitos no consolidados de origen piroclástico y detritos volcánicos (formaciones Sillillica, Collacagua y Pastillos).

Se diferencian tres fases tectónicas en los sistemas estructurales del sector. La primera se asigna al Plioceno y origina un sistema de fallas N-S y NW-SE que afecta a la Formación Altos de Pica generando en sus estratos un pliegue monoclinal. Una segunda fase habría ocurrido durante el Plioceno tardío- Pleistoceno temprano, dando lugar a un sistema de fallas normales y fracturas N-S y NE- SW. Por último, la tercera fase, se considera post- Plioceno y se le atribuyen importantes desplazamientos a lo largo de los planos de fallas NE- SW en la Formación Altos de Pica cuya traza se prolonga hacia el sur por varios kilómetros, variando su rumbo a N-S.

Hidrología

Se realizó la caracterización hidrológica para el sistema piloto de la I Región, considerando variables meteorológicas como precipitaciones, temperatura y evaporación de tanque, e hidrológicas como los escurrimientos. Para este análisis se utilizaron registros obtenidos en 3 estaciones pluviométricas instaladas con el convenio PUC-DGA, en estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA, y estaciones meteorológicas pertenecientes a la Compañía Minera Dona Inés de Collahuasi (CMDIC).

En las estaciones PUC-DGA se dispone de un año de estadística de precipitaciones lo que no permite caracterizar el comportamiento de esta variable en la zona en el largo plazo. Sin embargo, se dispone de más de 20 años de estadística en 5 estaciones pertenecientes a la DGA que fueron seleccionadas para este análisis. Solamente una de las estaciones DGA (Collacagua) se ubica al interior de la cuenca del Salar del Huasco

A nivel anual se observó que el agua caída en la estación Huasco en Sillillica (PUC-DGA) durante el año hidrológico 2007-2008 (151 mm) es similar a la precipitación media registrada históricamente en las estaciones DGA y CMDIC.

A nivel mensual, en la estación Huasco en Sillillica (PUC-DGA) la mayor precipitación se registró en enero de 2008 (125 mm). En las estaciones DGA la mayor precipitación media y con probabilidad de excedencia de 15% ocurre en enero y son del orden de 50 mm. Sin embargo, en el mes de febrero la magnitud de la precipitación es similar a la de enero. En las estaciones CMDIC se observa un comportamiento similar al de las estaciones DGA. Sin embargo, la precipitación media mensual máxima ocurre en el mes de enero en la estación Salar Michincha con un valor del orden de 80 mm.

En la estación Huasco en Sillillica más del 90% de la precipitación para el año hidrológico 2007-2008 ocurrió en el período Diciembre - Marzo. En las estaciones DGA y CMDIC ocurre algo similar concentrándose más del 70% de la precipitación anual en el período Diciembre - Marzo. Esto evidencia que las precipitaciones en el sistema piloto de la I Región están influenciadas por el denominado invierno boliviano.

La precipitación diaria en las estaciones PUC-DGA y DGA fue ajustada a un modelo de Markov con dos estados: seco (S) y lluvia (P), donde cada estado tiene dos transiciones posibles. Los resultados obtenidos con este ajuste muestran que la probabilidad de estar en estado de lluvia es nula en el período Abril-Octubre en Huasco en Sillillica. Sin embargo, estas probabilidades pueden alcanzar valores de hasta 0,4 en el mes de enero en la estación Huasco en Sillillica, 0,18 en Huasco en Altos del Huasco, 0,20 en Huasco en Diablo Marca, y 0,3 en Collacagua. En cuanto a la probabilidad de transición de seco a lluvia se observa que es

nula entre los meses de abril y octubre, y puede alcanzar valores de hasta 0,18 en el mes de enero.

Se analizaron las series horarias de precipitación en las estaciones PUC-DGA y CMDIC, obteniendo la probabilidad empírica de que esté lloviendo a una determinada hora, para los distintos meses del año. Este análisis mostró que la mayor probabilidad de lluvia se da entre las 12:00 y las 18:00, lo cual es más evidente en los meses de enero, febrero y marzo. Además, en estos meses la probabilidad de lluvia es mayor que cero para todas las horas del día.

Se comparó el gradiente de precipitación con la altura obtenido en las estaciones PUC-DGA para el año hidrológico 2007-2008 con el gradiente regional obtenido en la parte III de este informe "Hidrología Regional del Altiplano", el cual es de un aumento de 20 mm por cada 100 m sobre los 3.000 msnm. Se observa que la precipitación en el único año de registro con que se cuenta en la estación Huasco en Sillillica (PUC-DGA) no sigue la tendencia del gradiente obtenido en el estudio hidrológico regional. Sin embargo, al analizar el comportamiento de esta estación en conjunto con la estaciones DGA y CMDIC seleccionadas para el sistema piloto es posible obtener un gradiente de 18 mm por cada 100 m de altitud, similar al obtenido en el estudio regional.

En la cuenca del Salar del Huasco se disponen de tres estaciones fluviométricas pertenecientes a la DGA. En análisis del caudal medio anual mostró que en las estaciones Río Piga en Collacagua y Río Collacagua en Peñablanca la mayor parte del tiempo el caudal medio anual se mantiene alrededor de 0,1 m³/s. Sin embargo se observan crecidas puntuales, destacándose la de los años 1984, 1985, 2000 y 2006. El caudal medio anual máximo registrado en Río Piga en Collacagua es de 0.22 m³/s en el año hidrológico 2000-2001, y en Río Collacagua en Peñablanca de 0,47 m³/s en el año hidrológico 2006-2007. Por otra parte, en la estación Río Batea en Confluencia el registro de caudal medio anual se mantiene alrededor de 0,02 m³/s, sin notarse la presencia de crecidas. La variación del gasto medio a lo largo de los meses del año es poco significativa en las tres estaciones, manteniéndose en valores cercanos a la media anual.

Se recopilaron datos del caudal medio diario y se elaboraron diagramas tipo Box-Whisker con los cuartiles de estas series para los distintos meses del año, observándose que en cada estación la mediana de los caudales no presenta mayores variaciones a lo largo de los distintos meses del año. Sin embargo, el caudal máximo presenta importantes cambios notándose los meses en los que se producen las crecidas.

En la estación Río Piga en Collacagua la mediana del caudal medio diario se mantiene alrededor de $0,13 \text{ m}^3$ /s en todos los meses del año. El caudal máximo alcanza un valor de 2,4

 m^3/s en el mes de enero, siendo los meses de enero, febrero, marzo y abril donde se registran los caudales máximos. En estos meses, el rango existente entre el caudal máximo y la mediana es del orden de 1,7 m³/s, siendo marcada la diferencia con el rango existente en el resto de meses del año, donde es del orden de 0,17 m³/s. Los caudales mínimos nunca descienden de 0,01 m³/s en los meses del año.

En la estación Río Batea en Confluencia la mediana del caudal medio diario es del orden de $0,02 \text{ m}^3$ /s en todos los meses del año. Los caudales máximos se producen en los meses de enero, febrero y marzo, alcanzado un valor de $0,08 \text{ m}^3$ /s en el mes de febrero. Para el resto de meses del año el caudal máximo tiende a mantenerse en del orden de los $0,05 \text{ m}^3$ /s. Por otra parte, los caudales mínimos registrados alcanzan valores iguales a cero en todos los meses.

En la estación Río Collacagua en Peñablanca la mediana del caudal medio diario es del orden de 0,15 m³/s en todos los meses del año. Los caudales máximos se producen en los meses de febrero, septiembre y diciembre, alcanzado un valor de 2,78 m³/s en el mes de septiembre. Para el resto de meses del año el caudal máximo tiende a mantenerse en del orden de los 1,0 m³/s. Por otra parte, los caudales mínimos registrados alcanzan valores alrededor de 0,04 m³/s.

La información de temperatura y evaporación de tanque en la cuenca del sistema piloto de la I Región es escasa. Al interior de la cuenca del Salar del Huasco se dispone solamente de una estación perteneciente a la DGA que registra temperatura y evaporación, y dos estaciones instaladas con el convenio PUC-DGA que registran temperatura. Adicionalmente se dispone de registros de temperatura en estaciones cercanas al sistema piloto y que pertenecen a la CMDIC. Por otra parte, se presentaron los resultados obtenidos en la Parte III de este informe (Hidrología Regional del Altiplano), principalmente gradientes regionales de temperatura y evaporación con la altura e isotermas.

La temperatura mínima absoluta, media absoluta y máxima absoluta, promedio en la zona es de -11,0 °C, 3,2 °C y 19,6 °C, respectivamente. Por otra parte, los meses más fríos del año son junio, julio y agosto, y los meses más cálidos son diciembre, enero, febrero y marzo.

La evaporación de tanque media anual en la zona es de 2.141 mm. Por otra parte, los meses con mayor evaporación son octubre, noviembre y diciembre, alcanzando valores de hasta 240 mm mensuales. Por otra parte la menor evaporación ocurre en los meses de mayo, junio y julio con valores de alrededor de 120 mm.

Hidrogeoquímica e Isótopos

La composición de las aguas de la cuenca del Salar del Huasco ilustra con claridad la dirección de flujo norte a sur de las aguas y la influencia que sobre ellas ejerce la geología. La

distribución regular de los puntos de muestreo en los cursos fluviales, permite reconocer la evolución composicional de las aguas.

En el sector norte, predominan las aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas magnésicas, con baja concentración de iones, propio de las zonas de recarga. En Pampa Porquesa destaca una muestra sulfatada magnésica, asociada probablemente a los domos dacíticos que allí afloran. A medida que las aguas fluyen aguas abajo por el Río Collacagua, su salinidad va aumentando progresivamente hasta Pampa Peñablanca, debido a que va siendo afectada por evaporación e interactúa con los depósitos por los que fluye. Luego reciben la influencia de las aguas sulfatadas cálcicas que caracterizan al sector de Pampa Sillillica, debido a su contacto con la Formación Sillillica en que abundan las rocas volcánicas andesíticas. Esta influencia se aprecia con claridad en la composición de las aguas subterráneas. Se genera así una mezcla de aguas, cuya composición final aparece como sulfatada cálcica, pero con una fuerte componente bicarbonatada sódica. Este mismo tipo de agua va aumentando su salinidad a medida que es expuesta a la evaporación y el contacto con la litología. Incluso en las cercanías del salar ya se reconocen indicios de una muestra de agua clorurada sódica muy concentrada. Desde Pampa Rinconada llegan también hasta el salar aportes de aguas sulfatadas cálcicas

En el sector del salar, las aguas pueden preservar rasgos de su composición inicial, pero en niveles de concentración mayores ya que la evaporación aquí es intensa. O bien evolucionan a aguas cloruradas sódicas a medida que los elementos menos solubles van formando sales y precipitando. Destaca en el sector norte del salar la influencia de las aguas bicarbonatadas cálcicas producto de la mezcla de los aportes del Río Collacagua con aguas cloruradas sódicas, o debido a la disolución de niveles evaporíticos antiguos. El sector sureste del salar presenta aguas de composición sulfatada cálcica de elevada salinidad, debido a la influencia de los flujos provenientes de Pampa Rinconada. En la zona central y suroccidental del salar, más alejada de los principales flujos que llegan a él, las aguas tienden a aumentar su salinidad y adquieren una composición sulfatada sódica, dada la mezcla de aguas mencionadas anteriormente. Éstas se van concentrando paulatinamente por evaporación hasta que en su concentración relativa de elementos dominan los iones sodio y cloruro, por ser los más solubles.

Lo anterior es congruente con las razones isotópicas medidas en las aguas del salar, ya que éstas se alinean en una recta de menor pendiente que la MWL y poseen valores más enriquecidos en isótopos pesados.

Hidrogeología

En la caracterizción hidrogeológica del sistema piloto de la Región de Tarapacá, se abordaron las unidades hidrogeológicas y geometría acuífera de la cuenca en estudio, la piezometría y propiedades hidráulicas de los acuíferos, la conexión con otras cuencas hidrográficas y finalmente la estimación de la recarga y la descarga del volumen de control en estudio, con el fin de establecer un balance hídrico de largo plazo.

La mayoría de los pozos perforados en la cuenca se encuentran en las partes más bajas de la cuenca, donde es probable encontrar las mayores potencias sedimentarias. Agrupando la información litoestratigráfica de éstos, pueden reconocerse tres unidades hidrogeológicas. La cuenca se conforma por un basamento volcánico fracturado, donde rocas ignimbríticas del Mioceno (Tsih) se distribuyen hacia el oeste de la cuenca y se ponen en contacto, por fallamiento normal, con rocas volcánicas del Mioceno superior – Plioceno, hacia el este, con una permeabilidad secundaria asociada a su fracturamiento. Sobre esta unidad se encuentra una depositación prolongada de sedimentos terciarios, que conforman al segundo potencial acuífero y, finalmente, se consideran los depósitos sedimentarios cuaternarios también como una unidad hidrogeológica, aunque de poca potencia, y que cubre toda la depresión estructural.

Las isopiezas de la cuenca representan la situación de los acuíferos medio e inferior, de acuerdo a las zonas en que se encuentran ranurados los pozos, e indican que los flujos subterráneos escurren predominantemente en sentido norte-sur con algunos aportes en sentido noreste-suroeste en el sector de Pampa Sillillica, y este-oeste en Pampa Rinconada, siempre con zona de descarga en el salar. El pozo ubicado más norte en la cuenca presenta un nivel piezométrico de 3.888 msnm, mientras que las cotas registradas en la cercanía del salar alcanzan los 3.780 msnm. Esta diferencia se traduce en un gradiente hidráulico de 3,8x10⁻³. El gradiente medio desde el sector de Sillillica Norte hasta el salar es de 2,5x10⁻³ y entre el Caserío Collacagua y Sillillica Norte el gradiente hidráulico aumenta a 5,5x10⁻³. La zona de Pampa Rinconada muestra un bajo gradiente hidráulico, de sólo 8,0x10⁻⁴.

La conductividad hidráulica se estimó con el análisis de las pruebas de bombeo disponibles en los antecedentes revisados. Estas fueron corroboradas usando los datos duros, y reinterpretando los resultados reportados por otros autores cuando se consideró apropiado. De este modo, se obtuvo en el sector Pampa Sillillica valores de conductividad (K) entre 24 y 47 m/d y valores de coeficiente de almacenamiento (S) entre 5,36x10⁻⁴ y 1,06x10⁻³. En el sector Pampa Rinconada, los resultados de K varían de 18,2 m/d a 21,6 m/d y los de S entre 8,85x10⁻⁶ y 1,62x10⁻³. En el sector de Sillillica Norte, K se encuentran entre 0,5 m/d a 61 m/d. En los sectores Pampa Peña Blanca y Pampa Batea el valor de K se encuentra entre 1,9 m/d a 2,3 m/d

y S varía entre $8,74x10^{-4}$ y $5,0x10^{-4}$. Finalmente, en los sectores Río Batea y Caserío Collacagua presentan valores de K entre 44,8 y 57,9 m/d y de S entre 4,71x10⁻³ y 4,24x10⁻³.

Hidrogeológicamente, se ha planteado que la cuenca no es del todo cerrada, estando vinculada a sus vecinas Pampa del Tamarugal, al oeste, y Lagunillas, al norte. La primera de las conexiones ha sido mayormente estudiada, pero no existen resultados concluyentes en contra de la hipótesis planteada por Tröger et al. (2004). A pesar de esto, se descarta lo propuesto por dicho autor en el sentido de que las fallas de orientación NNE-SSW al oeste del salar constituyen una barrera impermeable para el paso del agua subterránea en dirección al salar, por cuanto prospecciones geofísicas en la zona indican que existe una conexión. La química de las aguas de la Pampa del Tamarugal (Risacher et al., 1999), invita a proponer un mecanismo de descarga hacia el Salar de Pintados, el que estaría relacionado con las estructuras del sector Altos de Pica.

De este modo, considerando un modelo conceptual con las únicas salidas probadas del sistema, se realizó una estimación de la recarga media anual de largo plazo en la cuenca piloto de la I Región mediante balances de masa y de coeficientes de infiltración y escorrentía que ponderan las características hidráulicas de las unidades litológicas presentes en la cuenca analizada. De acuerdo a esta estimación la recarga en la cuenca del Salar del Huasco varía entre 920,1 y 1.400,6 L/s, con un valor medio de 1.158,7 L/s. No se han probado entradas externas al sistema, y el valor estimado está en acuerdo con el estudio realizado por Acosta (2004), cuyos reportes varían entre 1.140 y 2.051 L/s.

Por su parte, las descargas están compuestas por la evaporación, tanto de aguas superficiales como de napas someras, la evapotranspiración de la vegetación, descargas hacia otras cuencas y extracciones a través de obras de captación. Al ser cuencas cerradas (endorreicas), su mecanismo principal de descarga es la evaporación, en el caso en que se tienen cuerpos de agua en superficie o napas someras, o bien descargas subterráneas hacia otras cuencas. En esta cuenca se estimó una evapotranspiración total que varía entre 699,0 y 815,0 L/s, con un valor medio de 757,0 L/s. A pesar de que no se tiene certeza de las descargas reales a través de obras de captación, existen derechos de aprovechamiento que se consideran aprobados a la Asociación Indigena Aymará por 118,1 L/s.

El balance hídrico en la cuenca se realizó considerando la información más fidedigna de la que se dispuso, discutiéndose las posibles fuentes que lleven a un error de cierre más acotado. Al contabilizar las entradas totales por 1.158,7 L/s y las salidas en 875,1 L/s, se tiene un exceso del 24% respecto del valor de las entradas. Estos valores requieren ser minimizados usando las sugerencias propuestas en este estudio.

En estos sistemas altiplánicos la evaluación de la recarga es en sí compleja, dada su gran variación espacial y temporal, lo que puede llevar a diferencias importantes entre las distintas metodologías empleadas en su estimación. Este hecho, sumado a la existencia de cuencas con ecosistemas de particular interés ambiental, que dependen parcial o totalmente del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos y su relación con los recursos superficiales, hacen recomendable ser conservador en la régimen de explotación que se imponga. Sin perjuicio de lo anterior, en base a antecedentes técnicos sólidos, siempre es posible definir caudales de explotación sustentables y estrategias de gestión hídrica que permitan por una parte generar recursos hídricos para el desarrollo del país y por otra, el adecuado cuidado del medio ambiente.

La explotación gradual de los sistemas, partiendo con caudales bajos que se puedan ir paulatinamente aumentando en la medida que se vaya evaluando la respuesta del sistema (Explotación Gradual), junto con disponer de varios puntos de extracción que se puedan ir alternando en el tiempo (Explotación Dinámica), son herramientas que una gestión hídrica moderna de estos sistemas debiera considerar. Adicionalmente, el adecuado monitoreo de las variables de control tales como niveles freáticos y caudales de vertientes, entre otras, es imprescindible para poder detectar a tiempo eventuales efectos no deseados (Planes de Alerta Temprana). Los efectos que se quieren evitar debiesen estar claramente definidos bajo un esquema de fiscalización conciso y transparente.

En este sentido, este estudio pretende contribuir al conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de las cuencas altiplánicas, generando, sistematizando y analizando una gran cantidad de información que quede disponible para la comunidad científica, reparticiones públicas y usuarios en general de las aguas altiplánicas.

10 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

A continuación se describen las sugerencias para trabajos futuros que se derivan del presente estudio, las que incluyen la realización de trabajos de campo para aportar más y mejores antecedentes, así como estudios sobre ciertas áreas o temas específicos.

10.1 Necesidad de Estudios

- Profundizar el conocimiento sobre la geomorfología de la cuenca piloto, enfocada en aumentar el entendimiento de la paleogeografía de la zona y su evolución hasta alcanzar su actual configuración. Esto serviría para establecer con mayor precisión sus antecedentes tectónicos y así conocer qué tipo de estructuras (fallas, fracturas, diaclasas o pliegues) se podrían encontrar como potenciales planos de transferencia de aguas subterráneas o bien condicionando el funcionamiento acuíferos fracturados. Este trabajo representaría tanto un aporte para los flujos que se producen dentro de la cuenca como aquellos eventuales entre cuencas vecinas (Laguna Lagunillas, Pampa del Tamarugal).
- Definir las condiciones estructurales en profundidad, mediante el mapeo detallado de estructuras que den indicios de fenómenos de compresión/extensión. Particularmente relevantes serían las fallas NW-SE al oeste del Salar del Huasco en esta Región, para obtener más antecedentes que descarten o corroboren hipótesis sobre su funcionamiento como barrera hidráulica.
- Usando herramientas químicas e isotópicas, estudiar la eventual descarga desde la cuenca Salar del Huasco a la Pampa del Tamarugal. Las estructuras presentes en la Ignimbrita Huasco podrían permitir el paso de aguas consideradas como afluentes hacia el área del salar hacia el acuífero en la depresión central.
- Estudiar la interacción del acuífero inferior de la cuenca sobre el ecosistema del humedal. Las vertientes que afloran al este del salar están relacionadas con las estructuras de este acuífero, cuya área total de recarga no es bien conocida.
- Realizar nuevos estudios para estimar la recarga de la cuenca, como balance de elementos conservativos y modelación hidrológica, de manera que puedan compararse con los rangos actuales propuestos.
- Continuar el monitoreo en el tiempo de lagunas mediante imágenes satelitales. El tamaño de lagunas así como los índices de refracción sobre la vegetación en la zona del humedal

apoyan la cuantificación de las descargas por evaporación del sistema, única salida que se ha probado con los antecedentes disponibles.

- Censar los afloramientos de agua en la cuenca, tomando en cuenta aquellos catastrados en los estudios antecedentes y otros no estudiados. Las descargas del acuífero a través de manantiales deben ser evaluados de acuerdo a la posición dentro de la cuenca y lo que ocurre con esta agua (evaporación, infiltración). Además, la importancia de censar estas descargas se apoya en que normalmente sustentan sistemas vegetacionales que resulta importante proteger.
- Se sugiere la realización de trabajos orientados a clasificar y cuantificar los consumos evapotranspirativos de los distintos sistemas vegetales presentes en el altiplano chileno. Inicialmente los esfuerzos deben tener un sentido generalista que permita estimar con un nivel de confianza razonable la evapotranspiración genérica de cualquier sistema que se desee analizar y no en determinar detalladamente la transpiración de un sistema específico. Luego, para cada sistema en particular y dependiendo de las necesidades de acotar las variables de interés, se sugiere profundizar los estudios.
- Se recomienda recopilar nueva información de caminos y huellas que permitan actualizar y remapear las rutas existentes en la actualidad en el altiplano chileno. Esto permitiría incrementar las posibles zonas a monitorear y aumentar la eficiencia durante las campañas de terreno.

10.2 Mediciones de evaporación

- Generalmente el estudio de la evaporación se centra en la determinación de las descargas a
 escala de cuenca. En este contexto se sugiere la realización de estudios de evaporación
 desde los suelos mediante el análisis de imágenes satelitales (modelo SEBAL) en conjunto
 con información meteorológica captada directamente en terreno. Estos resultados deben
 ser contrastados con las estimaciones obtenidas con el domo en el presente estudio (curvas
 de evaporación). Debido al nivel de información disponible, se recomienda utilizar como
 cuenca piloto la hoya del Salar del Huasco. En función de los resultados se podrá evaluar
 la posibilidad de utilizar información satelital para estimar las descargas por evaporación
 en zonas en que no se cuenta con datos, y la necesidad de continuar realizando mediciones
 puntuales directamente en terreno.
- Se recomienda realizar mediciones de evaporación con el domo en los mismos puntos muestreados durante las campañas de terreno efectuadas durante el presente estudio, pero en diferentes periodos del año. Los resultados obtenidos permitirán estudiar la

estacionalidad del fenómeno y la efectividad de normalizar las mediciones con el fin de independizar las tasas registradas de las condiciones climáticas existentes.

- Con el fin de determinar la tasa mínima de evaporación que puede ser registrada con el domo, se recomienda efectuar ensayos sobre suelos con napas profundas y comparar dichos resultados con mediciones efectuadas en el mismo punto pero cubriendo el suelo con un material impermeable.
- Utilizar nuevas metodologías para estimar la descarga por evaporación, como correlaciones de Eddy y scintilometría. Las aplicaciones pueden ser comparadas con los datos disponibles de lisímetros y el domo, disminuyendo la incertidumbre de la cuantificación que puede entregar alguna de ellas.

10.3 Toma de muestras y análisis químicos e isotópicos

- La toma de muestras de agua de manantiales debe ser cuidadosa y detallada. Cabe aclarar que manantiales se considera equivalente a vertientes y afloramientos, sin embargo, en el texto se han mantenido los términos originales utilizados en la bibliografía desde la cual se han recopilado los datos analizados en este proyecto. Conviene separar las muestras según correspondan a manantiales puntuales o difusos. Los primeros corresponden exclusivamente a aquellas muestras de agua obtenidas en el punto exacto donde sale el flujo de la roca o depósito, sin que alcance a tener un contacto considerable con el ambiente. En situaciones complejas es posible excavar la parte externa del afloramiento para obtener con seguridad agua directamente del acuífero. Si no se puede acceder o reconocer con exactitud desde dónde emana el agua, p. ej. en algunos bofedales, se recomienda considerar el punto como manantial difuso. Este término considera que el agua realiza previo al muestreo un recorrido subsuperficial por el terreno, durante el cual puede disolver sales del suelo o estar afectada por evaporación.
- Al recolectar muestras de cauces superficiales, como ríos y esteros, caracterizar en lo posible la hidrogeoquímica del curso de agua principal antes y después de la desembocadura de un afluente. Calcular en terreno un caudal aproximado de los tributarios y cursos principales de agua, para estimar la influencia que podrían tener los primeros en la composición de las aguas más abajo.
- Las muestras de agua subterránea obtenidas en pozos deben ser tomadas con precaución. Algunos pozos han estado sin actividad durante largo tiempo por lo que el agua acumulada en su interior puede no ser representativa del acuífero. Según el estado en que se encuentre la habilitación, ésta podría ser por si misma un foco de contaminación en las aguas. Lo

ideal es bombear el pozo hasta que el agua de su interior se haya renovado, aunque no siempre se cuenta con las condiciones para ello. En este caso, conviene usar al menos un método manual para vaciar la mayor parte y obtener agua relativamente fresca o por ejemplo, utilizar muestreadotes manuales (bailers) que permiten tomar la muestra frente a la zona de rejilla (cribas) del pozo, donde la renovación del agua dentro de la perforación se espera mayor. También muchas veces se toman muestras durante la perforación de los pozos, que serán representativas del acuífero dependiendo de la técnica empleada y cómo se recupere la muestra de agua. El método de perforación debe ser especificado, así como aditivos que se hubieran incorporado durante la operación.

- Para la caracterización de los parámetros físico-químicos y como información relevante para el laboratorio, se deben medir en terreno por lo menos la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica, con equipos previamente calibrados en cada campaña.
- En el Altiplano las oscilaciones térmicas suelen ser bruscas durante todo el año, por lo que además de la temperatura de la muestra, se debe medir la temperatura del ambiente, y en lo posible describir condiciones climáticas como dirección e intensidad del viento y precipitaciones. Estos datos, pueden ayudar en gran parte a interpretar resultados anómalos o no esperados en las muestras.
- Al momento de acordar los distintos tipos de análisis con el laboratorio, se debe solicitar entre ellos las concentraciones de elementos mayoritarios como **disueltos**, ya que son éstos los responsables del equilibrio iónico del agua. En caso que este parámetro se vea afectado y no se logre un error de balance aceptable, se debe considerar la influencia en el balance de elementos minoritarios disueltos (que pudieran estar presentes como mayoritarios) e incluirlos en el cálculo.
- En el análisis de los elementos minoritarios, el límite mínimo de detección del laboratorio es también un dato, por lo que no debe ser pasado por alto al confeccionar la base de datos.
- Es conveniente tomar medidas de control sobre los resultados entregados por el laboratorio, para ello se recomienda introducir duplicados o blancos en cada serie de muestras.

10.4 Fiscalización de usos y control de fuentes

• Pese a que esta cuenca no registra explotación de agua subterránea, de producirse en el futuro debe mantenerse un estricto monitoreo de niveles en pozos, tanto de aquellos que están siendo explotados (dinámicos) como los que no (estáticos). La frecuencia de

monitoreo se requiere a lo menos en estación seca y en estación húmeda para los pozos no bombeados y de forma mensual como mínimo para aquellos con explotación. De manera ideal, cuando se realice esta labor, los pozos de la cuenca deben ser monitoreados en fechas próximas, lo que permitirá tener una visión sinóptica (simultánea). Dependiendo del impacto que se observé bajo condiciones de bombeo, el plan de monitoreo debiese ser revisado para aumentar su frecuencia.

- De igual forma que lo anterior, en un escenario de explotación se debe mantener un monitoreo de caudales de explotación en pozos y captaciones superficiales, de donde se generen reportes de acceso público para la evaluación de recursos en la cuenca. La autoridad debe velar porque los caudales de explotación sean coherentes con los derechos de aprovechamiento otorgados, así como el impacto sobre los ecosistemas definidos con una mayor importancia no sean vulnerados por el uso intensivo del agua.
- Monitoreo de efectos de la explotación sobre sistemas vegetacionales de interés, definiendo criterios claros de evaluación que respeten las particularidades de cada cuenca. En este sentido, se puede definir criterios generales que sean homogéneos para la zona del altiplano que no han sido estudiados en profundidad ni tienen una importante demanda, sin embargo, para aquellas zonas que presentan mayor interés de uso de recursos y en que se reconozcan áreas protegidas, se requiere de definiciones más acotadas para evaluar y conservar sus características específicas.

10.5 Instrumentación y recolección de datos

- Monitoreo de nieve, tanto cantidad como contenido isotópico.
 - La magnitud de la nieve caída en la cuenca es importante para reconocer su aporte al escurrimiento superficial y a la recarga de los acuíferos. De acuerdo a lo observado en las estaciones meteorológicas instaladas en el marco de este estudio, en algunas zonas resultaría un parámetro preponderante para explicar el ciclo hidrológico dentro de la hoya Salar del Huasco. En particular en las pampas Columtucsa, Piga y Porquesa, que están a mayores cotas.
 - Muestreo de nieve para análisis de isótopos, para estimar contenidos meteóricos y tasas de sublimación. Esto requiere monitoreo continuo sobre mantos de nieve, en particular aquellos permanentes, cuyos contenidos pueden ser comparados con los de las aguas subterráneas para reconocer su relación.
- Monitoreo de lluvia, su cantidad, intensidad y contenido isotópico.

- Las mediciones de precipitación resultan primordiales para la evaluación de disponibilidad del recurso hídrico. Mientras mayor sea el tiempo de datos del que se disponga, mejor será la aproximación a la cuantificación de largo plazo. Ciertamente hay una necesidad en aumentar la red de pluviómetros en la cordillera y de manera particular en las cuencas cerradas próximas al límite con los paises vecinos del este. Esta tarea puede también realizarse o complementarse con el uso de imágenes satelitales y radares.
- Los registros de precipitación de nivel horario o incluso en fracciones menores de tiempo contribuirían al mejor desarrollo de modelos hidrológicos. Estos modelos son usados para estimar recarga de acuíferos y crecidas, entre otros, fenómenos que en este tipo de zonas ocurren bajo precipitaciones de corta duración pero alta intensidad. La necesidad de esta información es algo que se detecta en otras zonas áridas y semiáridas del mundo y en la que los especialistas ponen hincapié por trabajar (ver *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*, editado por Wheater et al., 2008).
- Caracterización isotópica de precipitaciones, para definir rectas meteóricas locales en vías de conocer la altura de recarga de las cuencas y posibles descargas en cotas menores. Esto requiere la instalación de una red de colectores de precipitación acompañada de pluviómetros, para conocer el aporte isotópico de las lluvias registradas.
- Evaluar la distribución de la actual red de piezómetros y punteras en el área de la cuenca donde las napas se encuentran más superficiales, como es el salar y su entorno, de tal manera que se cubra toda la extensión con napas menores a 10 m de profundidad. Se requiere realizar mediciones periódicas en estos puntos, al menos estacionales (época húmeda y seca), para contar con una buena caracterización de la piezometría en el tiempo que permita estimar adecuadamente las descargas por evaporación. Esta información debiese ser reportada de tal forma que fuese de acceso público y permitiría además de evaluar el sentido del escurrimiento en la depresión, la interacción entre las aguas superficiales y el acuífero.
- Medición estacional (seca y húmeda) de isótopos y parámetros químicos más importantes en vertientes y ríos, para mantener una base de datos actualizada que permita mejorar el entendimiento conceptual de cómo es la dinámica de los recursos hídricos en la cuenca.
- Recolectar muestras de agua para análisis químicos e isotópicos en cuencas vecinas. Las muestras debiesen considerar las fuentes precipitación, superficial y subterránea, lo que permitiría reconocer relaciones hidrológicas entre estos sistemas que superficialmente son cerrados.

- Se recomienda ampliar la red de monitoreo de evaporación (tanques evaporímetros Clase A) existente en la actualidad al interior de la zona de estudio. El incremento de estaciones permitiría realizar análisis regionales y locales en el altiplano sin tener que recurrir a estaciones lejanas que se encuentran sujetas a condiciones climáticas y geomorfológicas muy distintas. Estos datos debiesen ser de carácter público y contar con una buena calidad de registro diario.
- Instalación de piezómetros o construcción de pozos para monitorear los niveles de agua en el sector de la Ignimbrita Huasco, al oeste de la cuenca. Se requiere dilucidar la dirección de los flujos de agua subterránea, su contenido isotópico y el efecto de las estructuras geológicas en la zona.

11 REFERENCIAS

- Acosta, O., 2004. Impacto de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco. Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Acosta, O. y Custodio E., 2008. Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). Boletín Geológico Minero, 119 (1): 33-50.
- Allmendinger, W., Jordan, T., Kay, S., Isacks, B., 1997. The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. Annual Review, Earth Planet Science, 25, 139 174.
- Aravena, R., Suzuki, O., Peña, H., Pollastri, A., Fuenzalida, H. y Grilli, A., 1999. Isotopic composition and origin of precipitation in northern Chile. Applied Geochemistry 14, 411-422.
- Baby, P., Rochat, P., Mascle, G., Hérail, G., 1997. Neogene shortening contribution to crustal thickening in the back arc system of the Bolivian Orocline (Central Andes). Geology, 25, 883 886.
- Francis, P., Baker, M., 1978. Sources of two large ignimbrites in the Central Andes, some Landsat evidence. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 4(1-2), 81-87.
- Börgel, R., 1983. Geomorfología. Colección Geografía de Chile, Tomo II, Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.
- Centro de Estudios para el Desarrollo (CED), 2003. Gestión Integrada de Cuencas Áridas y Semiáridas. Acta del Seminario y Taller Internacional, 29 y 30 de Octubre de 2003. Conservación de la Biodiversidad y Manejo Sustentable del Salar del Huasco, en el marco del Proyecto CHI/01/G36.
- Charrier, R. and Vicente, J.C., 1972. Liminaxy and geosyncline Andes: major orogenic phases and synchronical evolution of the central and austral sectors of the southern Andes. Proc. Conf. sobre problemas de la Tierra Sólida, Buenos Aires, 2: 451-470.
- Coira, B., Davidson, C., Mpodozis, C., Ramos, V., 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. Earth-Science Reviews, Special Issue, 18, 303–332.

- Collahuasi GP Consultores Ltda., 2003. Modelo Hidrogeológico de Gestión del Sistema Hídrico del Salar del Huasco. Informe Final de Modelación para la Dirección General de Aguas. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM. Santiago, Chile.
- Collahuasi GP Consultores Ltda., 2004. Elementos Ambientales Sensibles en el Salar del Huasco y su Demanda Ambiental Hídrica. Santiago, Chile.
- Collahuasi GP Consultores Ltda., 2005. Modelo Hidrogeológico de Gestión del Sistema Hídrico del Salar del Huasco. Actualización N° 1 para la Dirección General de Aguas. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM. Santiago, Chile.
- Collahuasi GP Consultores Ltda., 2006. Antecedentes Levantamiento Geofísico TEM Salar del Huasco.
- Collahuasi GP Consultores Ltda., 2007. Información sobre evaporación provista por Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Informes inéditos.
- Collahuasi GP Consultores Ltda., 2008. Información sobre evaporación provista por Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Informes inéditos.
- Compañía Minera Cerro Colorado operada por BHP Billiton. Informe Semestral Cuenca de Lagunillas, enero junio 2007. Preparado para la Dirección General de Aguas.
- Cooper, H. H. Jr. & C. E. Jacob, 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. EOS Trans. AGU 27, N° 4: 526-534.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133, 1.702.
- Derruau, M., 1966. Geomorfología. Editorial Ariel, Barcelona.
- DICTUC, 2005. Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la Cuenca del Salar de Coposa. Informe Técnico.
- Dirección General de Aguas (DGA) Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), 1998. Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal, I Región. S. I. T Nº 48. Convenio de Cooperación.
- Dirección General de Aguas, 2007. Coberturas digitales SIG.
- Dirección General de Aguas, 1987. Balance Hídrico de Chile.

- Dirección General de Aguas (DGA), Departamento de Estudios y Planificación (DEP), 2006. Actualización delimitación de acuíferos que alimentan vegas y bofedales de la Región de Antofagasta. Cartografía Temática, S. I. T Nº 111.
- Fernández, J., Galindo G., Parada, M., Gimeno, D., García, M. y Saavedra, J., 2005. Estado Actual del Conocimiento sobre el Arsénico en el Agua de Argentina y Chile: Origen, Movilidad y Tratamiento. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea y IV Congreso Hidrogeológico Argentino.
- Galli, C. 1957. Las formaciones geológicas en el borde occidental de la puna de Atacama, sector de Pica, Tarapacá. Minerales, Vol. 56, p. 14-26.
- Gaupp, R., Kött, A., Wörner, G., 1999. Palaeoclimatic implications of Mio- Pliocene sedimentation in the high-latitude intra-arc Lauca basin of northern Chile. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 151, 79–100.

Golden Software, 1999. Surfer V7.0. http://www.goldensoftware.com/

- Grilli, A. y Vidal, F., 1986. Evaporación desde Salares: Metodología para Evaluar los Recursos Hídricos Renovables. Aplicación en las Regiones I y II. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, V1, Nº 2.
- Hantush, M. S., and C. E. Jacob, Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer, Eos Trans. AGU, 36(1), 95–100, 1955.
- Hargis y Montgomery, 1981. Hydrogeological Investigation of the Salar del Huasco Basin. Interim Report, August 4, 1981.
- Houston, J., 2002. Groundwater recharge through an alluvial fan in the Atacama Desert, northern Chile: mechanisms, magnitudes and causes. Hydrol. Process. 16, 3019 3035.

Instituto Geográfico Militar, 1987. Cartografía de Chile, escala 1:250.000.

INVEREX Ltda. 2000 al 2002. Diversos Informes sobre Antecedentes de Construcción y Análisis de Pruebas de Bombeo en los pozos de Collahuasi. Preparado para Compañía Minera de Collahuasi.

Isacks, B. L., 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian Orocline. Journal of Geophysical Research, 93, 3.211 – 3.231.

- Japan International Cooperation Agency (JICA), Dirección General de Aguas (DGA) y Pacific Consultants International. 1995. The Study on the Development of Water Resources in Northern Chile.
- Johnson, J., 2009. Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno. Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Lamb, S., Hoke, L., Kennan, L. & Dewey, J., 1997. Cenozoic evolution of the Central Andes in Bolivia and northern Chile. Geological Society Special Publication No. 121, pp.237-264.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H., 1977. Hidrología para Ingenieros (2nd ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana.
- López, P. y Garcés, I., 2002. Evolución química de las salmueras del Salar del Huasco (Chile) en condiciones experimentales controladas. Rev. Real Academia de Ciencias. Zaragoza. 57: 201–209, (2002).
- Luna, D., Sánchez, C., Muñoz, J., 2005. Métodos para medir la Conductividad Hidráulica Saturada de Campo. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XX, núm. 2, pp. 95-107.
- Margaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O. y Grilli, A., 1989. Water chemistry and isotope study of streams and springs in northern Chile, Journal of Hydrology 108 (1989), pp. 323–341.
- Margaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O. y Grilli, A., 1990. Source of groundwaters in the deserts of northern Chile: evidence for deep circulation of groundwaters from the Andes. Ground Water 28:523–517.
- NASA, 1999. Imágenes Satelitales Landsat ETM+.
- Niemeyer, H. y Cereceda, P. 1984. Instituto Geográfico Militar. Geografía de Chile, Tomo VIII, Hidrografía.
- Orrego, J., 2002. El Estado Actual de las Aguas Terrestres en Chile: Cursos y Agua Subterránea. Santiago, Chile.
- Poblete, D., 2008. Modelo Hidrológico Distribuido para la Estimación de Recursos Hídricos. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Reutter, K., Scheuber, E., Chong, E., 1996. The Precordilleran fault system of Chuquicamata, Northern Chile: evidence for reversals along arc-parallel strike-slip faults. Tectonophysics, Vol. 259, Issues 1–3, pp. 213–228. Geodynamics of The Andes.
- Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C., 1999. Convenio de Cooperación entre la Dirección General de Aguas (DGA), la Universidad Católica del Norte (UCN) y el Institute de Recherge Pour le Développement (IRD). Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones – Chile (S.I.T. Nº 51).
- Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C., 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. Earth Science Reviews 63 (249-293).
- Salazar, C., Rojas, L., Lillo, A., Aguirre, E., 2001. Análisis de Requerimientos Hídricos de Vegas y Bofedales en el Norte de Chile.
- Sánchez, M. Y Velozo, L., 2007. Vocabulario de Geomorfología y términos afines. Serie GEOlibros, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Sayes, J., 1978. Cuadrángulos Collacagua y Laguna del Huasco, Provincia de Iquique, I Región: scale 1:100,000. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile, 43 pp.
- Scheuber, E., y González, G., 1999. Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°–26°S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. Tectonics, 18(5), 895–910.
- Scheuber, E. y Reutter, K.J., 1992. Magamtic arc tectonics in the Central Andes between 21° 25° S. Tectonophysics, 205, 127-140.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 2003. Mapa Geológico del Norte Grande de Chile, Escala 1:1.000.000.
- Shuttleworth, W., 1993. Evaporation, Chapter 4 en Maidment, D., 1993, Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, Inc.
- Stoertz, G. y Ericksen, G., 1974. Geology of salars in northern Chile. Geol. Surv. Prof. Paper 811 (1974), pp. 1–67.
- Theis, CV., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. Trans Am Geophys Union Part 2, 16:519–524.

- Tröger, U. y Gerstner, D., 2004. Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica. Informe Técnico de Asesoría Experta, S.D.T. Nº 174, Convenio DGA CONADI.
- US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual.
- US Geological Survey, 2007. Digital Elevation Model (DEM), http://seamless.usgs.gov/.
- Vergara, H., Thomas, A., 1984. Carta Geológica de Chile, Hoja Collacagua, Nº 59, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Wang B., Jin, W., Nimmo, J., Lei Yang L., Wang, W., 2008. Estimating groundwater recharge in Hebei Plain, China under varying land use practices using tritium and bromide tracers. Journal of Hydrology, 356(1-2), 209–222.
- Xu, Y., Mo, Y., Cai, Y. Li, X., 2005. Analysis on groundwater table drawdown by land use and the quest for sustainable water. Agricultural Water Management, 75(1), 38–53.
- Yuan, X., S. V. Sobolev, R. Kind, O. Oncken, and Andes Siesmology Group, 2000. New constraints on subduction and collision processes in the central Andes from P-to-S converted seismic phases, Nature, 408, 958 961.

ANEXOS
ANEXO I

"Estaciones Pluviométricas"

ANEXO I ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

AI.1 Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado (S=seco, P=Lluvia) y de Transición Entre Estados para el Modelo de Markov Diario

Estaciones DGA

- ✓ Cancosa
- ✓ Huaytani
- ✓ Pampa Lirima
- ✓ Lagunillas

Estaciones CMDIC

- ✓ Coposa
- ✓ Rosario
- ✓ Salar Michincha
- ✓ Pampa Ujina
- ✓ Salar Coposa
- ✓ Mina Ujina



Probabilidades Empíricas de Transición



Estación Huaytani Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado



Probabilidades Empíricas de Transición



Estación Pampa Lirima

Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado



Probabilidades Empíricas de Transición



Estación Lagunillas







Estación Coposa

Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado



Probabilidades Empíricas de Transición



Estación Rosario



Probabilidades Empíricas de Transición



Estación Salar Michincha

Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado



Probabilidades Empíricas de Transición



Estación Pampa Ujina



Probabilidades Empíricas de Transición



Estación Salar Coposa

Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado



Probabilidades Empíricas de Transición



Estación Mina Ujina



Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado





AI.2 Probabilidades de Permanencia en un Estado (S = seco, P = Lluvia) Durante k Días

Estaciones DGA

- ✓ Cancosa
- ✓ Huaytani
- ✓ Pampa Lirima
- ✓ Lagunillas

Estaciones CMDIC

- ✓ Coposa
- ✓ Rosario
- ✓ Salar Michincha
- ✓ Pampa Ujina
- ✓ Salar Coposa
- ✓ Mina Ujina



Estación Cancosa

• Р

8 9 10

← P

7 8 9 10



Estación Huaytani



MARZO

- S

56 Días

← s

5 6 Días

4

6

JUNIO

4

7



1,0

0,8

Probabilidad 9'0 9'0 9'0

0,2

0,0













Estación Pampa Lirima



Estación Lagunillas





0,2

0,0 ·

1 2 3 4

0,2

0,0

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Días

Estación Rosario

s

5 6 7 8 9 10 Días

0,2

0,0

1 2 3 4

5 6 7 8 9 10 Días

- P



Estación Salar Michincha



Estación Pampa Ujina



Estación Salar Coposa



Estación Mina Ujina

AI.3 Probabilidad de Lluvia a una Determinada Hora

Estaciones CMDIC

- ✓ Coposa
- ✓ Rosario
- ✓ Salar Michincha
- ✓ Pampa Ujina
- ✓ Salar Coposa
- Mina Ujina



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Coposa.



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Rosario.



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Salar Michincha.



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Pampa Ujina.



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Salar Coposa.



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Mina Ujina.

ANEXO II

"Resultados de Análisis Pruebas de Bombeo en Antecedentes"

25	M
606	ğ
4	U

ANEXO II RESULTADOS DE ANÁLISIS PRUEBAS DE BOMBEO EN ANTECEDENTES

Tabla 11.1: Resultados de transmisividad en análisis pruebas de bombeo con anterioridad al presente estudio DGA – PUC (DIHA).

									Τ	ransmisiv	idad Hidráı	ulica (m²/	(P,						
Pozo	Pozo ĉi	o		IICA-DGA	-PCI (1995	5		INVE	REX Ltu	da. (2000-	2002)		CMDIC	- GP Cont (2003)	sultores		Acosta	(2004)	
	Obs.	(L/S)	Theis	Cooper & Jacob	Recup. Cooper & Jacob	Recup. Theis	Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Hantush	Neumann	Recup. Theis	Cooper & Jacob	Theis	Recup. Cooper & Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Hantush	Recup. Theis
Ρ1		95	ı	ı		ı	1.272,93	ı	ı	ı	ı		926	1.433		1.680	1.080	652	1.730
	E1		ı	ı	ı	ı	4.055,5	ı	ı	ı	ı	ı	4.018	4.219	ı	4.780	4.740	4.420	5.820
	E3		ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	·	ı	·	5.247	4.681	4.471	5.430
P2		95	ı	ı	·	ı	4.172	ı	ı	ı	I	I	3.082	1.181	·	4.020	1.410	792	2.620
	E6		ı	ı	·	ı	4.172,4	ı	ı	ı	ı	ı	4.176	3.730	ı	4.750	4.300	4.203	4.280
P3		95	ı	ı	ı	ı	2.834,08	ı	ı	ı	ı	ı	4.450	1.351	ı	3.160	1.610	916	2.410
	E5		ı	ı	ı	ı	5.890,45	ı	ı	ı	ı	ı	5.846	5.357	ı	6.300	6.500	6.000	5.600
P4		100	ı	ı		ı	ı	ı	I	·	I	I		1.685	,	6.700	2.240	1.270	8.500
	E4		ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	7.272	5.674	ı	5.800	4.300	3.200	7.800
P5		75	ı	ı	ı	I	ı	4.030	ı	ı	ı	4.550	1.393,9	714,2	2.649,6	2.800	n.a	n.a	2.700
	Ε7		ı	I	ı	I	I	4.000	I	2.860	I	3.390	1.886,4	3.772,8	3.686,4	3.600	n.a	1.900	3.000
P6		60	ı	I	ı	I	I	3.220	ı	ı	ı	4.130	ı	I	ı	3.300	n.a	n.a	3.100
	E8		ī	I	ı	I	I	15.000	5.200	5.260	I	5.900	ı	I	ı	5.900	n.a	3.000	5.900
LQ		70	ī	I	ı	I	I	I	ı	ı	I	I	ı	I	I	11.200	n.a	n.a	9.900
1	E9		ı	I	ı	I	I	I	ı	ı	ı	I	ı	I	ı	14.000	n.a	6.300	10.000
P8A		50	ı	I	ı	I	ı	1.100	I	ı	I	207	1.035,36	266,4	861,12	1.300	n.a	I	I
P8A			ı	I	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	I	ı	I	49,25	ı	ı	I	ı
	E11		ī	I	ı	I	I	862	1.140	696	528	876	817,92	1.164,96	853,92	1.100	1.100	I	ı
	E12		ı	ı	ı	I	ı	1.770	1.520	1.780	1.250	I	1.414,08	1.785,6	I	1.700	1.500	I	ı
	P8		ı	ı	ı	ı	ı	1.110	1.070	1.230	1.040	ı	1.103	1.771,2	ı	1.400	1.000	I	ı

Tabla 11.1: Resultados de transmisividad en análisis pruebas de bombeo con anterioridad al presente estudio DGA – PUC (DIHA). (Continuación).

	,								É	anemicivi.	dad Hidrán	ilica (m ² /č							
Pozo	0Z0	ð	JIC	CA-DGA-J	PCI (1995)	_		INVE	REX Ltc	la. (2000-:	2002)		CMDIC	- GP Con (2003)	sultores		Acosta	(2004)	
	Obs. (l/s) Th	neis 6	Cooper & Jacob	Recup. Cooper & Jacob	Recup. Theis	Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Hantush	Neumann	Recup. Theis	Cooper & Jacob	Theis	Recup. Cooper & Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Hantush	Recup. Theis
6d		. 09		ı	ı	ı	ı	364	ı	I	ı	1.430	254,88	240,48	1.262,88	505	n.a	ı	1.000
	E17	r	ı	I	ı	ı	ı	863	1.050	1.130	753	1.180	712,80	597,6	1296	740	1.000	ı	1.300
	E13	·	ı	I	ı	ı	ı	ı	ı	ı	·	I	345,60	290,88	·	481	300	ı	ı
P10	- 1	50 -	ı	I	ı	ı	ı	8,28	9,19	I	ı	8,92	82,51	102,1	79,49	84	83	ı	87
	E16	·	ı	I	ı	ı	ı	134	370	274	120	204	133,63	195,84	190,08	170	200	ı	210
	E14			ı	ı	·	ı	I	·	I	ı	ı	532,8	499,68	·	575	374	ı	
P11	ч	40		ı	ı	ı	ı	137	91,6	ı	ı	326	146,88	105,98	358,60	138	110	ı	174
P11	ч	40	ı	ı	ı	ı	ı	·	ı	ı	ı	ı	·	I	105,30	ı		ı	ı
	E13	-	ı	ı	ı	I	ı	434	326	275	192	269	244,8	335,52	267,84	300	240	ı	281
	P9	-	ı	ı	ı	ı	ı	ı	·	ı	ı	ı	ı	ı	ı	872	715	ı	ı
P14		85	ı	ı	ı	ı	ı	487	ı	ı	ı	18.900	ı	ı	ı	ı		ı	ı
	E27	-	ı	ı	ı	I	ı	14.900	8.190	8.980	692	1.340	ı	ı	ı	ı		ı	ı
P12		70	ı	ı	ı	ı	ı	ı	·	ı	ı	ı	303,84	348,48	440,64	271	288	ı	400
	E19	-	ı	ı	ı	I	ı	ı	·	ı	ı	ı	313,92	361,44	375,84	366	356	ı	347
P13	-	90	ı	ı	ı	ı	ı	ı	·	ı	ı	ı	1.584	591,84	4.636,80	1.600	n.a	ı	3.200
	E22	-	ı	I	ı	I	ı	ı	ı	ı	ı	ı	4.464	4.680	5.774,40	4.700	5.100	I	5.600
J-10		5 181	1,44	175,39	200,4	208,22	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı		ı	ı
J-G	. 1	25 82,	,94	102,82	210,82	228,96	I	I	ı	I	I	ı	ı	ı	ı	ı	'	I	ı
	Nota	ı: n.a:	: No ajı	usta															

361

n.r: Ensayo no realizado

COPIA Tabla 11.2: Resultados de conductividad hidráulica en análisis pruebas de bombeo con anterioridad al presente estudio DGA – PUC (DIHA).

										Conductivid	nd Hidráu	llica (m/d)						
I	Pozo	С	JICA-	DGA-PC	I (1995)		INV	EREX I	Ltda. (200	0-2002)		CMDIC - GI	, Consul	tores (2003)		Acosta	a (2004)	
Pozo	Obs.	(L/s)	Theis	Cooper & Jacob	Recup. Cooper & Jacob	Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Hantush	Neumann	Recup. Theis	Cooper & Jacob	Theis	Recup. Cooper & Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Recup. Theis	Hantush
P1		95		ı	ı	ı	1			ı		9	9,2		13	6	14	5
	E1		ı	I	ı	ı	I	ı	ı	ı	ı	25,9	27,1	·	38	38	46	35
	E3		ı	ı	ı	ı	I	·	·	ı	ı			·	42	37	43	35
P2		95	ı	ı	ı	ı	ı	ı	,	ı	ı	20,2	7,7	·	37	14	24	Ζ
	E6		ı	ı	ı	ı	ı	ı	'	ı	ı	27,2	24,3		44	40	40	39
$\mathbf{P3}$		95	ı	I	ı	I	I	ı	·	ı	I	35,3	10,7	ı	34	17	26	10
	E5		ı	ı	ı	ı	ı	ı	'	ı	ı	46,4	42,5		69	70	60	64
P4		100	ı	ı	ı	ı	I	·	·	ı	ı		12,7	·	67	22	83	12
	E4		ı	I	ı	I	ı	·	ı	ı		54,7	42,8	ı	57	42	LL	32
P5		75	ı	ı	ı	ı	50	·	·	ı	44	6,47	3,32	12,3	28	n.a	27	n,a
	Ε7		ı	I	I	ı	40	ı	57	I	83	8,68	17,37	16,97	35	n.a	27	18
P6		60	ı	I	ı	ı	55	ı	ı	I	71	ı	ı	ı	55	n.a	52	n.a
	E8		ı	ı	ı	I	250	87	87	ı	108	ı	ı	ı	66	n.a	66	50
P7		70	ı	I	ı	ı	I	ı	ı	I	I	ı	ı	ı	122	n.a	108	n.a
	E9		·	I	ı	ı	I	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	154	n.a	110	68
P8A		50	ı	ı	ı	ı	8,2	·	·	ı	6,7	4,77	1,23	3,97	10	ı	ı	ı
P8A		50	·	I	ı	ı	I	·	ı	ı	ı	ı	ı	0,23		ı	ı	ı
	E11		ı	ı	ı	I	11,1	7,6	6,5	3,5	6,5	3,5	4,99	3,66	6	6	ı	ı
	E12		ı	I	ı	ı	I	,	ı	ı	ı	61,4	77,53	·	13	11	ı	ı
	P8		ı	ı	ı	ı	0,5	0,5	0,6	0,5		ı	ı	ı	10	×	ı	ı
6d		60	ı	I	ı	ī	2,9	ı	ı	ı	11,3	1,14	1,08	5,65	4	n.a.	8	ı
	E17		ı	ı	ı	ı	6,8	8,3	6	9	9,3	3,09	2,59	5,62	9	×	11	ı
	E13		I	I	I	I	I	ı	ı	I	ı	2,24	1,89	ı	4	2	I	ı

Tabla 11.2: Resultados de conductividad hidráulica en análisis pruebas de bombeo con anterioridad al presente estudio DGA - PUC (DIHA). (Continuación).

	, ,																
									onductivid3	ad Hidráu	lica (m/d)						
) Uzu	JIC	A-DGA-PC	CI (1995)		INV	EREX	Ltda. (200	0-2002)	-	CMDIC - GI	• Consult	ores (2003)		Acosta	1 (2004)	
Pozo	Obs. (L	/s) Thei	Cooper s & Jacob	Recup. Cooper & Jacob	Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Hantush	Neumann	Recup. Theis	Cooper & Jacob	Theis	Recup. Cooper & Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Recup. Theis	Hantush
P10	5	- 0:	1	1	·	0,1	0,9	,	ı	0,1	0,36	0,44	0,34	0,7	0,7	0,8	1
	E16	ı	I	·	·	1,2	3,2	2,4	1,1	1,8	0,56	0,83	0,8	1,5	1,8	1,8	I
	E14	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	I	ı	2,66	2,5	ı	5	ю	I	I
P11	4	- 01	I	·	·	1,2	0,8	ı	ı	2,8	0,71	0,51	1,74	1,3	1	1,6	I
P11		ı	ı	ı	ı	ı	I	ı	I	ı	ı	I	0,51	ı	ı	I	I
	E13	ı	I	ı	·	3,8	2,9	2,4	1,7	2,4	1,08	1,48	1,18	2,9	2,2	2,6	I
	P9	ı	ı	ı	·	ı	ı	ı	ı	ı	·	·	ı	×	6,6	ı	ı
P12	6	- 0,	ı	ı	·	ı	ı	ı	I	ı	1,73	1,99	2,51	3,8	4	5,6	I
	E19	ı	ı	ı	·	ı	ı	ı	ı	ı	1,91	2,2	2,29	5,1	5	4,8	ı
P13	6	- 00	I	ı		ı	ı	ı	I	ı	15,64	5,84	45,77	25	n.a	49	I
	E22	ı	ı	ı	·	ı	ı	ı	I	ı	44,78	46,95	57,92	72	78	85	I
P14	×	5 -	I	ı		3,12	·	ı	ı	136		·	ı	ı	ı	ı	I
	E27	I	ı	ı	·	101	55,7	54,4	25,8	9,2	ı	·	ı	·	ı	ı	ı
J-10		5 2,02	1,96	2,24	ı	ı	ı	ı	ı	ı	2,02	1,96	2,24	ı	ı	ı	ı
J-G	2	5 1,26	1,56	3,2	ı	·	ı	ı	I	ı	1,26	1,56	3,2	ı	ı	·	I
Nota:	n.a: N	lo ajusta															

- : Ensayo no realizado

– PU(C (DIE	IA).												
								Coeficiente	de Almacer	iamiento				
Pozo	Pozo	o;	JICA-DGA-	.PCI (1995)		INVERE	X Ltda. (2)	00-2002)	•	CMDIC - GP Cor	nsultores (2003)	A	costa (2002	(
	Ops.	(T/8)	Theis	Cooper & Jacob	Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Neumann	Hantush	Theis	Cooper & Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Hantush
		95	ı	ı		I	I	I	I	ı	ı	I	ı	ı
P1	El		ı	ı	3,82E-03	I	I	ı	ı	5,65E-04	3,93E-03	8,90E-03	8,72E-03	8,14E-03
	E3			ı		ı	ı	I	·			1,35E-04	2,14E-04	1,82E-04
Ě		95	ı	ı	ı	I	ı	I	ı	ı	ı	I	ı	ı
77	E6		ı	ı	1,64E-03	I	I	ı	ı	1,69E-03	2,05E-03	1,10E-03	1,40E-03	2,20E-03
Ę		95	ı	ı	ı	I	I	I	ı	ı	ı	I	ı	ı
J.	E5		ı	ı	3,80E-03	I	I	ı	ı	1,80E-04	3,22E-03	3,10E-04	2,10E-04	4,74E-04
è		100	ı	ı	ı	I	ı	ı	ı	ı	·	I	·	ı
7 4	E4		·	I	ı	I	I	I	ı		ı	1,01E-04	3,12E-04	6,06E-04
		75		I	·	ı	I	I	ı	ı	ı	I	ı	·
2	Ε7		ı	I	ı	1,60E-06	I	I	1,59E-05	4,80E-06	1,21E-04	1,90E-05	n.a	1,12E-04
žď		60	ı	ı	ı	ı	ı	ı	ı	I	I	ı	ı	ı
2	E8		ı	ı	ı	4,46E-07	5,66E-04	ı	4,25E-04		·	4,50E-04	n.a	1,60E-03
		70	·	ı	·	I	I	ı	ı	I		I	ı	ı
Г/	E9		ı	ı	ı	ı	I	ı	ı	I		1,10E-05	n.a	1,30E-04
		50	ı	ı	ı	I	I	I	ı	I	I	I	ı	ı
D 9 A	E11		ı	I	ı	1,12E-01	5,27E-02	8,01E-02	8,34E-02	2,99E-04	1,36E-03	1,80E-04	2,10E-04	ı
	E12		ı	ı	ı	4,23E-03	7,21E-03	6,40E-03	6,49E-03	2,39E-03	3,59E-03	7,30E-03	7,20E-03	ı
	P8			,		5,75E-02	1,01E-01	8,85E-02	8,56E-02	1,26E-02	5,26E-02	5,10E-02	8,40E-02	·

460625 COPIA Idio DGA

								Coeficient	e de Almace	mamiento				
Pozo	Pozo ô'	o;	JICA-DGA	-PCI (1995)		INVER	EX Ltda. (2000-2002)		CMDIC - GP Co	insultores (2003)	Ac	costa (2004	-
	Obs.	(T/S)	Theis	Cooper & Jacob	Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Neumann	Hantush	Theis	Cooper & Jacob	Cooper & Jacob	Theis	Hantush
		60	ı	ı		ı	ı	ı	I			I	ı	I
6d	E17		ı	I	ı	8,31E-03	3,05E-03	3,33E-03	3,27E-03	9,04E-04	6,61E-04	9,00E-03	4,10E-03	I
	E13		ı	ı	ı	ı	ı	ı	I	1,34E-04	1,02E-04	1,10E-04	2,10E-04	ı
		50	ı	ı	I	ı	ı	ı	I	ı	ı	I	ı	ı
P10	E16		ı	ı	ı	3,11E-03	1,47E-03	5,11E-04	8,86E-04	6,98E-04	1,37E-03	2,10E-03	2,10E-03	
	E14		ı	ı	I	ı	ı	ı	I	5,43E-04	4,38E-04	4,10E-04	6,10E-04	
		40	ı	I	ı	ı	ı	ı	I	ı	ı	I	ı	ı
P11	E13		ı	ı	ı	1,97E-04	5,66E-03	4,75E-03	7,56E-03	2,16E-03	5,16E-03	5,10E-03	7,10E-03	ı
	6d		·	ı	I		·	·	ı	ı		1,10E-03	6,10E-04	·
		70	ı	ı	I	I	I	I	ı	·	I	ı	I	ı
717	E19		ı	ı	ı	I	I	ı		5,02E-04	8,74E-04	5,10E-04	5,10E-04	I
610 6		90	ı	ı		ı	I	ı	ı	I	I	ı	ı	ı
сц	E22			·		ı	I	ı	·	4,24E-03	4,71E-03	4,10E-03	2,10E-03	
11 1		85	ı	·		ı	ı	ı	ı	I	I	ı	ı	ı
r14	E27		·	·		1,33E-04	5,69E-03	5,60E-03	4,84E-03	ı	I	·	I	I
J-10		5	1,10E-10	1,40E-10		ı	ı	ı	ı	I	I	ı	ı	ı
J-G		25	1,50E-09	2,29E-11	ı	ı	ı	I		ı	I	ı	ı	ı
Nota:	n.a: N	lo ajus	sta											

- : Ensayo no realizado

460625 COPIA

ANEXO III

"Catastro de Pozos, Coberturas SIG y Base de Datos Hidroquímica"
ANEXO III CATASTRO DE POZOS, COBERTURAS SIG Y BASE DE DATOS HIDROQUÍMICA

- ✓ Catastro de pozos formato digital (xls)
- ✓ Coberturas SIG (CD)
- ✓ Base de datos hidroquímica (xls)
- ✓ Mapa con ubicación de obras de captación

ANEXO IV

"Mapa Toponimia Salar del Huasco"

ANEXO IV MAPA TOPONIMIA SALAR DEL HUASCO

✓ Mapa Toponimia Salar del Huasco

ANEXO V

"Mapas Geológicos Salar del Huasco"

ANEXO V MAPAS GEOLÓGICOS SALAR DEL HUASCO

- ✓ Mapa Geológico Escala 1:250.000
- ✓ Perfiles Geológicos con Información Estratigráfica de Pozos



Figura 11.1. Ubicación de perfiles estratigráficos en cuenca Salar del Huasco (proyección sobre imagen LANDSAT).